

# 干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析

鲍超, 方创琳

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:** 水资源对城市化的约束力已经成为干旱缺水地区决定城市化发展速度, 进而决定城市化和社会经济发展规模的重要外营力之一, 科学度量并探讨其时空变化, 对水资源可持续利用与城市化正常推进具有重要意义。以定性分析与定量分析相结合的方法建立了水资源对城市化约束强度的综合测度指标体系, 采用熵技术支持下的层次分析法构建出水资源对城市化约束强度的综合测度模型, 并对 1985-2005 年河西走廊水资源对城市化约束强度的时空变化进行了分析。结果表明, 河西走廊水资源对城市化的约束强度在空间上总体表现为自东向西逐渐减小, 在时间上表现为由较强约束类型变为强约束类型, 总体呈不断增加态势, 但近年来略有缓解。虽然河西走廊水资源开发利用潜力综合指数与城市化系统综合发展指数都较低, 面临缺水和发展的双重矛盾, 但目前河西走廊大部分地区水资源对城市化的约束强度仍属于较强或强约束类型, 仍然能够通过合理调控实现可持续发展。

**关键词:** 城市化; 水资源约束力; 水资源约束强度; 时空变化; 河西走廊

## 1 引言

城市化是实现工业化和摆脱贫困走上现代化道路的必然过程, 也是衡量一个国家或地区现代化水平的重要标志<sup>[1]</sup>。因此, 国内外地理学、经济学、人口学和社会学等各个领域的学者都对城市化进行了广泛而深入的研究<sup>[2]</sup>。由于城市化和人口转移、经济发展以及工业化的密切联系, 城市化与工业化、经济发展、城市化制度等关系的研究, 一直是城市化研究的主流<sup>[3, 4]</sup>。而随着城市化进程的不断推进, 快速城市化及其引起的资源环境和空间失控等问题逐渐引起了人们的高度关注<sup>[5]</sup>, 水资源正是其中最重要的问题之一。部分学者认为, 城市化带来的水资源需求量增长是导致水资源危机的重要原因之一<sup>[6, 7]</sup>; 而部分学者通过城市化发展阶段与水资源开发利用阶段的关系<sup>[8, 9]</sup>以及用水与经济发展的关系<sup>[10]</sup>, 揭示了用水零增长的规律, 让担心全球水危机的人们看到了希望。由于部分发达国家水资源比较丰富, 而且大多数已进入城市化发展的后期阶段并实现了需水零增长, 因此国外多从水环境污染和管理的角度论述城市化对水资源系统的影响<sup>[11, 12]</sup>。而国内虽然开始关注城市化进程中的水资源短缺、水环境污染等问题及其产生的生态环境效应<sup>[13]</sup>, 但研究的重点仍集中在城市和工业用水量的增长态势及其对水资源系统的压力等方面<sup>[14]</sup>。反过来, 水资源系统对城市化和社会经济系统影响的研究, 主要集中在水资源对区域和城市人口、经济、生态环境的支撑保障作用方面<sup>[15]</sup>。然而, 随着人口经济规模等接近或超过水资源承载力, 水资源不仅是我国干旱、半干旱地区城市化和社会经济发展的内生变量, 而且已成为城市化和社会经济发展的重要外营力<sup>[16, 17]</sup>。因此, 将水资源约束力作为城市化发展的重要制动力进行综合调控, 对我国西北干旱区摆脱“社会经济和城市化发展水平

收稿日期: 2007-11-26; 修订日期: 2008-06-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-307-02); 中国博士后科学基金资助项目(20070420063); 中国科学院王宽诚博士后工作奖励基金 [Foundation: Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences, No.KZCX2-YW-307-02; China Postdoctoral Science Foundation Funded Project, No.20070420063; K. C. Wong Education Foundation, Hong Kong]

作者简介: 鲍超 (1978-), 男, 湖北麻城人, 博士后, 近期主要从事城市化与水资源可持续利用研究。

低—用水效率低、耗水大—社会经济用水挤占生态环境用水—生态环境和水资源系统退化—缺水限制社会经济和城市化发展—社会经济和城市化发展水平低”的恶性循环具有重要意义。而对水资源约束力进行度量,研究水资源对城市化约束强度的时空变化特征和规律,是进行综合调控的基础。

目前,笔者采用相关系数法测度分析了河西走廊水资源对城市化的约束强度<sup>[18]</sup>,阐明了理想状态下水资源约束力随水资源管理阶段呈倒U型曲线分布规律,并采用水资源管理阶段对应法分析了河西走廊水资源对城市化约束强度的变化<sup>[19]</sup>。虽然这两种水资源对城市化约束强度的测度方法,能够把握住水资源对城市化约束强度的总体特征,但由于城市化系统和水资源系统的复杂性,有必要进一步建立能够全面反映城市化系统和水资源系统状况的综合测度指标体系,然后根据城市化系统和水资源系统的发展状况,通过综合测度模型求出二者之间的摩擦激烈程度,这样才能够更加有针对性地分析水资源对城市化的约束强度类型、变化及其主导影响因素。因此,本文以河西走廊为典型研究区,通过建立水资源对城市化约束强度的综合测度指标体系和模型,分析了近20年来河西走廊水资源对城市化约束强度的时空变化。

## 2 研究区域概况

河西走廊地处甘肃省黄河以西,东起乌鞘岭、西至古玉门关,位于 $92^{\circ}21'E\sim 104^{\circ}45'E$ 和 $37^{\circ}15'N\sim 41^{\circ}30'N$ 之间。行政区划上自东向西分别为甘肃省的武威、金昌、张掖、嘉峪关和酒泉5个地级市,下辖20个县(市、区)(图1),总土地面积 $27.6\times 10^4\text{ km}^2$ ,占甘肃省总面积的60.4%,是甘肃省经济社会发展中最具活力和潜力的地区,也是我国实施西部大开发战略重点区域“两带一区”的重要组成部分<sup>[20]</sup>。但河西走廊不仅是一个典型的水资源问题区域(2005年人均水资源量仅为 $1663\text{ m}^3$ ,水资源开发利用超过100%),而且是一个“多病”的经济走廊<sup>[21]</sup>。如何协调社会经济发展与水资源的关系,是河西走廊可持续发展研究的重中之重。

改革开放尤其是20世纪80年代中期以来,由于城市人口和经济规模的不断膨胀,河西走廊人与水的关系由古代人类被动地适应水资源系统,以及农业经济时代外延式地扩大灌溉用水并导致水资源开发利用接近或超过极限<sup>[22,23]</sup>,已经逐渐演变为在竭力控制水资源超载的硬约束下,人类通过转变自身社会经济结构和增长方式来调控人水关系。城市化与水资源的关系逐渐成为人地关系的主旋律。一方面,河西走廊城市化带来的用水总量和用水结构变化,不仅导致局部地区水资源总量显著减少,而且对水资源质量变化也产生了重要影响,水资源系统由于数量和质量的普遍降低而不断发生退化;另一方面,河西走廊的水资源系统退化,对当前亟需增加城市和工业用水,并通过城市化和工业化摆脱贫困落后面貌也构成了严重约束<sup>[24]</sup>。因此,在实施城镇化战略和西部大开发战略的大背景下,亟需综合测度河西走廊水资源对城市化的约束强度,探讨其时空变化的规律性,为实现水-生态-经济-城市化系统的协调和可持续发展提供科学决策依据。



图1 河西走廊示意图

Fig. 1 Sketch map of the Hexi Corridor

### 3 指标体系和研究方法

#### 3.1 指标体系

水资源对城市化约束强度综合测度指标体系的建立, 必须遵循科学性、综合性、简明普适性及可获得性、可持续性、区域性、动态性等原则, 而且应追求这些原则的最佳结合和有效统一, 因此采用如下步骤和方法构建: 首先, 采用频度统计法、理论分析法和专家咨询法得到一般的测度指标体系。然后, 由于选择的指标所涵盖的内容常常带有某种相关性(包括正相关或负相关), 当相关性达到较大程度时就会产生指标间的信息重叠。如果指标间的重叠性较大, 就有可能人为地强化系统某项特征的重要性, 从而导致最终测度结果出现偏差。因此, 利用 SPSS 统计分析软件, 采用相关系数法和主成分分析法对一般的评价指标体系进行“筛选”, 将相关系数大于 0.90 以上的指标合并或筛减(部分相关系数较大但对标准层具有同等意义的重要指标仍然保留), 力求将信息涵盖面较广、指标间相关系数和信息重叠较小的综合指标选进指标体系。最后, 利用因子分析法<sup>[2]</sup>, 将累积贡献率超过 85% 的前几个指标构成最终的测度指标体系(表 1)。

#### 3.2 研究方法

由于水资源与城市化系统内各因素间存在着错综复杂的关系, 为此采用熵技术支持下的层次分析法(AHP)来确定各参评因子权重。AHP 法是现代地理学中常用的数学方法<sup>[26]</sup>, 虽然识别问题的系统性强, 但容易产生循环而不满足传递性公理, 导致标度把握不准和丢失部分信息, 因此采用熵技术对 AHP 法确定的权系数进行修正<sup>[26]</sup>, 计算公式为:

表 1 水资源对城市化约束强度的综合测度指标体系

Tab. 1 Integrated indicator system to measure water resources constraint intensity on urbanization

目标层	总体层	标准层	指标层
水资源	水资源	水资源	人均水资源量 (0.3501), 水资源总量折合地表径流深 (0.3381), 干旱指数 (0.1528), 河川径流年内分配集中度 (0.0669), 丰枯年地表水资源量比值 (0.0669), 水环境综合污染指数 (0.0253)
对城市	开发利用	本底条件	
化的约	潜力综合	(0.4133)	
束强度	指数	水资源开发	人均用水量 (0.1753), 水资源开发率 (0.3581), 水资源利用率 (0.3059), 地下水
	(0.875)	利用程度	水资源开发利用程度 (0.1312), 外调水利用率 (0.0295)
		(0.4746)	
		水资源开发	万元 GDP 用水量 (0.2712), 灌溉用水定额 (0.1206), 灌溉渠系利用系数
		利用效率	(0.0654), 单位粮食产量用水量 (0.1206), 万元工业产值用水 (0.1206), 工业用
		(0.0558)	水重复利用率 (0.0654), 城镇居民用水定额 (0.0277), 农村居民用水定额
			(0.0277), 工业用水比例 (0.0286), 生活用水比例 (0.0286), 农业节水率 (0.0654),
			工业节水率 (0.0580)
		水资源	万人水利科技人员数 (0.1048), 水利科研经费占 GDP 比重 (0.1784), 水利行政
		管理能力	管理费占财政支出比例 (0.1601), 水利工程达标率 (0.1844), 水利工程更新改造
		(0.0563)	率 (0.1844), 水资源费收取率 (0.0226), 自来水普及率 (0.0226), 安全饮水保障
			人口比例 (0.0226), 生态环境用水率 (0.0747), 万元工业产值废水排放量
			(0.0226), 城镇生活污水处理率 (0.0226)
城市化	人口城市化		人口密度 (0.0667), 非农业人口比重 (0.4667), 城镇人口比重 (0.4667)
系统	(0.4745)		
综合发展	经济城市化		人均 GDP (0.2212), 非农产业产值比重 (0.3113), 工业化水平 (0.3113), 建成区
指数	(0.3550)		经济密度 (0.0700), 非农产业产值密度 (0.0700), 工业全员劳动生产率 (0.0162)
(0.125)	社会城市化		城镇居民人均可支配收入 (0.1995), 农民人均纯收入 (0.1830), 人均消费额
	(0.0821)		(0.2228), 恩格尔系数 (0.0831), 高等教育毛入学率 (0.0713), 万人拥有医生数
			(0.0713), 万人拥有电话数 (0.0713), 万人拥有科技人员数 (0.0713), 交通运输
			网密度 (0.0262)
	空间城市化		城镇密度 (0.2544), 城镇人口密度 (0.1073), 建设用地占绿洲面积比重 (0.6382)
	(0.0884)		

$$a_j = v_j p_j / \left( \sum_{j=1}^n v_j p_j \right), \quad v_j = d_j / \sum_{j=1}^n d_j, \quad d_j = 1 - \lambda_j, \quad \lambda_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n r_{ij} \ln r_{ij} \quad (1)$$

式中:  $a_j$  为采用熵技术支持下的 AHP 法求出的指标权重,  $P_j$  为采用 AHP 法求出的指标权重,  $v_j$  为信息权重,  $\lambda_j$  为输出的熵值,  $r_{ij}$  为采用 AHP 法构造的判断矩阵经归一化处理后的标准矩阵值。按上述公式计算的各指标赋权结果信息量增大, 可信度提高<sup>[27]</sup>。

为了解决各具体指标值量纲不同的问题, 采用模糊隶属度函数对各指标的“价值”进行量化。对正向指标, 采用半升梯形模糊隶属度函数模型, 即

$$\Phi_{(e_{ij})} = \frac{e_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & e_{ij} \geq M_{ij} \\ \frac{e_{ij} - m_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & m_{ij} < e_{ij} < M_{ij} \\ 0 & e_{ij} \leq m_{ij} \end{cases}$$

对逆向指标, 采用半降梯形模糊隶属度函数模型, 即

$$\Phi_{(e_{ij})} = \frac{M_{ij} - e_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} = \begin{cases} 1 & e_{ij} \leq m_{ij} \\ \frac{M_{ij} - e_{ij}}{M_{ij} - m_{ij}} & m_{ij} < e_{ij} < M_{ij} \\ 0 & e_{ij} \geq M_{ij} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $e_{ij}$  为具体指标的属性值,  $i$  代表区域个数,  $j$  代表第  $i$  区域指标个数;  $M_{ij}$ 、 $m_{ij}$  分别代表第  $i$  区域第  $j$  个指标属性值的理论最大值与最小值;  $\Phi_{(e_{ij})}$  代表  $i$  区域  $j$  指标的隶属度。

有了各指标的熵化权系数和隶属度值, 就可以采用加权平均法分别计算标准层、总体层、目标层的综合指数。限于篇幅, 只列出直接计算总体层综合指数的公式:

$$F_i^l = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n [\omega_j^k \times \omega_k^l \times \Phi_{(e_{ij})}] \quad (3)$$

式中:  $F_i^l$  为  $i$  区域水资源开发利用潜力综合指数或城市化系统综合发展指数,  $\omega_j^k$  为  $j$  指标相对标准层的熵化权重,  $\omega_k^l$  为标准层对总体层的熵化权重,  $\Phi_{(e_{ij})}$  为  $i$  区域  $j$  指标以总体层为目标的隶属度,  $m$ 、 $n$  分别为指标层和标准层里评价水资源或城市化系统状况的指标个数。

从理论上讲, 当水资源系统开发利用潜力较大时, 水资源对城市化的约束强度较小。但由于水资源对城市化的约束强度除了直接受施力者(水资源系统)的状况决定外, 还受受力者(城市化系统)反馈作用的影响。当城市化综合发展水平较高时, 区域抗拒水资源约束力的能力较强, 相当于一定程度上减轻了水资源约束强度。因此, 对水资源约束强度来说, 水资源开发利用潜力综合指数和城市化系统综合发展指数均为逆向指标, 需先采用半降梯形模糊隶属度函数模型计算其隶属度值, 然后采用加权平均法即可求得:

$$WRCI = \omega_1 \times (1 - F_w) + \omega_2 \times (1 - F_u) \quad (4)$$

式中:  $WRCI$  为水资源对城市化的约束强度,  $F_w$  为水资源开发利用潜力综合指数,  $F_u$  为城市化系统综合发展指数,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为总体层对目标层的熵化权重,  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。上式还可表示为:

$$WRCI = 1 - (\omega_1 \times F_w + \omega_2 \times F_u) \quad (5)$$

该式的基本内涵为: 水资源开发利用潜力综合指数  $F_w$  和城市化系统综合发展指数  $F_u$  分别反映了水资源系统与城市化系统的健康状况, 它们的加权求和综合地反映了整个水资源系统与城市化系统的健康状况, 而系统综合发展水平指数与 1 (“最健康”水平) 之间的差, 体现了整个水资源系统与城市化系统的不健康状况。系统整体表现越不健康, 水资源系统与城市化系统的矛盾或摩擦程度越大, 则水资源约束强度越大。同时, 该式也

表明城市化水平的提高是减轻水资源约束强度的重要途径, 水资源约束强度之所以在一定阶段随城市化发展而增强, 是因为水资源系统健康状况的恶化超过了城市化系统健康状况的改善, 最终导致整个复合系统健康状况总体恶化。

在求出水资源对城市化的约束强度后, 可根据经验标准对其进行分级。目前国际上一般以 40% 作为水资源开发利用的警戒线, 即流域至少应将 60% 的水资源留给生态环境系统。近年来中国工程院有关专家通过总结各方面的研究成果后认为, 西北内陆干旱区生态环境和社会经济耗水以各占 50% 为宜<sup>[23]</sup>, 即流域至少需要 50% 的水资源留给生态环境系统。综合以上研究成果认为: 当流域还剩 70% 的水资源用于生态环境系统 (水资源开发利用潜力综合指数为 0.7) 时, 虽然城市化系统会给水资源系统带来一定压力, 但首先表现为社会经济用水对生态环境用水的挤占以及生态环境恶化, 社会经济和城市化发展速度受水资源短缺的影响较小; 当流域还剩 50% 的水资源用于生态环境系统时, 水资源系统除了通过生态环境系统对社会经济系统造成间接损失外, 还会对社会经济和城市化发展速度产生直接影响; 当流域还剩 30% 的水资源用于生态环境系统时, 水资源系统延缓社会经济和城市化发展速度的现象表现得很明显; 而当流域还剩不到 30% 的水资源用于生态环境系统时, 水资源系统对社会经济和城市化发展的阻滞作用极强, 水—生态—经济复合系统的自我恢复能力超过极限, 如果不寻求外界帮助, 复合系统及其各子系统就会开始崩溃。根据水资源对城市化约束强度的综合测度模型和原理, 用水资源约束强度值 (WRCI) 代替水资源开发利用潜力综合指数来测度水资源对城市化的约束强度并对其进行分级更为合理 (表 2)。例如, 如果两个流域都只剩下 30% 的水资源用于生态环境系统 (即水资源开发利用潜力综合指数都为 0.3), 则城市化已进入成熟和稳定发展阶段的流

表 2 水资源对城市化约束强度综合测度的分级标准

Tab. 2 Classification standard of water resources constraint intensity on urbanization measured by integrated indicator system

约束强度	WRCI	主要问题
弱约束	0~0.3	缺水对城市化进程影响很小, 城市化速度与质量基本上不受缺水影响
较强约束	0.3~0.5	缺水对城市化进程影响较大, 城市化速度与质量由于缺水而受到较大影响
强约束	0.5~0.7	缺水对城市化进程影响很大, 对城市化速度与质量产生了重大影响
极强约束	0.7~1	缺水对城市化进程影响非常之大, 对城市化速度与质量产生了极为重大的影响

域, 相对于城市化水平较低的流域来说, 由于抗拒水资源约束力的能力较强, 因此水资源约束强度相应较低。

## 4 结果与分析

采用 1985-2006 年甘肃省水资源公报、河西走廊 5 个地级市的水利年报、城市建设年报、统计年鉴和环境质量报告作为主要数据来源。同时, 鉴于资料的可得性和地域的完整性, 在分析时主要以地级市为基本研究单元, 并用金昌市、武威市反映东部石羊河流域的整体情况, 用张掖市反映中部黑河流域的整体情况, 用嘉峪关市、酒泉市反映西部疏勒河流域的整体情况<sup>[24]</sup>, 分析了 1985-2005 年河西走廊水资源对城市化约束强度的时空变化。

### 4.1 河西走廊水资源对城市化约束强度的主要影响因素分析

河西走廊水资源对城市化约束强度的主要影响因素可通过计算的熵化权重来加以判别。表 1 中列出了各层指标相对于上一层目标的权重值, 权重越大, 对上一层目标的影响也越大。而根据递阶赋权定律, 可进一步计算各具体指标相对于更上一层目标的熵化权重, 最终可分析各具体指标对水资源约束强度影响的大小。

(1) 从水资源系统健康状况的影响因素来看, 水资源开发利用潜力主要由水资源开发利用程度和水资源本底条件决定, 二者权重合计约占 89%。其中, 水资源开发率 (0.1699)、水资源利用率 (0.1452)、人均水资源量 (0.1447)、水资源总量折合地表径流深 (0.1397) 是最主要的影响因素, 在影响水资源开发利用潜力的 34 个具体指标中, 权重合

计约占60%。

(2) 从城市化系统发展状况的影响因素来看, 城市化系统综合发展水平主要由人口城市化和经济城市化决定, 二者权重合计约占83%。其中, 非农业人口比重(0.2214)、城镇人口比重(0.2214)、非农产业产值比重(0.1105)、工业化水平(0.1105)是最主要的影响因素, 在影响城市化系统综合发展水平的21个具体指标中, 权重合计约占66%。

(3) 从水资源对城市化约束强度的影响因素来看, 可认为施力者相对于受力者来说“非常重要”(重要程度为7), 水资源系统健康状况起决定作用(权重占87.5%), 城市化系统健康状况起缓解作用(权重占12.5%)。水资源对城市化约束强度主要由水资源开发利用程度(0.4153)、水资源本底条件(0.3616)、人口城市化(0.0593)等3个标准层决定, 在影响水资源对城市化约束强度的8个标准层中, 权重合计约占84%。而在所有55个具体指标中, 水资源开发率(0.1487)、水资源利用率(0.1271)、人均水资源量(0.1266)、水资源总量折合地表径流深(0.1222)、人均用水量(0.0728)、干旱指数(0.0552)、地下水资源开发利用(0.0545)、非农业人口比重(0.0277)、城镇人口比重(0.0277)、河川径流年内分配集中度(0.0242)、丰枯年地表水资源量比值(0.0242)等11个具体指标为主要影响因素, 权重合计约占81%; 其他具体指标的影响相对较小, 权重均在2%以下。

#### 4.2 河西走廊水资源与城市化系统发展状况的综合测度结果及分析

采用水资源对城市化约束强度的综合测度模型, 首先分别计算出河西走廊分地区和分流域水资源本底条件综合指数、水资源开发利用程度综合指数、水资源开发利用效率综合指数、水资源管理能力综合指数、人口城市化综合指数、经济城市化综合指数、社会城市化综合指数、空间城市化综合指数, 然后得到分地区和分流域水资源开发利用潜力综合指数和城市化系统综合发展指数(图2和图3)。

(1) 从水资源系统综合测度结果来看, 由于水资源本底条件不断变差、水资源开发利用程度不断提高, 虽然水资源开发利用效率和水资源管理能力有所提高, 但河西走廊各地区和各流域的水资源系统基本上都不断退化, 整个河西走廊的水资源开发利用潜力综合指数由1985年的0.5815降至2005年的0.5066, 有突破不适宜水平极限值0.5的趋势。其中, 东部的石羊河流域由0.3312降至0.2443(金昌市由0.4619降至0.3960, 武威市由0.2908降至0.1955), 中部的黑河流域(张掖市)由0.5943降至0.5178, 西部的疏勒河流域由0.7243降至0.6275(嘉峪关市由0.7604降至0.6492, 酒泉市由0.7100降至0.6193)。该结果说明, 目前河西走廊留给生态环境系统的用水大致为50%, 其中石羊河流域为24%(金昌市为40%, 武威市为20%), 黑河流域(张掖市)为52%, 疏勒河流域为63%(酒泉市为62%, 嘉峪关市为65%)。如果以国际通用的水资源开发利用40%为警戒线(即流域60%的水资源应留给生态环境系统), 则石羊河流域和黑河流域社会经济系统应逐步退水给生态环境系统, 而疏勒河流域社会经济用水量应基本稳定在当前水平, 这对于社会经济亟待发展的河西走廊来说, 虽然能够有效地保护好生态环境, 但实现难度较大。如果生态环境和社会经济用水以各占50%为宜, 则疏勒河流域水资源还可进行有限限制性的开发, 黑河流域社会经济用水量应基本稳定在当前水平, 而石羊河流域应通过外流域调水或社会经济系统逐步退水等方式将水资源开发利用潜力综合指数至少提高到0.5。

(2) 从城市化系统综合测度结果来看, 河西走廊城市化综合发展水平在空间分布上与人口、经济和社会城市化水平大体一致, 嘉峪关市最高, 金昌市次之, 酒泉市、武威市、张掖市随后。从流域尺度来看, 疏勒河流域城市化综合发展水平最高, 石羊河流域次之, 黑河流域最低, 但他们基本上都处于城市化加速发展阶段, 近年来城市化系统综合发展指数快速提高的趋势都比较明显(图2和图3)。河西走廊城市化综合发展水平由1985年的16%不断提高到目前的33%, 而且1999年后逐步进入快速发展阶段, 其中, 东部的石羊河流域由21%升至36%(金昌市由39%升至62%, 武威市由10%升至25%), 中部的黑

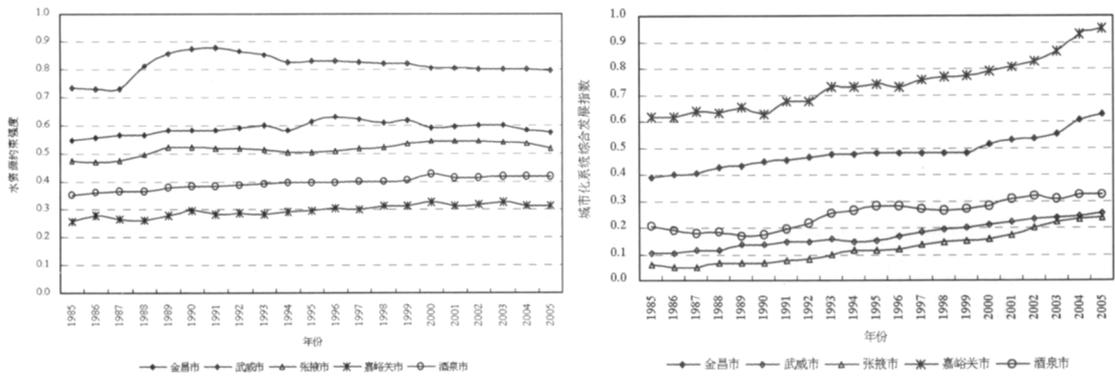


图2 河西走廊分地区水资源与城市化系统综合发展指数变化

Fig. 2 Variations on the integrated index of water resources system and urbanization system development in the Hexi Corridor by district

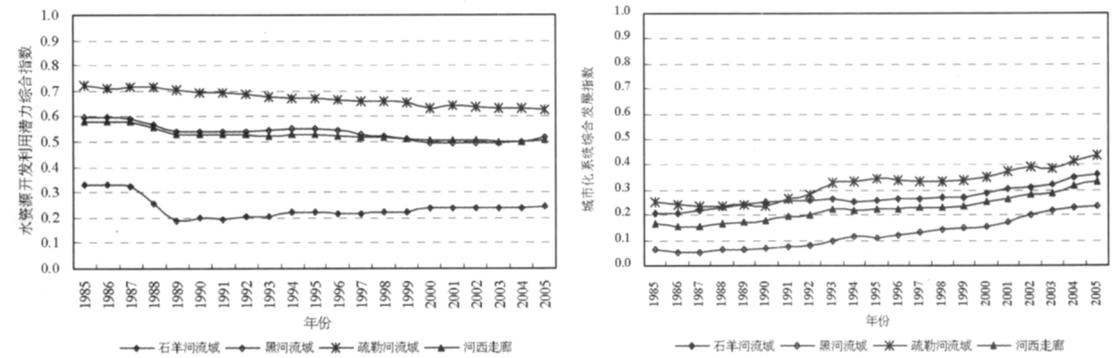


图3 河西走廊分流域水资源与城市化系统综合发展指数变化

Fig. 3 Variations on the integrated index of water resources system and urbanization system development in the Hexi Corridor by river basin

河流域(张掖市)由6%升至24%，西部的疏勒河流域由25%升至44%(嘉峪关市由62%升至95%，酒泉市由20%升至33%)。整个河西走廊人口城市化进程仍处于缓慢发展阶段，但经济城市化水平总体高于人口城市化水平，尤其在金昌市和酒泉市体现得更为明显；社会城市化水平总体滞后于人口城市化和经济城市化水平，但在空间分布上与人口城市化和经济城市化水平大体一致，说明社会生活方式由农村向城市形态的转变首先依赖于人口和经济城市化进程，而在时间分布上由1985年的0.0277上升到2005年的0.2791，说明河西走廊的社会生活方式在近20年发生了深刻的变化；空间城市化水平除了随城市规模(人口和面积)扩大而提高外，由于城市用地扩展受到绿洲承载力的较大限制，因此上升速度较慢。

(3) 从水资源系统与城市化系统综合测度结果来看，河西走廊水资源系统与城市化系统可划分为三种类型：一种为水资源开发利用潜力小且城市化水平低的城市(如武威市)，由于水资源开发利用已经超过极限，但又亟待继续提高城市化综合发展水平，因此水资源约束强度调控的难度最大；另一种为水资源开发利用潜力较大且城市化水平较高的城市，如嘉峪关市，水资源约束强度调控的难度最小；第三种为水资源开发利用潜力小但城市化水平较高的城市(如金昌市)，或水资源开发利用潜力较大但城市化水平仍较低的城市(如酒泉市、张掖市)，水资源约束强度的调控难度介于中间，具体难度大小需要进一步通过水资源约束强度计算获得。从流域尺度来看，近20年黑河流域、疏勒河流域水

资源与城市化系统变化过程及类型大致与整个河西走廊相似，水资源开发利用潜力综合指数逐渐向不适宜水平的极限值 0.5 下降，而城市化发展阶段由较低水平逐渐进入快速发展阶段（城市化系统综合发展指数 > 0.3），水资源系统退化与城市化发展之间的矛盾逐渐增大；而石羊河流域虽然城市化发展阶段也由较低水平逐渐进入快速发展阶段，但水资源开发利用潜力综合指数一直小于合理极限值，水资源过度开发利用与城市化亟需发展形成了更为尖锐的矛盾。

### 4.3 河西走廊水资源对市化约束强度的综合测度结果及分析

根据水资源开发利用潜力综合指数与城市化系统综合发展指数，可进一步分别求出河西走廊分地区与分流域 1985-2005 年水资源对城市化的约束强度，并按照标准对其进行分级(图 4 和图 5)。

(1) 河西走廊水资源对城市化的约束强度在空间分布上表现为：东部的石羊河流域较大，多年平均值高达 0.7585，基本上一直属于极强约束类型，其中武威市多年平均值为 0.8145，一直属于极强约束类型，金昌市多年平均值为 0.5899，一直属于强约束类型；中部的黑河流域（张掖市）次之，多年平均值为 0.5154，而且基本保持在临界值 0.5 左右，属于较强约束向强约束过渡类型；西部的疏勒河流域较小，多年平均值为 0.3732，一直属于较强约束类型，其中酒泉市多年平均值为 0.3937，一直属于较强约束类型，嘉峪关市多年平均值为 0.2958，而且基本保持在临界值 0.3 左右，属于弱约束向较强约束过渡类型。从 2005 年水资源对城市化约束强度大小来看，在河西走廊各流域当中，其调控难度大小为：石羊河流域 (0.7412) > 黑河流域 (0.5174) > 疏勒河流域 (0.3962)；在河西走廊各地级市当中，其调控难度大小为：武威市 (0.7973) > 金昌市 (0.5754) > 张掖市 (0.5174) > 酒泉市 (0.4174) > 嘉峪关市 (0.3132)，这一结果与其他年份基本一致。

(2) 从时间分布上来看，整个河西走廊水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.4707，属于较强约束类型，到 1989 年增至 0.5135，跨过临界值 0.5 变为强约束类型，之后缓慢增加到 2000 年的 0.5270，近年来略有下降，到 2005 年变为 0.5154，仍为强约束类型。其中，武威市水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.7327，1991 年前增加较快，超过了极强约束类型分级区间的中点值 0.85，此后逐渐下降，2000 年以来基本保持在 0.8 左右，如果长此以往，则水—生态—经济—城市化系统的恶性循环难以破除，可持续发展将面临严峻挑战；金昌市水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.5470，在 1996 年以前不断

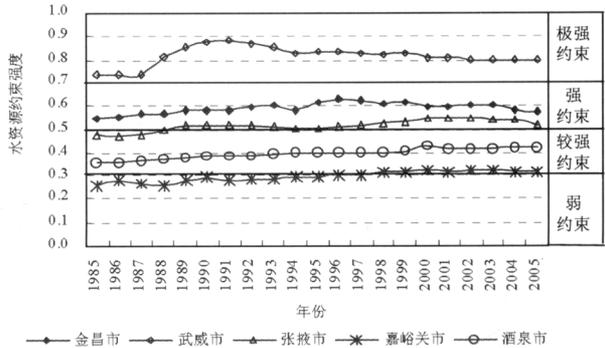


图 4 河西走廊地区水资源对城市化约束强度及类型变化  
Fig. 4 Variations on the water resources constraint intensity on urbanization and its types in the Hexi Corridor by district

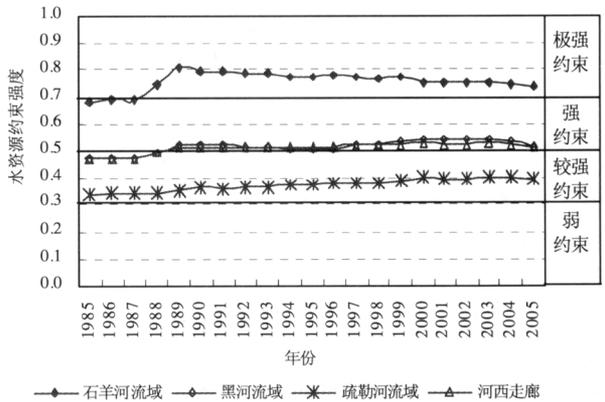


图 5 河西走廊分流域水资源对城市化约束强度及类型变化  
Fig. 5 Variations on the water resources constraint intensity on urbanization and its types in the Hexi Corridor by river basin

增加至 0.6295, 但 1996 年后尤其是 2000 年以来, 金昌市由于调水工程的实施、城市化综合发展水平、水资源管理水平以及水资源利用效率的提高等, 水资源约束强度得到了一定程度的缓解, 到 2005 年变为 0.5754, 但仍为强约束类型; 张掖市水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.4724, 此后大体经历了两次先升后降的过程, 到 2000 年升至 0.5456, 由于 2000 年来水资源问题逐渐得到重视以及 2002 年全国开始试行第一个建设节水型社会试点, 使水资源约束强度得到了一定程度的缓解, 到 2005 年变为 0.5154; 酒泉市水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.3534, 多年来基本呈直线上升趋势, 但 2000 年来略有缓解, 由 2000 年的 0.4256 降至 2005 年的 0.4174, 仍超过了较强约束类型分级区间的中点值 0.4; 嘉峪关市水资源对城市化的约束强度 1985 年为 0.2577, 此后不断上升, 1996 年以后基本上都是略微超过了弱约束的临界值 0.3, 而 2003 年来略有下降, 到 2005 年变为 0.3132。

从流域尺度来看, 石羊河流域水资源对城市化的约束强度由 1985 年的 0.6844 上升到 1989 年的 0.8069, 此后不断下降, 到 2005 年降为 0.7412; 黑河流域水资源对城市化的约束强度 1999 年以前变化幅度与整个河西走廊大体一致, 而 1999 年以后升降较快; 疏勒河流域水资源对城市化的约束强度 2000 年以前增加趋势明显, 2000 以后略有下降, 但基本保持在 0.4 左右。

(3) 河西走廊水资源对城市化约束强度的综合测度结果, 与采用相关系数法<sup>[18]</sup>和水资源管理阶段对应法<sup>[19]</sup>分析得出的结论基本一致, 而且综合测度结果不仅考虑了用水总量和人口城市化水平, 还全面考虑了水资源系统与城市化系统的总量、结构、质量和效率等各种因子, 测度结果更为精确。此外, 水资源对城市化约束强度的综合测度法能够定量分析水资源与城市化系统发展状况的空间格局和变化过程, 在时空变化分析上更具先进性。

## 5 结论与讨论

(1) 河西走廊水资源对城市化的约束强度在空间上总体表现为自东向西逐渐减小。其中, 东部的武威市一直属于极强约束类型, 金昌市一直属于强约束类型; 中部的张掖市属于较强约束向强约束过渡类型; 西部的酒泉市一直属于较强约束类型, 嘉峪关市属于弱约束向较强约束过渡类型。

(2) 近 20 年来, 河西走廊水资源系统逐渐退化到不适宜水平, 城市化逐渐进入快速发展阶段, 水资源对城市化的约束强度由较强约束类型变为强约束类型, 总体呈不断增加态势, 但近年来略有缓解。

(3) 河西走廊水资源开发利用潜力小而城市化和社会经济发展水平低等客观矛盾的存在, 对未来减轻水资源约束强度并加快城市化进程提出了巨大挑战, 但河西走廊大部分地区水资源对城市化的约束强度仍属于较强或强约束类型, 如果始终以可持续发展为目标, 尽快调整水资源开发利用方式、社会经济增长方式和城市化发展模式, 对水资源约束力进行合理调控, 仍然能够实现可持续发展。

需要进一步指出的是, 虽然水资源对城市化约束强度的综合指标测度分析在河西走廊得到了较为成功的应用, 但由于模型涉及到的指标较多, 在研究基础较差的地区可能会由于资料积累不够而较难测度。因此, 下一步除了要将该方法在其他地区进一步验证和普及外, 还应探索其他模型或方法对水资源约束强度进行度量, 为西北干旱区选择合理的城市化发展模式来调控水资源约束强度提供更为精确的科学依据。

## 参考文献 (References)

- [1] Qiu Baoxing. Main lessons concerning urbanization from foreign countries. *City Planning Review*, 2004, 28(4): 8-12. [仇保兴. 国外城市化的主要教训. 城市规划, 2004, 28(4): 8-12].
- [2] Liu Yaobin, Li Rendong, Song Xuefeng. Grey associative analysis of regional urbanization and eco-environment coupling in China. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(2): 237-247. [刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国区域城市化与生态环境耦合的关联分析. 地理学报, 2005, 60(2): 237-247.]
- [3] Chenery. *Patterns of Development: 1950-1970*. Beijing: Economic Science Press, 1988. [钱纳里. 发展的型式: 1950-1970. 北京: 经济科学出版社, 1988.]
- [4] Zhou Yixing. *Urban Geography*. Shanghai: The Commercial Press, 1995. [周一星. 城市地理学. 上海: 商务印书馆, 1995.]
- [5] Lu Dadao, Ye Danian, Yao Shimou et al. Restrain the rash advance of urbanization and the wild spatial expansion by integrated measures. *Science News*, 2007, (8): 4-9. [陆大道, 叶大年, 姚士谋等. 采取综合措施遏制冒进式城镇化和空间失控趋势. 科学新闻, 2007, (8): 4-9.]
- [6] Fitzhugh T W, Richter B D. Quenching urban thirst: Growing cities and their impacts on freshwater ecosystems. *Bioscience*, 2004, 54: 741-754.
- [7] Jenerette G Darrel, Larsen Larissa. A global perspective on changing sustainable urban water supplies. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(3/4): 202-211.
- [8] Merrett S. *Introduction to the Economics of Water Resources: An International Perspective*. UCL Press, 1997.
- [9] Gao Yunfu. Urbanization and evolvement of water system. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 1998, (3): 5-8. [高云福. 城市化发展与水系统的演变. 城市勘测, 1998, (3): 5-8.]
- [10] Jia Shaofeng, Zhang Shifeng, Yang Hong et al. Relation of industrial water use and economic development: Water use Kuznets Curve. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(3): 279-284. [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. 自然资源学报, 2004, 19(3): 279-284.]
- [11] Bernardo D J et al. Economic and environmental impacts of water quality protection policies 1: Framework for regional analysis. *Water Resources Research*, 1993, 29(9): 3069.
- [12] Atef Al-Kharabshah, Rakad Ta'any. Influence of urbanization on water quality deterioration during drought periods at South Jordan. *Journal of Arid Environments*, 2003, 53(4): 619-630.
- [13] Fang Chuanglin, Huang Jinchuan, Bu Weina. Theoretical study on urbanization process and ecological effect with the restriction of water resource in arid area of Northwest China. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 1-7. [方创琳, 黄金川, 步伟娜. 西北干旱区水资源约束下城市化过程及生态效应研究的理论探讨. 干旱区地理, 2004, 27(1): 1-7.]
- [14] Wang Hao, Wang Dangxian, Ni Hongzhen et al. Water demand for development of industry in China. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, (4): 109-113. [王浩, 汪党献, 倪红珍等. 中国工业发展对水资源的需求. 水利学报, 2004, (4): 109-113.]
- [15] Song Jianjun, Zhang Qingjie, Liu Yingqiu. Analysis and suggestions on water resources security in 2020 in China. *China Water Resources*, 2004, (9): 14-17. [宋建军, 张庆杰, 刘颖秋. 2020年我国水资源保障程度分析及对策建议. 中国水利, 2004, (9): 14-17.]
- [16] Bao Chao, Fang Chuanglin. On concept, significance and strategic framework for water resources constraint force. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 844-852. [鲍超, 方创琳. 水资源约束力的内涵、研究意义及战略框架. 自然资源学报, 2006, 21(5): 844-852.]
- [17] Bao Chao, Fang Chuanglin. Quantitative research of water resources constraint on urbanization in arid area of northwest China: Taking Wuwei and Zhangye cities in Gansu province as a case. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(4): 704-710. [鲍超, 方创琳. 西北干旱区水资源约束城市化进程的定量辨识: 以甘肃省武威、张掖市为例. 中国沙漠, 2007, 27(4): 704-710.]
- [18] Bao Chao, Fang Chuanglin. Water resources constraint force on urbanization in water deficient regions: A case study of the Hexi Corridor, arid area of NW China. *Ecological Economics*, 2007, 62(3/4): 508-517.
- [19] Fang Chuanglin, Bao Chao, Huang Jinchuan. Management implications to water resources constraint force on socio-economic system in rapid urbanization: A case study of the Hexi Corridor, NW China. *Water Resources Management*, 2007, 21(9): 1613-1633.
- [20] Fang Chuanglin, Zhang Xiaolei. The development orientation and the industrial division of the node cities along western Long Hai-Lan Xin Economic Zone. *Geographical Research*, 2003, 22(4): 455-464. [方创琳, 张小雷. 西陇海兰新经济带节点城市的发展方向与产业分工. 地理研究, 2003, 22(4): 455-464.]
- [21] Fang Chuanglin, Bu Weina. Strategic transformation of synthetic development of the ecological-economic corridor in West China. *Arid Land Geography*, 2004, 27(4): 455-464. [方创琳, 步伟娜. 中国西部生态经济走廊综合开发的战略转变. 干旱区地理, 2004, 27(4): 455-464.]
- [22] Li Shiming, Cheng Guodong et al. *Rational Water Resources Utilization and Eco-environmental Protection in Hexi Corridor*. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2002. [李世明, 程国栋等. 河西走廊水资源合理利用与生态环境保护. 郑州: 黄河水利出版社, 2002.]
- [23] Ma Jinzhu, Zhu Zhonghua, Yu Baojing. *Water Environment Evolvement and Water Resources Sustainable Utilization*

in the Shiyang River Basin. Lanzhou: Lanzhou University Press, 2005. [马金珠, 朱中华, 于保静. 石羊河流域水环境演化与水资源可持续利用. 兰州: 兰州大学出版社, 2005.]

- [24] Bao Chao, Fang Chuanglin. Study on the quantitative relationship between urbanization and water resources utilization in the Hexi Corridor. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(2): 301-310. [鲍超, 方创琳. 河西走廊城市化与水资源利用关系的量化研究. *自然资源学报*, 2006, 21(2): 301-310.]
- [25] Xu Jianhua. *Mathematic Methods in Modern Geography*. 2nd edn. Beijing: Higher Education Press, 2002. [徐建华. 现代地理学中的数学方法. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2002.]
- [26] Fang Chuanglin, Mao Hanying. A system of indicators for regional development planning. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(5): 410-419. [方创琳, 毛汉英. 区域发展规划指标体系建立方法探讨. *地理学报*, 1999, 54(5): 410-419.]
- [27] Fang Chuanglin, Yehua Dennis Wei. Evaluation on the sustainable development capacity and regularity of its regional differentiation in Hexi region. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56(5): 561-569. [方创琳, Yehua Dennis Wei. 河西地区可持续发展能力评价及地域分异规律. *地理学报*, 2001, 56(5): 561-569.]
- [28] Qian Zhengying, Shen Guofang, Pan Jiasheng. *Water Resources Allocation, Eco-environment Construction and Sustainable Development Strategies (Synthetical Volume)*. Beijing: Science Press, 2004. [钱正英, 沈国防, 潘家铮. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究(综合卷). 北京: 科学出版社, 2004.]

## Temporal and Spatial Variations of Water Resources Constraint Intensity on Urbanization in Arid Area

BAO Chao, FANG Chuanglin

(*Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*)

**Abstract:** Water resources constraint force on urbanization has become one of the important exogenic forces which exert great influence on the speed of urbanization process and socio-economic development in arid and water deficient regions. It is of great significance to the measurement and probing into its temporal and spatial variations, thus promoting water resources sustainable utilization and accelerating the urbanization process. By qualitative and quantitative methods, an integrated indicator system was constructed, and an AHP model reformed by entropy technology was established to measure the water resources constraint intensity on urbanization. Using this model, the temporal and spatial variations of water resources constraint intensity on urbanization in the Hexi Corridor from 1985 to 2005 were calculated. Results show that: (1) Water resources constraint intensity on urbanization decreased from east to west in the Hexi Corridor. Of the five prefecture-level cities, Wuwei belongs to the very strong constraint type, Jinchang belongs to the strong constraint type, Zhangye belongs to the less strong constraint type to the strong constraint type, Jiuquan belongs to the less strong constraint type, and Jiayuguan belongs to the weak constraint type to the less strong constraint type. (2) Water resources constraint intensity on urbanization has changed into the strong constraint type from the less strong constraint type in recent 20 years. It increased continuously on the whole. However, in recent years, it decreased appreciably. (3) The integrated indexes of water resources system and urbanization system in the Hexi Corridor are both comparatively small. Inconsistencies between water shortage and regional development are serious. It is a great challenge to lessen water resources constraint intensity and accelerate the urbanization process. However, most parts in the Hexi Corridor belong to the less strong or strong constraint type. Through rational regulation of water resources constraint intensity on urbanization, the Hexi Corridor can still realize sustainable development.

**Key words:** urbanization; water resources constraint force; water resources constraint intensity; temporal and spatial changes, Hexi Corridor