石羊河流域水资源对武威市经济发展模式的影响

金淑婷[1]，李 博[1]，杨永春[1,2]，石培基[3]，王梅梅[1]，宋美娜[1]

（1.兰州大学 资源环境学院，甘肃 兰州 730000；2.兰州大学 西部环境教育部重点实验室，甘肃 兰州 730000；3.西北师范大学 地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：[目的] 通过分析甘肃省武威市水资源消费量与产业结构之间的关系，为制定干旱区城市发展策略提供参考。[方法] 利用 IPAT 模型的演化方程(IGT 方程)以及优化建模软件 LINGO 10.0。[结果] 在 1998—2004 年无约束的水资源供给条件下，武威市经济增长严重依赖于水资源消费量。2005 年开始实施限水措施后，其经济增长对水源消耗依赖程度开始大幅下降，2008 年以后处于一种较为稳定的下降状态。通过水资源利用情景模拟，得出最有利于减缓水资源消费量的途径。武威市 2015 年的水资源消费量为 1.67×10^9 m^3，地区生产总值为 4.40×10^{10} 元。[结论] 在加速经济增长，合理调整产业结构，加强节水的弱控水条件下，最有利于实现武威市经济与水资源消费稳步发展。

关键词：IPAT 模型；水资源消费量；发展情景；武威市

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2015)03-0283-05 **中图分类号**：F299.27

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.03.058

Impact of Shiyang River Water Resource on Economic Developing Model of Wuwei City

JIN Shuting[1], LI Bo[1], YANG Yongchun[1,2], SHI Peiji[3], WANG Meimei[1], SONG Meina[1]

(1. *College of Resource and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 2. *Key Laboratory of Western China's Environment Systems of the Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu* 730000, *China*; 3. *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: [Objective] To analyze the relation between water resource consumption and industrial structure quantitatively in Wuwei City, Gansu Province in order to provide references for making development policies for cities in arid areas. [Methods] The IGT model deduced by IPAT and optimized modeling software LINGO 10.0 were used. [Results] The economic growth of Wuwei City depended heavily on water consumption under the condition of unrestraint water supply during 1998—2004. After the water restriction policy came into force, the degree of economic growth dependence on water consumption began to fell sharply in 2005 and was in a state of relatively steady decline after 2008. Meanwhile, the best model for reducing the demand of water consumption by setting scenarios was found. The water consumption in 2015 was 1.67×10^9 m^3 and the GDP was 4.40×10^{10} yuan. [Conclusion] Under the condition of accelerating economic growth, adjusting the industrial structure reasonably and strengthening the weak water control of water saving, it would be best for Wuwei City to achieve economic and water consumption steady development.

Keywords: **IPAT model; water consumption; developing scenario; Wuwei City**

水资源是人类社会生存和发展的基本条件[1-2]，然而近年来，武威市由于人口不断增加、城市不断扩张、土地沙漠化加剧等原因，使得水资源供需矛盾更加突出，尤其城市用水表现最为突出，为了避免此矛盾继续加深，合理控水措施对武威市来说尤为重要。目前，不同学者在对干旱区水资源与生态环境以及社会系统之间相互关系与相互机理研究的基础上，开始尝试运用各种方法来模拟水资源开发利用对生态环境以及社会系统的影响过程，并对不同水资源开发利用模式下的社会系统变化趋势进行了情景预测[3]，以期为干旱区水资源可持续开发利用与社会发展提供最优化方案和科学决策依据[4-7]。本研究在现有的研

收稿日期：2014-04-12 修回日期：2014-05-12

资助项目：国家自然科学基金项目“内陆河流域城镇体系与流域空间结构相互作用的生态经济效应研究：以石羊河流域为例”(40971078)；国家自然科学基金项目(41171143)，(41271133)，(LZUJDKY-2013-m02)；中央高校基本科研业务专项资金(lzujbky-2015-216)

第一作者：金淑婷(1987—)，女(汉族)，陕西省武功县人，博士研究生，主要从事城市与区域发展方面的研究。E-mail:jst_1003@163.com。

通信作者：杨永春(1969—)，男(汉族)，陕西省白水县人，博士，教授，博士生导师，主要从事城市与区域发展、转型与规划研究。E-mail:yangych@lzu.edu.cn。

究基础上，利用 IPAT 模型的演化方程 IGT 方程及优化建模软件 LINGO 10.0 定量分析不同控水条件下水资源消费量与产业结构之间的关系，并通过水资源利用情景模拟探究最有利于减缓水资源消费量的途径，对今后干旱区城市制定发展策略具有一定的指导意义。

1 研究方法

1.1 IPAT 模型的演化

IGT 方程是由 Ehrlich 等人提出的 IPAT 方程[8-9]演变过来的，其中 IGT 的演化过程为：

$$I=P\times A\times T=P\times\frac{G}{P}\times\frac{I}{G}=G\times T \tag{1}$$

通过式(1)简单的推导过程可以发现：如果把水资源消费量看作是环境压力(I)的话，表面上与人口(P)、富裕度(A)、技术(T)有关，实际上则可看作与 GDP 产出和技术水平有关。

随着经济和社会的发展，区域 GDP 是持续增长的，故 GDP 的增长是促进水资源消费的正向因素；随着科技水平的提高，单位产值的水资源消费是减少的，故技术条件是促进水资源消费的负向因素，水资源消费的增减要看这两大因素的消长。

1.2 基于 IGT 模型的环境压力与经济发展分析

根据现有的产业划分体系，将 GDP 分解到不同产业中，将 T 也分解到不同产业单位产值耗水量中，则：

$$G_j=\sum_{i=1}^{3}G_{ij}=\sum_{i=1}^{3}G_{i0}(1+g_i)^n \tag{2}$$

$$T_j=\sum_{i=1}^{3}T_{ij}=\sum_{i=1}^{3}T_{i0}(1-t_i)^n \tag{3}$$

式中：G_{i0}，G_{ij}——基期年和第 j 年产业 i 的产值；T_{i0}，T_{ij}——基期年和第 j 年 i 产业单位产值的万元耗水量；g_i——i 产业 GDP 年均增长率；t_i——i 产业单位产值耗水下降率；n——年数。

将式(2)和式(3)带入式(1)可得：

$$\begin{aligned}I_j&=G_j\times T_j=\sum_{i=1}^{3}G_{ij}\times T_{ij}\\&=\sum_{i=1}^{3}G_{i0}(1+g_i)^n\times T_{i0}(1-t_i)^n\end{aligned} \tag{4}$$

假设 $g_i^*=g_i/(1+g_i)$，式(4)可转化为：

$$I_j=\sum_{i=1}^{3}G_{i0}T_{i0}\left(\frac{1-t_i}{1-g_i^*}\right)^n \tag{5}$$

通过式(5)可以得到第 j 年的环境载荷即第 j 年的水资源消耗总量。t_i——技术发展对环境积极作用的方面；g_i^*——经济发展对环境的负影响方面。如果 $t_i>g_i^*$，表示第 j 年的环境载荷减小即水资源消耗总量减小，技术发展对水资源消费量的积极影响较经济发展对水资源消费量的负影响增长速度快；相反，如果 $t_i<g_i^*$，表示第 j 年的环境载荷增加即水资源消耗总量增加，经济增长的负面影响大于技术进步的积极影响。

1.3 水资源消费下的经济与生态分析

对武威市 1998—2010 年万元 GDP 用水下降率(t)与经济增长率(g^*)统计分析(图 1)可以看出，1998—2004 年武威市用水供给基本上处于一种无约束状态的自然变动，其万元 GDP 用水下降率(t)与经济增长率(g^*)曲线处于一种相伴重合状态，说明石羊河向武威市的供水基本上维持在一个较高的水平。在生态环境中经济增长的负影响明显大于科技进步所带来的积极影响，这在一定程度上消耗了石羊河流域生态用水，导致石羊河流域生态环境不断恶化，尤其是下游民勤县土地沙化严重。2005 年曲线 t 和 g^* 的位置开始发生显著的变化，这与同时期甘肃省实施的石羊河重点治理工程限水措施有关。2005 年为限水第一年，其实施潜力大，故 g^* 曲线与 t 曲线之间的距离比较大，随后虽然限水措施依然实施，但产业结构的限制使得武威市万元用水量很难出现如 2005 年那样大幅度下降的现象，经过 2006，2007 年限水措施的实施，使得武威市产业发展开始适应水资源的调整，随着经济结构的调整和后期限水措施的不断实施，2008—2010 年曲线 t 与 g^* 处于稳定状态，一般认为是一种可接受的发展模式。

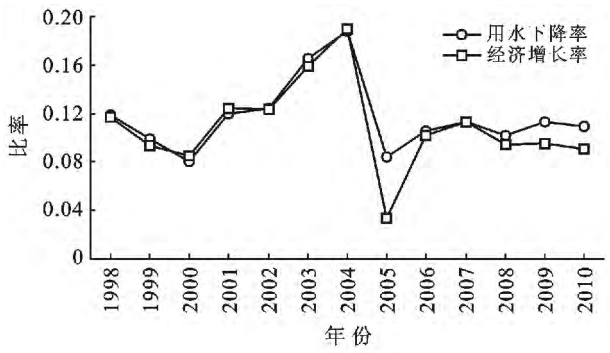


图 1 武威市 1998－2010 年万元 GDP 用水下降率(t)与经济增长率(g^*)

2 实证分析

2.1 数据来源

除特别说明外，数据均来源于武威市统计年鉴(2001—2011)，武威六十年(1949—2009)，石羊河流域水资源公报(2001—2010)，武威市“十一五”规划资料，以及实地调查资料。

2.2 研究区概况

武威市地处甘肃省河西走廊东段，位于北纬 36°29′—39°27′，东经 101°49′—104°43′，南依祁连山，

北靠内蒙古,东南与兰州市、白银市接壤,西北和金昌、张掖毗邻。海拔 1 367～3 045 m,地处黄土、蒙新、青藏三大高原交汇地带,地形复杂,南高北低。境内有灌溉绿洲、荒漠、高山草地、祁连山天然水源涵养林带及沙漠、浅山地带,形成山地—绿洲—沙漠相互联系、彼此制约的景观生态系统。地处石羊河中游的武威属区国土面积为 2.90×10^4 km^2,多年平均自产水资源总量为 1.11×10^9 m^3,人均占有水资源量不足 600 m^3,是全省水平的 1/2 和全国的 1/3,耕地占有水资源量 3 300 m^3/hm^2,仅为全省水平的 1/3 和全国水平的1/9。现状用水量接近水资源量的 2 倍,可供水量与需水量相差 9.6×10^8 m^3,可供水量仅占需水量的 62%,武威市是石羊河流域经济、政治、社会发展的重点区域,人口占 78.4%,灌溉面积占 70%,GDP 占 61%,粮食总产量占 80%,是河西地区人口最集中、水资源使用程度最高、供需矛盾最突出的地区。

2.3　社会发展与水资源利用情景设定

分析武威市未来的经济发展和技术进步情况,在此基础上对武威市未来产业结构进行分析,具体分析各影响因素的发展情景。

2.3.1　**经济增长情景**　对武威市可能出现的经济增长情景做出 3 种预测(表 1)。考虑到武威市经济发展严重依赖水资源和国家政策的影响,根据中国发达地区的经济发展经验,将武威市经济增长的速度以基准情景(参考武威市 1980—2010 年地区生产总值年均增长率、武威市“十一五”规划、以及利用 SPSS 16.0 进行线性拟合对未来经济进行预测来设置)为参考,调整上下 1%作为武威市经济高增长情景与低增长情景。

表 1　未来 5 年武威市经济增长率预测

情 景	经济增长率/%		
	第一产业	第二产业	第三产业
基准情景	9.12	14.72	10.92
低增长情景	8.12	13.72	9.92
高增长情景	10.12	15.72	11.92

2.3.2　**技术进步情景**　结合甘肃省 2007 年《石羊河流域重点治理规划》来确定技术进步情景,其中低方案采用无约束的水资源利用,即水资源消费保持现状变动情景;中方案采用宽松水资源利用情景,即到 2015 年,武威市水资源消费总量与 2010 年相比下降 10%;高方案采用强水资源消费控制约束情景及过强水资源消费控制约束情景,即到 2015 年水资源消费量与 2010 年相比下降 20%及 30%。

2.3.3　**产业结构情景**　合理的产业结构对区域经济的增长起到促进作用,由于武威市产业结构存在不合理性,第一产业比重明显高于平均水平,而恰恰第一产业属于高耗水产业,因此对武威市的经济结构进行调整有利于降低其水资源的压力。通过对武威市第二产业与第三产业 2000 年到 2010 年间增长速度统计分析发现,两者的平均年增长为 14.7%和 15.9%,相差不大,为了便于研究,假设第二产业和第三产业成同比例速度增长。

根据上述分析,结合武威市目前产业结构与水资源利用状况,对武威市未来可能的发展模式设置 10 种情景(表 2)。

利用上文对产业结构的分析,在前面技术进步与经济增长的情景下,依据公式(6)的约束条件,利用优化建模软件 LINGO 10.0,获得期望的产业变动(表 3)。根据公式(5)有:

$$\begin{cases} I \geqslant GR_1aT_1+GR_2bT_2+GR_3bT_3 \\ R_1a+R_2b+R_3b=1 \end{cases} \tag{6}$$

且 R_1,R_2,R_3,a,b 均为非负数。

式中:I——2015 年水资源消费总量(m^3);G——2015 年 GDP 总量(元);$R_i(i=1,2,3)$——i 产业按照现有增长速度到 2015 年所占 GDP 的比重;$T_i(i=1,2,3)$——i 产业到 2015 年单位产值耗水量(m^3/万元);a,b——不同情景中产业变动幅度。

2.4　不同情景的比较分析

通过表 3 及公式(6)得到表 4,结合表 2—4 可以看出,在不同情景约束条件下,武威市的产业结构发生不同的变化。在不采取水资源控水措施条件下,按照当前的经济发展和水资源利用效益的变动速度,武威市 2015 年的水资源消费总量(1.88×10^9 m^3)将与 2010 年水资源消费总量(1.85×10^9 m^3)基本持平;随着武威市经济发展的不断加快(情景 2),水资源消费总量将会出现快速增长的趋势,相对于基准情景而言,水资源消费总量将增加 1.05×10^8 m^3,这使得本已经陷入水资源紧张的武威市不得不面临很大的水资源压力。但如果此时武威市对水资源的利用分别采取弱控水措施(情景 3,4,5)和强控水措施(情景 6,7,8,9)及过强控水措施(情景 10),则有利于缓解武威市水资源的压力,与基准情景相比,2015 年武威市水资源消费总量将分别减少 2.06×10^8,3.91×10^8 m^3,4.88×10^8 m^3。

综上所述,10 种不同情景模拟显示,武威市通过产业结构调整和控水措施的实施,不同程度地缓解了武威市当前所面临的水资源环境压力。从表 3 可以看出,情景 10 水资源减少量最大,情景 1 最小,但情景 10 是否适用于武威市来减少水资源消费量还有待于进一步探讨。

表 2 武威市未来 5 a 水资源利用与经济发展情景描述

情景	情景描述	产业结构(2015 年)
1	经济增长保持现状发展趋势;单位产值耗水保持现状变动趋势;产业结构保持现状变动趋势	21.62∶40.26∶38.12
2	经济保持高速增长趋势;单位产值耗水保持现状变动趋势;产业结构保持现状变动趋势。	21.67∶40.24∶38.09
3	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 10%;经济增长保持现状发展趋势;单位产值耗水保持现状变动趋势;产业结构得到优化调整(第一产业比重下降,第二产业与第三产业同比例变动增长)	18.77∶41.73∶39.51
4	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 10%;经济保持高增长趋势;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 1%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化	18.85∶41.79∶39.56
5	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 10%;经济保持低增长趋势;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 1%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化	21.29∶40.43∶38.28
6	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 20%;经济增长保持现状发展趋势;单位产值耗水保持现状变动趋势;产业结构得到优化调整	16.20∶43.04∶40.76
7	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 20%;经济增长保持现状发展趋势;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 1%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化调整	17.18∶42.54∶40.28
8	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 20%;经济保持高速增长;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 2%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化调整。	18.06∶42.08∶39.86
9	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 20%;经济保持低速增长;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 2%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化调整。	20.78∶40.69∶38.53
10	到 2015 年,武威市水资源消费总量比 2010 年下降 30%;经济保持高速增长;第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 3%,二、三产业单位产值耗水保持现有变动趋势;产业结构得到优化调整。	18.31∶41.94∶39.74

表 3 武威市不同水资源消费控制与经济发展情景下产业结构产业结构系数的拟合

情景	G/	GDP 比重			I/	单位产值耗水量(m^3/万元)			a	b
	10^{10} 元	R_1	R_2	R_3	10^9 m^3	T_1	T_2	T_3		
1	4.18	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.88	1 802.36	75.86	75.12	0.000 0	0.000 0
2	4.40	0.216 7	0.402 4	0.380 9	1.98	1 802.36	75.86	75.12	0.000 0	0.000 0
3	4.18	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.67	1 802.36	75.86	75.12	0.868 0	1.036 5
4	4.40	0.216 7	0.402 4	0.380 9	1.67	1 703.52	75.86	75.12	0.869 7	1.038 5
5	3.96	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.67	1 703.52	75.86	75.12	0.984 6	1.004 2
6	4.18	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.48	1 802.36	75.86	75.12	0.749 1	1.069 2
7	4.18	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.48	1 703.52	75.86	75.12	0.794 5	1.056 7
8	4.40	0.215 7	0.402 7	0.381 6	1.48	1 517.82	75.86	75.12	0.837 5	1.045 0
9	3.96	0.216 2	0.402 6	0.381 2	1.48	1 517.82	75.86	75.12	0.961 0	1.010 7
10	4.40	0.215 7	0.402 7	0.381 6	1.39	1 384.11	75.86	75.12	0.849 0	1.041 5

注:$R_i(i=1,2,3)$表示 i 产业按照现有增长速度到 2015 年所占 GDP 的比重;$T_i(i=1,2,3)$表示 i 产业到 2015 年单位产值耕水量;G 表示 2015 年 GDP 总量;I 表示 2015 年水资源消费总量。

2.5 不同情景可实施性比较

对于每种情景的可实施性,从经济增长、产业结构、农业用水效率和水资源消费总量 4 个方面进行评价,其中,经济增长速度越快越好,产业结构调整力度越接近自然变动规律越好,农业单位产值耗水越接近自然变动水平越好,水资源消费总量越小越好。其中产业结构变动的具体计算公式如下:

$$m=\sum_{i=1}^{n}\frac{|x_{ij}-x_{io}|}{x_{io}} \tag{7}$$

式中:m——产业结构综合变动系数;x_{io}——第 i 产业自然条件下产业规模比重;x_{ij}——第 i 产业在第 j 种模拟情境中的产业规模比重。

为了使数据具有可比性,需要对数据进行标准化处理,本研究将采用极差法对原始数据进行处理,具体公式如下:

$$\begin{cases} X_{ij}'=\dfrac{X_{ij}-\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} & (\text{正功效}) \\ X_{ij}=\dfrac{\max(X_{ij})-X_{ij}}{\max(X_{ij})-\min(X_{ij})} & (\text{负功效}) \end{cases} \tag{8}$$

$(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$

式中:X_{ij}'——指标的标准化值;X_{ij}——第 i 项指标的第 j 项观测值;$\min(X_{ij})$——第 i 项指标的第 j 项

观测值中的最小值；$\max(X_{ij})$——第 i 项指标的第 j 项观测值中的最大值，这样处理后的数据范围在[0,1]之间。

表 4　武威市不同水资源消费情景的比较

情景	产业结构综合变动系数	耗水总量/10^9 m^3	农业单位产值耗水量(m^3/万元)	地区生产总值/10^{10}元
1	0.000 0	1.88	1 802.36	4.18
2	0.003 6	1.98	1 802.36	4.40
3	0.205 0	1.67	1 802.36	4.18
4	0.204 0	1.67	1 703.52	4.40
5	0.023 8	1.67	1 703.52	3.96
6	0.389 3	1.48	1 802.36	4.18
7	0.318 9	1.48	1 703.52	4.18
8	0.255 8	1.48	1 517.82	4.40
9	0.060 4	1.48	1 517.82	3.96
10	0.237 3	1.39	1 384.11	4.40

由于权重系数对不同模拟结果评价有不同影响，需要对选择的指数赋予权重系数。目前对于确定权重的方法有实验分析法、专家打分法、层次分析法等，为了增加权重系数的准确性，将专家打分法和层次分析法相结合，对所选择的指数确定其中产业结构综合变动系数的权重为 0.142 9，耗水总量的权重为 0.302 6，农业单位产值耗水的权重为 0.202 8，地区生产总值的权重为 0.351 6(表 5)。

武威市不同水资源利用情景模拟的可实施性评价结果(表 6)显示，情景 4 的得分最高，为 0.733 2，因此具有较强的可实施性，即情景 4 最适合用于武威市减少水资源消费量。情景 8，10 得分虽与情景 4 接近，且其水资源消费量减少较多，但这两种情景均采用强控水措施，即第一产业单位产值耗水下降幅度每年增加 2%和 3%，对于武威市这样一个农业大市，单一的通过降低农业用水耗资大，不易于实施。

表 5　武威市水资源消费可实施性评价的权重

可实施性	总产值	产业结构	农业水效益	水资源消费总量	权重
总产值	1.000 0	2.225 5	1.822 1	1.221 4	0.351 6
产业结构	0.449 3	1.000 0	0.670 3	0.449 3	0.142 9
农业水效益	0.548 8	1.491 8	1.000 0	0.670 3	0.202 8
水资源消费总量	0.818 7	2.225 5	1.491 8	1.000 0	0.302 6

注：判断矩阵一致性比例为 0.001 5；总目标的权重为 1.000 0。

表 6　武威市不同水资源消费与经济发展情景可实施性评价

情景	单项指标得分				总分
	产业结构综合变动系数	耗水总量	农业单位产值耗水	地区生产总值	
1	1.000 0	0.176 8	1.000 0	0.489 0	0.571 1
2	0.990 8	0.000 0	1.000 0	0.999 9	0.696 0
3	0.473 4	0.524 3	1.000 0	0.489 0	0.601 0
4	0.476 1	0.524 3	0.763 7	1.000 0	0.733 2
5	0.938 9	0.524 3	0.763 7	0.000 0	0.447 7
6	0.000 0	0.837 3	1.000 0	0.489 0	0.628 1
7	0.180 8	0.837 3	0.763 7	0.489 0	0.606 0
8	0.342 9	0.837 3	0.319 7	1.000 0	0.718 8
9	0.844 8	0.837 3	0.319 7	0.000 0	0.438 9
10	0.390 4	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.710 0

3　结论与讨论

(1) 通过 10 种不同情景模拟分析，武威市在不同情景下，节水效果存在显著差异。其中在武威市经济加速增长，产业结构合理调整，加强节水的弱控水约束条件下(情景 4)，有利于实现武威市经济与水资源消费稳步发展，此时武威市 2015 年的水资源消费量为 1.67×10^9 m^3，地区生产总值为 4.40×10^{10} 元。

(2) 对水资源与经济产业结构的讨论过程中应用经典的 IPAT 模型，此模型是假设人文驱动力与环境压力之间存在线性关系，而忽略了人文驱动力之间的相互作用；其次，IPAT 模型缺少对人文驱动力对环境影响的分析[10-12]。本研究中各种水资源消耗情景的假设，均是基于各产业之间的发展情况以及技术进步情况进行设定的，缺少对如人口数量的变动、居民的节水意识以及环境政策等人文因素的分析，因此本研究只是在一定层面上对武威市水资源消耗量与产业结构之间的关系进行试探性研究。

(3) 对武威市水资源消费与产业结构之间的关系不同情景的模拟，是在假设武威市水资源全部来源于石羊河，而事实上武威市水资源消费中很大一部分来自天然降水和引黄工程的跨区域调水。因此，武威市单位产值水资源消费量实际上要高于所计算的值，但本研究仍对武威市产业结构的调整起到了一定的借鉴作用。

(下转第 292 页)

现阶段，虽然阔叶树种在在植被碳储量中贡献较小，但配置适宜的阔叶树种可以增加石灰岩山地植被的固碳潜力。从研究结果来看，梧桐和女贞相比黄栌和枫香具有更好的固碳潜力。枯落物碳储量对生态系统碳储量贡献较小，只占总碳储量的 0.582%～3.897%。但其在生物碳库向土壤碳库转移过程中具有关键作用，还可有效保持水土，对维持人工林生态系统的碳库也有重要的作用。

[参 考 文 献]

[1] Malhi Y, Baldocchi D D, Jarvis P G. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests[J]. Plant, Cell & Environment, 1999,22(6):715-740.

[2] 刘国华，傅伯杰，方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献[J]. 生态学报，2000,20(5):733-740.

[3] Lal R. Forest soils and carbon sequestration[J]. Forest Ecology and Management, 2005,220(1):242-258.

[4] 周玉荣，于振良，赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡[J]. 植物生态学报，2000,24(5):518-522.

[5] 邸月宝，王辉民，马泽清，等. 亚热带森林生态系统不同重建方式下碳储量及其分配格局[J]. 科学通报，2012,57(17):1553-1561.

[6] 王春梅，邵彬，王汝南. 东北地区两种主要造林树种生态系统固碳潜力[J]. 生态学报，2010,30(7):1764-1772.

[7] 刘迎春，王秋凤，于贵瑞，等. 黄土丘陵区两种主要退耕还林树种生态系统碳储量和固碳潜力[J]. 生态学报，2011,31(15):4277-4286.

[8] 王哲，韩玉洁，康宏樟. 黄浦江上游主要树种水源涵养林生态系统碳储量[J]. 生态学杂志，2012,31(8):1930-1935.

[9] 萧自位，王丽娟，毛加梅，等. 西双版纳不同林茶复合生态系统碳储量[J]. 生态学杂志，2012,31(007):1617-1625.

[10] 张鹏超，张一平，杨国平，等. 哀牢山亚热带常绿阔叶林乔木碳储量及固碳增量[J]. 生态学杂志，2010,29(6):1047-1053.

[11] 李瑞霞，彭婷婷，刘娜，等. 间伐对侧柏人工林碳储量以及细根生物量和形态的影响[J]. 东北林业大学学报，2013,41(5):34-38.

[12] 石聪. 徐州侧柏人工林生态系统碳储量影响因素研究[D]. 南京：南京林业大学，2012.

[13] 李朝. 侧柏人工林生物量研究[D]. 南京：南京林业大学，2010.

[14] Fang J, Chen A, Peng C, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. Science, 2001,292(5525):2320-2322.

[15] Eggleston H S, Buendia L, Miwa K, et al. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[J]. Institute for Global Enviromental Strategies, Hayama, Japan, 2006.

[16] 徐艳，张凤荣，段增强，等. 区域土壤有机碳密度及碳储量计算方法探讨[J]. 土壤通报，2006,36(6):836-839.

（上接第 287 页）

[参 考 文 献]

[1] 顾康康，刘景双，陈昕. 辽中地区矿业城市水资源供需平衡动态分析[J]. 地理学报，2008,63(5):473-481.

[2] 石培基，金淑婷，李博，等. 水资源控制下西北干旱区城市发展模式研究[J]. 中国沙漠，2013,33(6):1898-1904.

[3] 鲍超，方创琳. 干旱区水资源开发利用对生态环境影响的研究进展与展望[J]. 地理科学进展，2008,27(3):38-46.

[4] 方创琳，鲍超. 黑河流域水—生态—经济发展耦合模型及应用[J]. 地理学报，2004,59(5):781-790.

[5] Murray-Hudson M, Wolski P, Ringrose S. Scenarios of the impact of local and upstream changes in climate and water use on hydro-ecology in the Okavango Delta, Botswana[J]. Journal of Hydrology, 2006,1(1/2):73-84.

[6] 黄庆旭，史培军，何春阳，等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟[J]. 地理学报，2006,61(12):1299-1310.

[7] 彭少明，李群，杨立彬. 黄河流域水资源多目标利用的柔性决策模式[J]. 资源科学，2008,30(2):254-260.

[8] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth [J]. Science, 1971,171(3977):1212-1217.

[9] Ehrlich P R, Holdren J P. One dimensional economy [J]. Bulletin of Atomic Scientists, 1972,28(5):16-27.

[10] 王立猛，何康林. 基于 STIRPAT 模型的环境压力空间差异分析：以能源消费为例[J]. 环境科学学报，2008,28(5):1032-1037.

[11] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence, and technology[J]. Human Ecology Review, 1994(1):277-300.

[12] Waggoner P E, Ausubel J H. A framework for sustainability science: A renovated IPAT identity[J]. Proceedings of the National Academy of Science, 2002, 99(12):7860-7865.