

# 水环境约束下区域适度人口研究

付正辉 陆文涛 赵颢瑾 郭怀成<sup>†</sup>

北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: hcguo@pku.edu.cn

**摘要** 基于区间模糊线性规划方法, 综合考虑区域人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放量, 构建区域适度人口规划模型, 并以青海省西宁市为案例开展研究。结果表明, 分别在低、中、高满意度情景下, 2020 年西宁市适度人口为别为[282.16 万, 324.00 万], [241.94 万, 282.88 万]和[220.32 万, 261.93 万], 同时发现, 可利用水资源总量不足将是限制区域人口发展的主要因素。

**关键词** 水环境; 适度人口; 区间模糊; 满意度

**中图分类号** X24

## Study of an Optimum Population under the Water Environmental Restriction

FU Zhenghui, LU Wentao, ZHAO Haojin, GUO Huaicheng<sup>†</sup>

College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: hcguo@pku.edu.cn

**Abstract** Considering per person GDP, water resource and sewage discharge of per capita, an inexact fuzzy linear programming model is applied for regional population management in Xining, China. The result indicated that the Xining's population would be  $[282.16 \times 10^4, 324.00 \times 10^4]$ ,  $[241.94 \times 10^4, 282.88 \times 10^4]$  and  $[220.32 \times 10^4, 261.93 \times 10^4]$  under the scenario of low, medium and high degree of satisfaction. Meanwhile, the shortage of available water resource would be the limiting factor on the growth of regional population.

**Key words** water environmental; optimum population; interval-fuzzy; degree of satisfaction

近年来, 随着我国社会经济的高速发展, 人类对生态系统进行高强度、大规模的改造活动, 引发资源短缺、环境污染、生态系统退化等一系列问题。水资源的短缺与水资源需求总量增加之间不可调和的矛盾成为目前关注的焦点<sup>[1]</sup>。人口增长、经济发展以及土地利用方式变化等因素在改变水资源需求总量的同时, 也受到水环境和水资源总量的约束<sup>[2]</sup>。

我国总人口经历了新中国成立以来几十年的高速增长后, 从 20 世纪 90 年代开始明显减缓, 但随着全面放开二孩的生育政策出台, 我国人口总量及结构将会发生显著的变化<sup>[3]</sup>。在此背景下, 如何在水环境可容纳的基础上, 制定区域人口发展政策, 寻求未来时间段内区域适度人口目标, 具有重要的

研究意义。

本文在对中国适度人口相关文献进行总结分析的基础上, 基于水环境约束, 充分考虑系统的不确定性以及管理者的主观判断性, 结合区间参数和模糊线性规划方法, 构建包括区域人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放量等指标的区域适度人口规划模型。以青海省西宁市为例, 开展模型应用研究, 计算高、中、低不同满意度情景下区域适度人口总量, 以期在区域发展过程中人口总量的控制提供数据支撑和决策依据。

## 1 相关工作

模糊优化理论起源于 20 世纪 70 年代 Bellman 等<sup>[4]</sup>提出的模糊决策概念和模糊环境下的决策模

型。近年来,许多学者运用模糊优化理论开展相关研究。臧宏宽等<sup>[5]</sup>通过建立区间模糊规划模型,分析碳税政策对北京市能源系统影响。王宗舞等<sup>[6]</sup>研究炼焦配煤的最优方式。曾雪婷<sup>[7]</sup>将水权交易体系纳入水资源规划管理中,采用随机模糊规划方法开展实例研究。李晨洋等<sup>[8]</sup>基于区间两阶段模糊随机模型,开展灌区多水源优化配置的研究。

人口学家、经济学家和社会学家很早就开展了关于适度人口问题的研究<sup>[9]</sup>。19 世纪 80 年代,早期的适度人口理论主要在经济报酬规律基础上产生,用来解释人口与经济之间的相互关系<sup>[10]</sup>。英国经济学家 Cannan<sup>[11]</sup>提出“适度人口论”,认为在任何一定时期内,一个国家或地区的适度人口是当地产业达到最大生产率时对应的人口。瑞典经济学家 Weckshell<sup>[12]</sup>在系统定义适度人口概念的基础上,注重人口与资源的相互适应。Pimentel 等<sup>[13]</sup>界定了适度人口的标准,认为适度人口规模必须与基本需求相关的环境约束一致,生活标准越高,环境所能承受的适度人口规模越小。

改革开放以来,我国学者也开展了关于适度人口的相关研究,动态规划、多目标规划、系统动力学、生态足迹和多情景分析方法得到广泛应用,同时不断深入和完善适度人口的理论框架<sup>[14-18]</sup>。

虽然关于适度人口的研究取得一定的成果,但还存在一定的不足:1) 对人口与环境系统之间关系的复杂性、系统的动态性以及由此带来的不确定性认识不充分,未考虑不确定性对未来适度人口评估的影响;2) 没有充分考虑政府管理者与政策制定者的人为主观性对区域人口发展的影响。

本文以西宁市为例,开展区域适度人口研究。通过区间模糊线性规划方法,用区间数的形式表示研究系统中具有不确定性的数据,同时运用模糊规划理论,将主观的定性概念转化为可度量的量化计算公式,从而为区域人口规划提供一定的技术支持。

## 2 研究方法及模型构建

### 2.1 研究方法

本文采用区间模糊线性规划方法开展相关研究,首先,考虑一个如下区间模糊线性规划问题:

$$\min f^{\pm} \equiv C^{\pm} X^{\pm}, \quad (1)$$

约束条件为

$$A^{\pm} X^{\pm} \leq B^{\pm}, \quad (2)$$

$$X^{\pm} \geq 0. \quad (3)$$

其中,  $X^{\pm} \in \{\Re^{\pm}\}^{n \times 1}$ ,  $A^{\pm} \in \{\Re^{\pm}\}^{m \times n}$ ,  $B^{\pm} \in \{\Re^{\pm}\}^{m \times 1}$ ,  $C^{\pm} \in \{\Re^{\pm}\}^{1 \times n}$ ,  $\Re^{\pm}$  表示不确定数的集合。 $x^{\pm}$  为区间数,令  $x^{+}$  和  $x^{-}$  分别表示  $x^{\pm}$  的上下界。 $\equiv$  和  $\leq$  分别表示模糊相等和模糊不等。基于模糊弹性规划的原则<sup>[19]</sup>,令  $\lambda^{\pm}$  值和模糊决策的隶属函数相联系。也就是说,约束条件的灵活性以及系统目标的模糊性都用模糊数集表示,分别称为“模糊约束”和“模糊目标”,可以用与约束或目标满意度相关的隶属度  $[\lambda^{\pm}]$  表示。取隶属度水平  $\lambda = \min\{\mu_G, \mu_{C_1}, \mu_{C_2}, \mu_{C_n}\}$ 。因此,根据 Huang 等<sup>[20]</sup>的研究,区间模糊线性规划模型可以转化为

$$\max \lambda^{\pm}, \quad (4)$$

约束条件为

$$C^{\pm} X^{\pm} \leq \lambda f^{+} + (1 - \lambda^{\pm}) f^{-}, \quad (5)$$

$$A^{\pm} X^{\pm} \geq B^{-} + (1 - \lambda^{\pm})(B^{+} - B^{-}), \quad (6)$$

$$X^{\pm} \geq 0, \quad (7)$$

$$0 \leq \lambda^{\pm} \leq 1. \quad (8)$$

其中,  $\lambda^{\pm}$  为与模糊目标或模糊约束满意度隶属度相关的控制变量,  $f^{+}$  和  $f^{-}$  为决策者所制定目标的期望水平的上下界,交互式两步算法可以通过分析目标函数和约束间的关系以及参数和变量间的关系求解以上模型<sup>[21]</sup>。

### 2.2 研究区域概况

西宁市是青海省省会,是全省的政治、经济、文化、交通中心,位于青海省东部湟水河流域,地处青藏高原与黄土高原过渡带,湟水及 3 条支流在此交汇。市区平均海拔 2295 m,地理坐标为东经 101°77',北纬 36°62'。整个城市呈东西向条带状,地势西南高、东北低。下辖城东、城中、城西和城北 4 个区,大通、湟中和湟源 3 个县。2011—2015 年西宁市 GDP 总量、人口总量、水资源总量及排污总量如表 1 所示。

### 2.3 区域适度人口模型构建

本文以 2020 年为规划期,考虑到人口与经济社会发展和水环境相关性,同时根据数据的可获取性,选取西宁市 GDP 总量、可利用水资源总量、

表 1 西宁市概况统计  
Table 1 Summary statistics of Xining

年份	GDP/亿元	人口/万	水资源总量/亿 m <sup>3</sup>	排污总量/亿吨
2011	760.39	222.80	7.39	1.84
2012	838.14	224.74	5.21	1.39
2013	967.74	226.76	5.42	1.52
2014	1065.78	229.07	5.65	1.54
2015	1131.62	231.00	5.68	1.60

污水排放总量与人口相除, 分别得到西宁市人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放量, 并以这 3 个变量为指标, 通过满意度隶属度函数进行转换, 分别赋予 3 个指标不同的权重, 构建区域适度人口规划模型。

目标函数为

$$\max \lambda = \alpha_1 f(g_1^+) + \alpha_2 f(g_2^+) + \alpha_3 f(g_3^+), \quad (9)$$

人均 GDP 约束为

$$g_1^+ = \frac{TF^+}{P^+}, \quad (10)$$

人均水资源量约束为

$$g_2^+ = \frac{TW^+}{P^+}, \quad (11)$$

人均污水排放量约束为

$$g_3^+ = \frac{TPW^+}{P^+}, \quad (12)$$

隶属度约束为

$$f(g_1^+) = \begin{cases} 0, & \text{当 } x \leq \beta_1^-, \\ l_1(x), & \text{当 } \beta_1^- < x \leq \beta_1^+, \\ 1, & \text{当 } \beta_1^+ < x, \end{cases} \quad (13)$$

$$f(g_2^+) = \begin{cases} 0, & \text{当 } x \leq \beta_2^-, \\ l_2(x), & \text{当 } \beta_2^- < x \leq \beta_2^+, \\ 1, & \text{当 } \beta_2^+ < x, \end{cases} \quad (14)$$

$$f(g_3^+) = \begin{cases} 1, & \text{当 } x \leq \beta_3^-, \\ l_1(x), & \text{当 } \beta_3^- < x \leq \beta_3^+, \\ 0, & \text{当 } \beta_3^+ < x. \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\lambda$  为满意度, 取值在 0~1 之间;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  和  $\alpha_3$  分别为人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放

量权重值, 本文取值分别为 0.4, 0.4 和 0.2;  $g_1^+$ ,  $g_2^+$  和  $g_3^+$  分别代表人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放量;  $TF^+$  为 GDP 总量(万元);  $TW^+$  为可利用水资源总量(万 m<sup>3</sup>);  $TPW^+$  为污水排放总量(万吨);  $P^+$  为人口总量。  $f(g_1^+)$ ,  $f(g_2^+)$  和  $f(g_3^+)$  的隶属函数如图 1~3 所示。

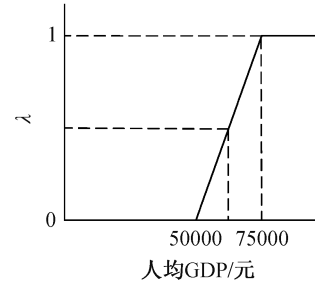


图 1 人均 GDP 指标隶属度函数  
Fig. 1 GDP of per capita membership function

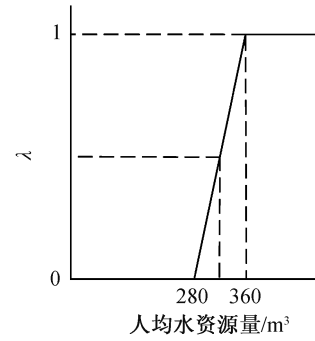


图 2 人均水资源量指标隶属度函数  
Fig. 2 Water resource of per capita membership function

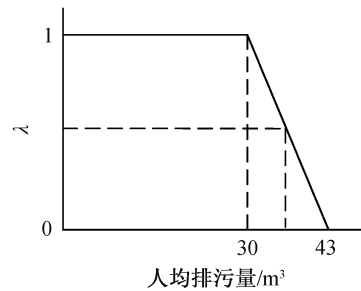


图 3 人均排污量指标隶属度函数  
Fig. 3 Sewage discharge of per capita membership function

### 3 结果分析

根据区域适度人口规划模型, 分别定义  $\lambda=0.3$ ,  $\lambda=0.5$  和  $\lambda=0.7$  为低满意度情景、中满意度情景和高满意度情景, 得到西宁市 2020 年适度人口总量

下限与上限, 结果如表 2 所示。

表 2 不同满意度情景下西宁市人口承载力  
Table 2 Population of Xining under different satisfaction scenario

满意度水平	人口承载力/万	
	下限	上限
低满意度情景( $\lambda=0.3$ )	282.16	324.00
中满意度情景( $\lambda=0.5$ )	241.94	282.88
高满意度情景( $\lambda=0.7$ )	220.32	261.93

通过对比 2020 年西宁市不同满意度情景水平下人口总量可知, 西宁市在低、中、高不同满意度情景下, 区域可承载人口分别为 [282.16 万, 324.00 万]、[241.94 万, 282.88 万] 和 [220.32 万, 261.93 万]。对比西宁市 2011—2015 年人口变化趋势可知, 在高满意度情景下, 西宁市人口发展空间较小, 尤其在下限结果中, 可承载人口仅为 220.32 万, 低于西宁市 2015 年的 231 万人口总量, 表明在此情况下, 西宁市需要严格控制人口发展, 并在现有基础上进行适当削减。按照现有人口发展规模与幅度, 截至 2020 年, 西宁市人口将接近中满意度情景下的计算结果, 表明在该情景下西宁市人口增长空间也相对较小, 需要在严格控制中适度发展当前人口规模。对比高、中和低 3 个不同满意度情景, 西宁市人口在低满意度情景中将有较大的增长空间, 但是考虑到该情景中人均 GDP 与人均水资源量的不足, 决策者需要考虑在满足区域工作人口要求的前提下, 如何缓解资源带来的沉重压力。

在考虑综合满意度  $\lambda$  取值的同时, 在低、中、高满意度情景下, 分别对人均 GDP、人均水资源量和人均排污量 3 项分指标满意度进行计算, 结果如表 3 所示。

在低满意度情景下, 西宁市人均 GDP 满意度结果为 0.25, 人均水资源量满意度结果为 0, 人均排污量满意度为 1, 表明在此情景下, 西宁市可利用水资源量不足, 同时人口数量较多, 导致人均水资源量较低, 根据人均水资源量隶属度函数, 人均水资源量小于  $280 \text{ m}^3$ , 同时满意度水平取值为 0。人均排污量单项满意度为 1, 表明由于人口总量相对较多, 在污水排放总量不变的前提下, 人均排污量降低, 根据人均排污量隶属度函数, 人均排污量小于 30 吨。

表 3 分项指标满意度结果  
Table 3 Result of each index satisfaction degree

满意度水平	人均 GDP	人均水资源量	人均排污量
低满意度情景( $\lambda=0.3$ )	[0.25, 0.25]	[0, 0]	[1, 1]
中满意度情景( $\lambda=0.5$ )	[0.58, 0.62]	[0.17, 0.22]	[0.82, 1]
高满意度情景( $\lambda=0.7$ )	[0.78, 0.88]	[0.47, 0.58]	[0.58, 1]

在中满意度情景下, 人均 GDP 满意度从 [0.25, 0.25] 上升到 [0.58, 0.62], 表明人均 GDP 有所上升, 同时人均水资源量满意度仍维持在较低水平, 仅为 [0.17, 0.22], 人均排污量满意度上限仍然可以达到 1。在高满意度情景下, 人均 GDP 满意度达到最高, 为 [0.78, 0.88], 人均水资源量满意度明显上升, 达到 [0.47, 0.58], 同时人均排污量满意度下限有明显下降, 为 0.58, 上限仍然为 1。

对比不同满意度情景下的结果可知, 西宁市水资源总量不足, 导致人均水资源量较低, 这将成为城市人口发展最主要限制性因素。同时, 西宁市水环境容量尚有较大的富余, 污水排放总量未达到承载能力极限。因此, 通过外流域引水、增加回用水比率等合适的手段增加区域可利用水资源总量, 可以有效地缓解人口增长带来的压力。

## 4 结论

本文基于区间模糊线性规划方法, 综合考虑区域人均 GDP、人均水资源量和人均污水排放量 3 项指标, 构建区域适度人口规划模型。以西宁市为研究案例, 分析不同满意度情景下的适度人口, 得到以下结论。

1) 区域适度人口规划模型可以在考虑水环境约束的前提下, 给出区域不同发展水平下的适度人口, 可为区域政策制定者提供一定的参考依据。

2) 人均水资源量是西宁市人口发展最主要的限制性指标, 人均排污量指标尚有较大富余, 因此增加西宁市可利用水资源总量, 是区域高速发展的前提, 值得决策者重点关注。

3) 随着满意度水平的上升, 区域适度人口总量逐步下降, 同时在高满意度情景下, 西宁市人口基本上达到上限, 表明为了保证较高的生活质量, 即维持较高的满意度水平, 西宁市需要严格控制人口发展规模。

## 参考文献

- [1] Gain A K, Giupponi C. A dynamic assessment of water scarcity risk in the lower brahmaputra river basin: an integrated approach. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 120–131
- [2] Sophocleous M. Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, 2004, 13(2): 61–75
- [3] 童玉芬, 王静文, 梁钊. 资源环境约束下的中国适度人口研究. *人口研究*, 2016(2): 3–11
- [4] Bellman R E, Zadeh L A. Decision-making in a fuzzy environment. *Management Science*, 1970, 17(4): 141–164
- [5] 臧宏宽, 刘丹, 李薇, 等. 基于区间模糊规划的碳税政策对北京市能源系统影响研究 // 华北电力大学研究生学术交流年会. 北京, 2011: 38–45
- [6] 王宗舞, 丁可轩. 基于区间模糊规划方法的炼焦配煤优化模型. *煤炭转化*, 2013, 36(1): 55–58
- [7] 曾雪婷. 随机模糊规划方法及流域水权交易研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015
- [8] 李晨洋, 张志鑫. 基于区间两阶段模糊随机模型的灌区多水源优化配置. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 107–114
- [9] 毛志锋. 适度人口与控制. 西安: 陕西人民出版社, 1995
- [10] Zimmermann K F. 适度人口经济理论. 彭松建, 周雄飞, 译. 北京: 北京大学出版社, 1996
- [11] Cannan E. *Elementary political economy*. London: Henry Frowde, 1888
- [12] Wicksell K. 国民经济学讲义. 刘契敖, 译. 上海: 上海译文出版社, 1984
- [13] Pimentel D, Giampietrp M, Bukkens S G F. An optimum population for North and Latin America. *Population & Environment*, 1969, 20(20): 125–148
- [14] 毛志峰, 任世清. 论人口容量与资源环境. *中国人口·资源与环境*, 1995, 5(1): 75–79
- [15] 刘渝琳. 我国可持续发展中的人口适度规模及预警分析. *中国人口·资源与环境*, 2000, 10(3): 95–97
- [16] 王颖, 黄进, 赵娟莹. 多目标决策视角下中国适度人口规模预测. *人口学刊*, 2011(4): 21–29
- [17] 陈勇, 茆长宝, 程琳. 基于地区生态足迹差异的生态适度人口研究. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 560–566
- [18] 潘竟虎, 孙会慧, 石培基. 基于多情景模式的兰州新区生态适度人口测度. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(11): 75–81
- [19] 靳晨霞. 不确定环境下的进化计算方法研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2007
- [20] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. A grey fuzzy linear programming approach for municipal solid waste management planning under uncertainty. *Civil Engineering Systems*, 1993, 10(4): 123–146
- [21] Huang G H, Baetz B W, Patry G G. Grey fuzzy integer programming: an application to regional waste management planning under uncertainty. *Socio-Economic Planning Sciences*, 1995, 29(1): 17–38