

# 陕西省榆林市水资源人口承载规模研究

党丽娟<sup>1,2</sup>, 徐勇<sup>1</sup>, 王志强<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**榆林市地处于我国生态脆弱带和水土流失严重地带,属重度缺水地区,其能源化工产业的迸发式增长造成用水需求和水污染的巨大压力。水资源已经成为决定其人口和产业发展规模的刚性约束条件。针对这类资源性缺水的能源型地区,开展水资源人口承载能力评价已成为促进可持续发展的必要研究工作。通过对 1956—2010 年的水文资料与 1980 年以来的人口数据进行统计分析,对未来人口和需水量进行预测,基于城市人口适度发展规模模型,结合 GIS 技术,利用超载度的指标衡量并预测了榆林市 2020 年人口规模及承载状态。结果表明:榆林市水资源的人口规模现处于轻度超载状态,超载人口 8.14 万人,超载度为 1.02,超载度随时间逐渐加重,超载人口数量成倍数增长;到 2015 年,水资源能够承载的人口适度规模与预测结果相比,超载人口达 15.99 万人,超载度达到 1.04;到 2020 年,超载人口约 30.93 万人,超载度增加为 1.08;超载人口主要以城镇人口超载为主,2015 年、2020 年的超载度分别为 1.89 和 1.73,农村人口处于可承载状态,并呈现递减趋势。由此可见,在现有的人口集聚模式下,城镇人口的增长势必加重人水矛盾,城镇化与水资源相互制约的作用会更加突显。

**关键词:**水资源承载力;人口规模;榆林市

中图分类号:K901.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)03-0090-08

## Study on Population Carrying Capacity of Water Resources in Yulin City, Shaanxi Province

DANG Li-juan<sup>1,2</sup>, XU Yong<sup>1</sup>, WANG Zhi-qiang<sup>1</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,*

*CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Being located in vulnerable ecological and soil erosion zone, Yulin City is highly lack of water resources. Moreover, the increasing energy industry causes greatly pressure on water demand and water pollution. Therefore, the deficient of water resources has limited the future expansion of population and industry. Assessing population carrying capacity of water resources is a necessary and urgent research topic for the shortage-of-water-type energy cities. Based on the prediction model of optimum population development size, by using hydrological data, also with the demographic data from 1956 to 2010, this paper analyzes and predicts the urban moderate scale under the limit of the water resources in the future in Yulin City. The results are as followings: there is exponentially growing tendency of overloaded water resources; in the scenario of 2010, the overload rate of population size is 1.02; by 2015 and 2020, the overload rates of population size will grow up to 1.04 and 1.08, respectively; the oversized population mainly comes from cities and towns, the overload rate for cities and towns of 2015 and 2020 will be 1.89 and 1.73. However, the population from rural area annually decreases. With the current population agglomeration trend, the conflict between water deficiency and population growth would be more intense in urban areas, while suburban areas could have a great potential to carry population. In view of the facts mentioned above, the population size should be controlled in a reasonable range.

**Key words:** carrying capacity of water resources; population size; Yulin City

收稿日期:2013-07-29

修回日期:2013-10-10

资助项目:国家自然科学基金项目(41171449);国家自然科学基金项目(41371536);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-06-01)

作者简介:党丽娟(1988—),女,陕西神木人,博士研究生,主要研究方向为区域可持续发展。E-mail:danglijuan@gmail.com

通信作者:徐勇(1964—),男,陕西榆林人,研究员,主要从事区域可持续发展、土地利用与人地关系机理模拟研究。E-mail:xuy@igsnr.ac.cn

在我国以往的城市发展规划中,主要考虑能够反映城市本身空间尺度和社会经济能力的指标,如人口、土地、社会经济等,而一个城市能否可持续发展最终取决于资源条件。水资源的丰欠关乎城市的可持续发展,缺水问题往往成为约束和限制城市发展的重要因子。榆林市地处我国生态脆弱带和水土流失严重地带,人均水资源占有量仅为全国平均水平的38.6%<sup>[1-2]</sup>,属重度缺水地区,水资源及生态环境承载力弱。随着榆林市经济社会的快速发展,用水需求日益增加,特别是作为支柱的能源化工产业人口吸引力较强,用水需求量大,水资源供给已经成为决定城市发展规模的刚性约束条件。此外,随着煤炭资源的开发,北部地区采空区面积日益扩大<sup>[3]</sup>,对地下水产生了较大影响,出现部分地区地下水位下降、河流来水量减少<sup>[4-5]</sup>,地表沉陷等问题日益突出。在节能减排要求日益强化的背景下,榆林所面临的环境约束进一步趋紧,导致人均水资源量直逼承载力下限。作为承载力研究的重要着眼点之一,也是衡量区域可持续发展的重要标志<sup>[6]</sup>,水资源承载力的提高也就意味着区域可持续发展能力的增强,对水资源承载力分析实际上也是对区域人口与经济、资源、环境关系的综合性研究<sup>[7]</sup>。因此,开展水资源承载力的研究对于区域的可持续发展具有十分重要的意义。

目前,关于人口承载力已经从土地资源等单一环境因素过渡到复杂多重因素综合作用的研究<sup>[8-9]</sup>,而近年来,水资源的短缺直接限制了土地资源的开发和利用,以及生态环境的状况,从而影响了工农业的发展和人口的规模,制约着城市的发展。另一方面,关于水资源的调查、评价以及开发规划等研究越来越重视用水节水等微观方面的技术提高<sup>[10]</sup>,而以水资源的时空分布特征为基础,从宏观角度上研究区域内城市人口规模控制、人口分布以及城市内部结构调整等研究较为缺乏。因此,本研究为进一步探索如何解决水资源与区域人口发展要求之间的矛盾,将水资源承载力作为主要指标,通过对其承载人口规模进行量化和预测,判断城市承载状况,并提出提高人口承载力的政策建议,使城市人口设置与区域水资源承载力协调,实现区域可持续发展的目标。

## 1 区域特征与研究方法

榆林市位于陕西省最北部,东经 $107^{\circ}28'$ — $111^{\circ}15'$ ,北纬 $36^{\circ}57'$ — $39^{\circ}35'$ ,总面积4.4万 $\text{km}^2$ ,占全省总土地面积的21.2%。榆林地处中温带干旱、半干旱大陆性季风气候区,日照充足、四季分明。年均气温 $10^{\circ}\text{C}$ ,全市多年平均年降水量为397.7 mm,是陕西

省降水量最少的地区。地势从西向东、从西北向东南倾斜,境内平均海拔1 000~1 800 m。全市地貌大体以古长城为界,北部为风沙草滩区,地势平缓,沙丘连绵,约占全市总面积的42%;南部为黄土丘陵沟壑区,地面支离破碎,易引发水土流失,约占总面积的58%。境内河流主要有黄河水系和陕西省唯一的内陆水系,黄河流经府谷、神木、佳县、吴堡、绥德、清涧6县,共270 km,其支流无定河为全市最大河流,流域面积占全市总面积的79.8%;内陆水系较大的有八里河和红碱淖,北部风沙区还有大小不等的海子,分布在神木、定边县北部的沙漠闭流区,流域面积占全市总面积的10.8%。榆林地区土壤呈现较为典型的非地带性土壤分布,市域内植被主要有7种类型,分别是草场植被、落叶阔叶灌丛、落叶阔叶林、沙生植被、草甸、盐生植被、沼泽及水生植被。

榆林市水资源总量少,时空分布不均,北丰南贫、季差剧烈。全市多年平均水资源总量为32.01亿 $\text{m}^3$ ,其中地表水资源量为22.90亿 $\text{m}^3$ ,地下水资源量为24.78亿 $\text{m}^3$ ,水资源可利用总量为12.75亿 $\text{m}^3$ ,人均地表水资源量550 $\text{m}^3$ ,仅为全国平均值的1/4,耕地亩均水资源仅为165 $\text{m}^3$ ,为全国平均值的1/9,属资源性缺水地区。根据1952—2010年的径流实测资料,全市平均降水量减小5.14%,地表水资源量减少了13.4%,主要河流近20 a来的径流呈现出减小态势,径流量削减量最大的皇甫川为36.0%。在煤、气、油等北部能源富集的榆阳、神木、府谷、横山、靖边、定边六县区水资源总量为22.7亿 $\text{m}^3$ ,占全市总量的70.9%,水资源相对丰富,为北部县区能源开发建设创造了有利条件。相比之下,南部丘陵区地形破碎,且河流含沙量大,地下水埋藏深,可开采量小,开发利用难度较大,加之人口密度大,人均水资源量低,严重制约南部县区经济社会发展。

## 2 水资源承载力的研究方法 with 模型

本文所要探讨的水资源人口承载力是指流域在不同阶段的社会经济和技术条件下,在考虑区域水资源禀赋、开发利用潜力以及当地经济发展水平和结构、资源开发和利用的前提下,流域水资源能够维系和支撑的人口总量,即一个区域在水资源的约束下能够达到的最大承载人口数量。

### 2.1 关键指标的选取

水资源承载力评价指标不仅是水资源承载力大小的评判依据,而且也是水资源承载力大小的决策工具,选取能反映社会经济系统发展规模的指标体系成为问题的核心。水资源承载力的大小受到诸多因素

的影响,主要包括水资源禀赋、经济发展水平、人口与生态和环境状况等指标<sup>[11]</sup>。指标的选取既要反映“水资源系统—社会经济系统—生态系统”中的水资源数量与质量、开发利用状况及其动态变化对水资源承载力的影响,又要反映被承载的社会、经济系统发展规模、结构及发展水平变化对承载力的影响,以及水资源系统、社会系统、经济系统及生态环境系统之间的协调状况。

在实际计算过程中,水资源承载力评价指标的选取有不同的做法。其一从定义出发,直接选取可支持人口数量、产业发展规模等人口和社会经济发展指标,作为衡量水资源承载力大小的依据;其二从水资源可供水量、需水量、可承载人口规模等方面综合考虑建立水资源承载力评价指标体系。指标的选取直接关系到水资源承载力计算的结果,不同的指标选取,计算结果也大相径庭。以北京市为例,根据现有的计算结果统计,水资源人口承载力最大值为 2 000 万人,最小值仅为 130 万人,承载力值的巨大差异与水资源量指标的选取有密切关系,已有的研究中仅对水资源量这一指标就划分了天然水资源总量、供水总量、生活用水量三类,这三者之间的数量差异直接导致了水资源人口承载力的不同计算结果。

## 2.2 建立评价模型

国内外对资源承载力量化的计算方法大体分成两大类:一是评价方法,从分析水资源承载力系统中的现象入手构建指标体系,构建评价方法及模型,综合评判水资源对某种发展规模的支撑程度,主要方法如模糊评价法、灰关联评价法、主成分分析法等,这类方法局限于水资源承载力系统中各个因素的表象上,在指标体系、评价标准和评价方法的选择上主观性较大,因此最终结果只能用于定性判断;二是规划方法,通常从水资源承载力系统中各个因素的相互作用关系入手,构建数学方程模拟各个因素的发展,通过变量将数学方程耦合成水资源承载力量化模型,目的在于计算最大承载规模。主要有常规趋势法、系统动力学法、多目标综合分析法、人工神经网络(ANN)和遗传算法(GA)等,此类方法在探索各个因素的相互作用关系上有所突破,但这种方法过程复杂,涉及的参变量不好掌握,容易得出不合理的结论。

本文基于可持续发展理论框架,在赵建世<sup>[12]</sup>、石培基<sup>[13]</sup>等学者提出的城市适度规模计算模型的基础上,运用模型(1),(2)对水资源约束下的城市人口适度发展规模进行计算与分析,该模型指标量较少,容易获取,且全面反映了城市发展中缺水、污水等水资源问题,能够很好地解决城市发展过程中人口规模与

水资源之间需求与制约的关系。

$$p_r(t) = \left[ \frac{\omega_n}{q_p(t)} \frac{\omega_e}{q_p(t)} \frac{\omega_c}{s_p(t)} \right] = \min(c_1, c_2) \quad (1)$$

$$W_s = \frac{\omega_s}{\beta}, \beta = \frac{Q}{q} = \frac{C_q - C_0}{C_Q - C_0}, s_p(t) = \frac{\omega_e(t)}{p(t)} \quad (2)$$

$$z = \frac{p(t)}{p_r(t)} \quad (3)$$

式中:  $p_r(t)$ ——城市适度规模人口数量(人);  $p(t)$ ——该年实际城镇人口数量(人);  $\omega_n$ ——可利用水量总量( $\text{m}^3$ );  $\omega_e$ ——城镇居民生活供水量( $\text{m}^3$ );  $\omega_s$ ——地表径流量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $\omega_c$ ——河流自净能力( $\text{m}^3$ );  $Q$ ——径流总量( $\text{m}^3$ );  $q$ ——污水流量( $\text{m}^3$ );  $\omega_e(t)$ ——污水排放总量( $\text{m}^3$ );  $s_p(t)$ ——人均污水排放量( $\text{m}^3/\text{s}$ );  $q_p(t)$ ——城镇居民生活用水标准( $\text{m}^3/\text{人}$ );  $\beta$ ——污径比;  $C_q$ ——COD 含量( $\text{mg}/\text{L}$ );  $C_Q$ ——河水水质浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $C_0$ ——上游来水水质浓度( $\text{mg}/\text{L}$ );  $c_1$ ——水量承载能力(人);  $c_2$ ——水质承载能力(人);  $z$ ——水资源超载程度。

$z$  值代表水资源的超载程度,当  $z > 1$  时,区域或流域处于超载状态,值越大,超载程度越严重;当  $z < 1$  时,说明区域或流域的承载潜力大,值越小,其水资源的承载潜力越大,可容纳的人口量越大。在应用上述方法模型时,需要考虑的关键因子是区域的水资源量、水资源可利用量、不同水平年人均生活需水量、耗水量。

## 3 榆林重点开发区水资源的人口承载量分析

### 3.1 水资源承载力的各项指标分析

3.1.1 榆林市供水量与供水结构分析 供水量主要包括地表水源供水、地下水源及其他水源供水。在各供水水源中,地表水源供水量所占比例最大,占总供水量的 62%,其中引水工程供水量占 38%;集雨工程和污水处理再利用供水量相对较少,仅占 0.2%;微咸水在榆林市利用率已达到 1.3%。在 1980—2010 年期间,研究区总供水量有较大增长,地表水源供水所占比例有所下降。2010 年,全市各类水利工程年供水量 6.92 亿  $\text{m}^3$ ,占全市水资源总量的 30.19%;其中地表水 4.42 亿  $\text{m}^3$ ,占总供水量的 59.47%;地下水 2.48 亿  $\text{m}^3$ ,占总供水量的 40.38%;其他供水量约占 0.02 亿  $\text{m}^3$ (附图 6)。

由于受地理位置影响,水利工程分布不均,造成各分区供水能力有余有缺。从人均供水能力的空间分布情况来看,人均供水能力由北向南、由东向西呈现递减的趋势。各县(区)中人均供水能力最大的是榆阳区,为 861.01  $\text{m}^3/\text{人}$ ;其次是横山县、神木县,人

均供水能力均达到 400 m<sup>3</sup>/人以上;再次是米脂县和府谷县,人均供水能力均达到 100 m<sup>3</sup>/人以上,其余各县的人均供水能力都在 100 m<sup>3</sup>/人以下(图 1)。本文根据区域水资源情况、供水工程设施、来水条件、产业需水情况,结合引黄取水、区域调水工程,提出不同水平年不同降水条件下的区域可供水量。详见表 1。

根据榆林市对国家级能源化工基地的建设要求,未来将新增大批煤炭开采、煤电转化、煤化工等产能,水资源需求将大幅增长;加之该地区属于半干旱地区,降雨量少,蒸发强烈,当地自产径流量少,水资源开发条件较差,将来水资源的缺乏势必难以支撑国家能源化工基地建设的需求。

3.1.2 榆林市用水量与用水结构分析 用水量分为社会经济用水和生态系统用水,社会经济用水按生活、工业、农业 3 部门划分。其中,榆林市用水大户为农田灌溉用水,占总用水量的 64.71%,其次是工业用水,占总量的 18.73%,林、牧、渔、畜业用水占 6.37%,居民生活用水、城镇公共用水分别占 8.51%,

1.17%,生态环境用水仅占 0.50%。在 1980—2010 年间,榆林市人均总用水量由 213 m<sup>3</sup>/a 下降到 176 m<sup>3</sup>/a,单位 GDP 用水量、工业用水指标、农田灌溉用水指标下降趋势显著,而城镇生活、农村居民用水指标则逐年略有上升。

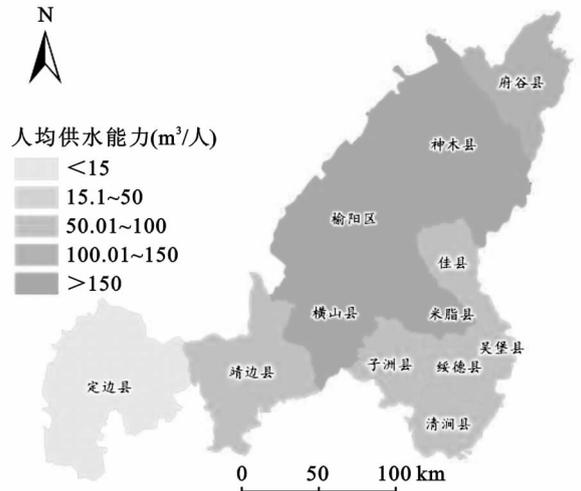


图 1 2010 年榆林市水资源人均供水能力空间分布情况

表 1 榆林市可供水量的预测结果统计

年份	地表水			地下水	污水回用	其它	合计		
	50%	75%	95%				50%	75%	95%
2005	4.71	3.92	3.32	2.80	0.00	0.01	7.52	6.73	6.13
2010	6.81	6.11	5.63	3.73	0.19	0.10	10.82	10.12	9.64
2015	8.43	8.20	7.31	4.04	0.41	0.18	13.06	12.83	11.94
2020	9.27	8.52	7.42	5.27	0.69	0.32	15.54	14.80	13.73

(1) 生活用水。生活用水包括城镇生活用水和农村生活用水。城镇生活用水包括城镇公共设施和流动人口用水,靠地表水供给;农村生活用水包括大小牲畜饮水,以取地下水为主。由于农村住宅一般没有给排水设施,用水定额低,耗水率较高,因此近似认为农村生活用水量基本是消耗水量。在 1980—2010 年,随着人民生活水平不断提高,生活配套设施日益完善,生活用水定额呈现逐年上升趋势。人均城镇生活用水指标增长到 69 L/d,农村生活用水指标增长到 39 L/d,分别增长了 50%,48%。

从图 2 中可以看出,2010 年的城镇人均用水量表现出比往年减少的趋势。事实上,由于该年人口城镇化呈现爆发式增长,大量的农村人口转化为城镇人口,原本增加的城镇用水量在人均水平上呈现出降低的趋势。生活用水量占总用水量的比重较小,但对用水保证程度要求较高、对水质好坏也有较严格的标准。目前,榆林市的所有中小河流上改建的库坝已基本建成,解决水瓶颈制约的唯一出路,只能从黄河干流引水。

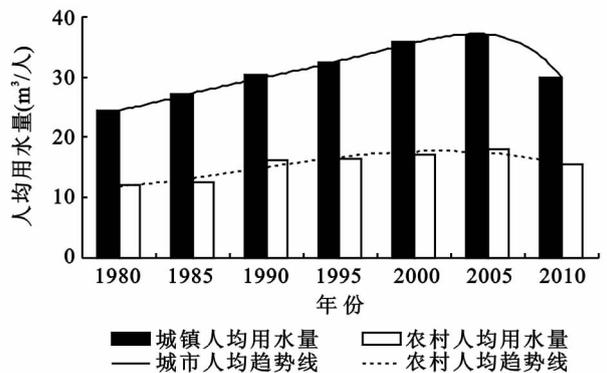


图 2 城镇、农村人均用水量变化趋势

(2) 生产用水。农业用水包括灌溉用水和林牧渔用水两部分。1980—2010 年,全市农业用水量呈缓慢上升趋势,年均增长率为 0.3%;农田实灌面积增加了 2.25 万 hm<sup>2</sup>,农田灌溉用水量增加了 137 万 m<sup>3</sup>;林牧渔业面积呈增长趋势,由 1980 年的 0.17 万 hm<sup>2</sup> 发展到 2010 年的 0.61 万 hm<sup>2</sup>,用水量增加了 3 160 万 m<sup>3</sup>。随着农业灌溉技术的改进和农业结构的调整,单位面积灌溉用水量下降了 1 551.58 m<sup>3</sup>。历年农业用水情况见表 2。

表 2 榆林市农业用水情况统计

年份	有效灌溉 面积/万 hm <sup>2</sup>	农田实灌 面积/万 hm <sup>2</sup>	林牧渔面积/ 万 hm <sup>2</sup>	农业用水量/万 m <sup>3</sup>			单位面积灌溉用 水量/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
				农田灌溉	林牧渔	总计	
1980	8.37	6.96	0.17	44650	1252	45902	6410.93
1985	6.89	6.22	0.26	38976	1988	40964	6264.89
1990	8.18	6.35	0.34	36567	2458	39026	5757.37
1995	10.82	9.65	0.43	49915	1857	51772	5172.18
2000	10.78	10.00	0.42	50349	1682	52031	5034.90
2005	11.66	9.78	0.98	47420	2359	49779	4849.99
2010	12.03	9.22	0.61	44787	4412	49199	4859.35

工业用水包括火电和一般工业用水。1980—2010年,榆林市工业用水量总体呈增长趋势,年均增长率达 9.78%,全市工业用水量在 30 a 间增加了 10.89 倍。从行政分区来看,工业用水量增长最快的是神木县,年均增长达到 13%;全市生产用水量占总用水量的 91.44%。随着工艺的改进和产业结构的调整,万元产值用水量明显下降,30 a 来降低了 401 m<sup>3</sup>,单方水 GDP 产出增加了 15 倍。受到产业结构调整、企业经营状况、用水管理水平及节水水平等因素的影响,各年份及各地区的增长率并不均衡。历年主要工业部门用水情况见表 3。

表 3 榆林市历年工业用水情况统计

年份	工业用水量/万 m <sup>3</sup>			万元产值 用水量/m <sup>3</sup>
	火电	一般工业	小计	
1980	93	684	777	468
1985	169	854	1023	411
1990	174	2726	2900	389
1995	827	3092	3919	170
2000	671	4393	5064	118
2005	945	5448	6393	52
2010	1394	7069	8463	67

(3) 生态用水。1980—2010 年间,随着城市化进程的不断推进,对城市的绿化及景观环境建设的力度也不断加强,生态环境用水量呈逐年上升趋势,从 1980 年的 81 万 m<sup>3</sup> 增至 2010 年的 344 万 m<sup>3</sup>。年均增长最快的是神木县,其余各县在经济发展的同时,也相应地加大了对生态环境需水的重视。

3.1.3 人均用水量法预测供、需水量 根据榆林市统计年鉴数据分析,从 1980 年改革开放初期到现在,榆林市人口发生了很大的变化。1980—2010 年榆林市人口净增量为 131.41 万人,常住人口年均自然增长率 7.5‰,年平均增长率为 1.53%,榆阳区人口增长率最高,为 2.1%,最低为吴堡县 0.9%。2000 年以来城镇人口年均增长 3.2%,农业人口从 2003 年开始逐年减少,市内出现了以榆林主城区为中心,以神木、靖边、绥德为副中心,以其他县城和中心城镇为重点,

形成劳动力转移和人口集聚格局。由于能源化工基地的建设与高速发展,神木县、榆阳区等经济迅速膨胀,吸引大量外来人口流入,造成这些地区人口呈不稳定、急速增长的态势。

按照用水类型进行预测,将水资源需求划分为生活需水、河道外生产需水、河道外生态环境需水以及河道内需水。以 2010 年为基准年,采取人均用水量法分别预测近远期水平年 2015 年和 2020 年的需水量。计算公式如下:

$$W_{\text{预测}} = W_{\text{生产}} + W_{\text{生活}} + E_{\text{水}}$$

$$W_{\text{生产}} = \text{GDP}_n \cdot U_{\text{GDP}} / P_{\text{总}}$$

$$W_{\text{生活}} = P(\omega_{\text{人均}} \pm \Delta\omega) = P_{\text{城}} \cdot \alpha_{\text{城}} + P_{\text{农}} \cdot \alpha_{\text{农}}$$

式中:  $W_{\text{预测}}$ ——预测水平年总需水量;  $W_{\text{生产}}$ ——预测水平年生产需水量;  $W_{\text{生活}}$ ——实际生活总需水量;  $E_{\text{水}}$ ——生态需水量;  $\text{GDP}_n$ ——预测年 GDP 值;  $U_{\text{GDP}}$ ——预测年份发展水平下万元 GDP 所需水量;  $P_{\text{总}}$ ——预测水平年人口数;  $\omega_{\text{人均}}$ ——现状年人均用水量;  $\Delta\omega$ ——人均用水量调整数,可从人均用水曲线的趋势求得;  $P_{\text{城}}$ ,  $P_{\text{农}}$ ——城市、农村人口总数;  $\alpha_{\text{城}}$ ,  $\alpha_{\text{农}}$ ——城市、农村人口用水定额。

根据社会经济、国民经济发展指标、水价水平,结合生活用水习惯和现状用水水平,参照建设部门已制定的城镇用水标准,同时借鉴国内外同类地区或城市生活用水定额,拟定城镇和农村居民生活用水定额,并以 2010 年的生活需水量为基准,采用人均综合用水量加趋势微调方法对 2015 年、2020 年在不同保证率下的需水量进行预测,根据人均用水量的变动趋势对预测值加以修正,以保证预测成果更加接近实际。

(1) 生活需水量。以 2010 年为基准年,2015 年和 2020 年各县区常住人口根据《榆林市国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要》确定的年均自然增长率 7.5‰ 进行预测。榆林市各县区城镇常住人口数根据城镇化率预测,2015 年、2020 年城镇化率分别为 52%, 60%。按照《城市居民生活用水量标准》(GB/T50331—2002),根据经济社会发展水平、人均收入水平、水价水平、节水器具推广与普及情况,结合

生活用水习惯和现状用水水平,参照建设部门已制定的城市(镇)用水标准,参考国内外同类地区或城市生活用水定额<sup>[14]</sup>,分别拟定各水平年城镇和农村居民生活用水定额,建议2015年城镇生活需水定额取119 L/(人·d),农村生活需水定额取51 L/(人·d);2020年城镇生活需水定额为134 L/(人·d),农村生活需水定额为56 L/(人·d)。经测算,到2015年、2020年榆林市生活需水量分别为9 914.7万m<sup>3</sup>和1 259.1万m<sup>3</sup>(附图7)。

(2) 生产需水量。生产需水量包括农业需水、工业需水、建筑业需水和第三产业需水。考虑到榆林市灌溉面积比较分散,已经处于较高的灌溉水平,要进一步提高灌溉效率,降低亩均用水量的难度很大,因此建议农业用水维持现状不变,即农业的增长主要靠技术进步、制度创新、管理水平提高等因素完成。根据榆林市农业发展指标和拟定的定额,预测各规划水平年的需水量统计结果如表4所示。

工业需水预测中,分别将采掘业、火力发电、煤化工、盐化工作为主要耗水户进行测算。榆林市用水量较大的采掘业主要包括煤炭、石油、天然气的开采,单位产品用水定额采用《陕西省行业用水定额》(2010年修订)的规定值;火力发电用水量按照装机容量、年利用小时数和装机取水定额确定,年利用小时数按照5 500 h计,装机取水定额按照《陕西省行业用水定额》确定;煤化工和盐化工由于产品众多,且缺乏部分产品的用水定额,通过借鉴并引用历年煤炭及转化、盐化工产业的发展趋势进行预测。建筑业需水量预测采取万元产值用水量指标计算。榆林市2009年建筑业用水指标为16 m<sup>3</sup>/万元,随着施工技术进步,2015年和2020年可分别按照节水10%和20%计算。通过分析,采用2001—2009年建筑业总产值序列作为回归样本,通过线性回归进行趋势外推2015年和2020年的总产值,预测榆林市第二产业的需水量,2015年为88 863.08万m<sup>3</sup>,2020年为138 198.22万m<sup>3</sup>。

表4 不同保证率下榆林市农业需水量预测统计 万m<sup>3</sup>

	水平年	农田灌溉	林牧渔	合计
P=50%	2010年	67170.19	9751.2	76921.39
	2015年	55015.64	16976.62	71992.25
	2020年	55411.11	19424.77	74835.89
P=75%	2010年	75755.85	10144.5	85900.35
	2015年	63284.4	18073.59	81357.99
	2020年	64897.04	20862.68	85759.72
P=95%	2010年	84203.59	10477.28	94680.87
	2015年	71553.16	19039.68	90592.85
	2020年	72622.74	21841.27	94464.01

第三产业需水采用万元产值用水量指标计算。结合用水现状分析,预测各规划水平年的需水定额,进行需水量的预测。以2005—2010年第三产业总产值序列为样本进行趋势外推,预计榆林市第三产业的需水量,2015年为4 404.07万m<sup>3</sup>,2020年为10 983.68万m<sup>3</sup>。

(3) 河道外生态环境需水。河道外生态环境需水主要包括城市生态环境需水和农村生态环境需水,农村生态环境需水已经在农村居民生活用水定额中考虑,在此不再重复计算。考虑到河道内需水量不参与河道外水资源供需平衡分析,因此在预测分析中不予计算。城镇生态环境美化依据城市人口多少及人均生态环境美化需水量确定。结合榆林市实际情况,根据经济和社会发展的规模及需要,城市生态环境需水主要考虑绿地需水,预计2015年和2020年榆林市城镇人均绿地面积分别为7.5 m<sup>2</sup>和9 m<sup>2</sup>,预计榆林市生态环境需水量,2015年为14 840.09万m<sup>3</sup>,2020年为24 438.90万m<sup>3</sup>。

综合榆林市生活、生产和生态(环境)三大用水户需水量,在不同保证率下需水量统计结果见表5。50%代表年的需水量2010年为13 6708.3万m<sup>3</sup>,2015年为190 014.2万m<sup>3</sup>,2020年为261 015.8万m<sup>3</sup>;75%代表年的需水量2010年为145 687.3万m<sup>3</sup>,2015年为199 379.9万m<sup>3</sup>,2020年为271 939.6万m<sup>3</sup>;95%代表年的需水量2010年为154 467.8万m<sup>3</sup>,2015年为208 614.8万m<sup>3</sup>,2020年为280 643.9万m<sup>3</sup>。

3.1.4 人均水资源量变化趋势分析 根据1980—2010年的人均水资源量统计数据,榆林市水资源与人口的空间分布极不均衡,全市水资源总量较少,人均用水量在全国属于相对较低水平。榆林市人均占有水资源量由1998年的1 180 m<sup>3</sup>下降到2010年的892 m<sup>3</sup>(图3),年均递减2.3%,仅为全省人均占有量1 300 m<sup>3</sup>的68.6%,为全国人均占有量2 300 m<sup>3</sup>的38.8%。全市有67%的县区人均水资源量低于1 000 m<sup>3</sup>,现已经达到国际公认的Malin Falkenmark缺水标准<sup>[15]</sup>,人均水资源量最低的子洲县,只有227 m<sup>3</sup>。

人口与水资源矛盾表现最为突出的为吴堡县,人均水资源量多年平均值仅为218.17 m<sup>3</sup>/人,居民的日常生活用水得不到保障;神木县的水资源量相对较丰富,人均水资源量多年平均值为2 484.5 m<sup>3</sup>/人,其次是榆阳区,值为2 407.67 m<sup>3</sup>/人;定边县与靖边县处于周期性用水紧张状态。

表 5 榆林市不同保证率下需水量预测统计

万 m<sup>3</sup>

水平年	生活需水量	生产需水量			生态需水量	总计	
		一产	二产	三产			
P=50%	2010 年	7469.56	76921.39	43017.64	1724.08	7575.64	136708.31
	2015 年	9914.66	71992.25	88863.08	4404.07	14840.09	190014.16
	2020 年	12559.12	74835.89	138198.22	10983.68	24438.90	261015.81
P=75%	2010 年	7469.56	85900.35	43017.64	1724.08	7575.64	145687.27
	2015 年	9914.66	81357.99	88863.08	4404.07	14840.09	199379.90
	2020 年	12559.12	85759.72	138198.22	10983.68	24438.90	271939.65
P=95%	2010 年	7469.56	94680.87	43017.64	1724.08	7575.64	154467.79
	2015 年	9914.66	90592.85	88863.08	4404.07	14840.09	208614.75
	2020 年	12559.12	94464.01	138198.22	10983.68	24438.90	280643.93

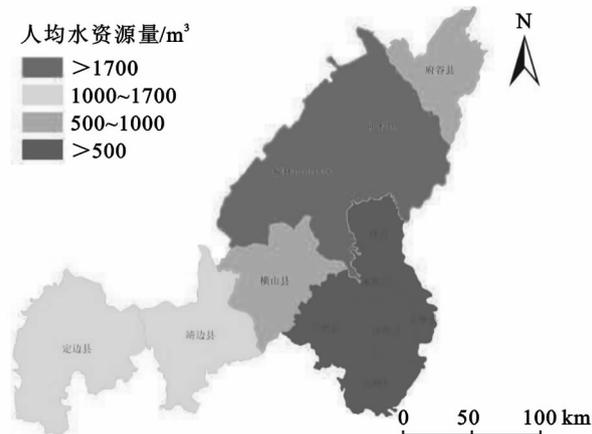


图 3 2010 年榆林市人均水资源量空间分布情况

### 3.2 榆林市水资源承载人口规模计算

本文以 2010 年的水资源数据、社会经济统计数据作为基础数据,从供用水量、人均水资源量两个角度分析水资源对人口发展的可持续条件,结合不同水平年的需水量预测结果,运用水资源承载力及城市人口适度规模模型,计算榆林市水量承载能力  $c_1$ (人)、水质承载能力  $c_2$ (人)、城市适度规模  $p_r$ (人)以及超载度  $z$ 。模型参数的确定,人均污水排放量  $s_p(t)$  取 2010 年榆林市人均排放量,  $s_p(t)$  为 9.22 t/人;一般来讲河流具有自净能力的径污比最低限为 20,河流自净能力可按  $w_c = 0.05w_s$  计算。模型计算结果如表 6 所示。

表 6 榆林市水资源承载力及区域人口适度规模 万人

年份	$c_1$	$c_2$	$p_r$	$p$	$z$
2010	356.36	364.33	356.36	364.50	1.02
2015	450.60	385.32	385.32	401.31	1.04
2020	505.51	403.88	403.88	434.81	1.08

根据对榆林市水量、水质承载力的计算,榆林市未来将以水量超载型为主。通过对超载度的计算,  $z$  值为 1.02~1.08,水资源的人口承载力均处于超载状态,超载程度随时间的增大呈现出加重的趋势。以 2010 年作为基础参照数据,根据对人口增长趋势的

一元线性回归分析,计算出未来水资源的城镇、农村人口承载力,如表 7 所示。

表 7 榆林市城镇、农村人口适度规模及超载度 万人

年份	城镇人口			农村人口		
	承载	预测	超载度	承载	预测	超载度
2010	83.38	97.80	1.17	272.98	266.70	0.98
2015	110.48	208.68	1.89	262.64	192.63	0.73
2020	151.18	260.89	1.73	253.90	173.92	0.69

结果显示,在未来 10 a 内,榆林市城镇人口处于超载状态,随着时间的增加,超载状态居高不下;而农村人口在未来 10 a 内人口在水资源承载范围之内,且呈现出承载能力逐渐加强的趋势。到 2015 年,水资源能够承载的城镇人口的超载程度达到 1.89;到 2020 年,超载程度降至 1.73,超载形势严峻。由于城镇化是未来必然的发展趋势,因此未来区域经济的集聚势必会造成人口的增长,从而加重人与水资源之间的矛盾,城镇化与水资源相互制约的作用会更加明显。

## 4 结论与讨论

水资源人口承载力作为衡量人与自然协调程度的重要指标之一,其水量和水质的承载力对人口、经济发展和生态环境保护同样具有深远影响。本文通过对水资源承载力的概念、内涵、指标体系、模型方法进行理论总结,结合榆林市实例,利用人口适度发展规模预测模型对区域水资源人口承载力进行分析计算。结果表明,在未来 10 a 内,榆林市水资源处于水量型超载状态,在超载人群中,尤以城镇人口为重,且超载程度随时间呈现出加重的趋势,超载度高达 1.89,农村人口尚有承载余地。可见,榆林市作为能源化工基地在一味强调城镇化和追求人口数量并不能保障区域可持续发展。相反,设定过高的城镇化率对城市良性发展造成障碍:未来生活、工业用水量的增长势必会挤占农业灌溉用水,部分原设计农业灌溉

功能的水库改为以生活供水或工业供水为主,使得原本存在供水缺口的农业用水无法得以保证。再者,大规模的资源开发不仅给国民经济各用水部门之间造成很多矛盾,而且产生巨大的生态环境压力。

在未来的研究中,为进一步缓解榆林市这个重度缺水、其产业布局又以煤化工、盐化工、煤电等高耗水行业为主的地区在未来水资源的人口超载情况下的恶性发展问题,应将水资源的产业承载力、生态承载力纳入研究中,会使得研究结果更加精确;此外,也可从产业经济和生态环境的角度,以人口中心迁移和空间布局为重点,侧面解决人水压力,从而提高水资源承载力的潜力,为打造能源化工基地水资源保障体系提供科学依据。

#### 参考文献:

[1] 《中国 21 世纪议程》编制小组. 中国 21 世纪议程. 中国 21 世纪人口、环境与发展白皮书[M]. 北京:中国环境科学出版社,1994:20-38.

[2] 榆林市榆阳区水政水资源管理办公室. 榆林市水资源年报[R]. 陕西榆林,2004.

[3] 榆林市榆阳区发展计划委员会. 榆林市榆阳区国民经济和社会发展第十一个五年规划汇编[Z]. 陕西榆林:文化出版社,2006.

[4] 陕西省榆林市榆阳区地方志. 榆阳年鉴[Z]. 榆林市统计

局,2001—2005.

[5] 王浩,陈敏建,秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2003.

[6] 汪党献,王浩,马静. 中国区域发展的水资源支撑能力[J]. 水利学报,2000,21(11):21-26.

[7] 高晓璐,陈田,樊杰. 汶川地震灾后重建地区的人口容量分析[J]. 地理学报,2012,65(2):164-176.

[8] 张威,郭善莉,穆克华,等. 资源环境因素对城市建设用地增长的影响[J]. 水土保持研究,2006,13(6):255-259.

[9] 李丽娟. 柴达木盆地水资源承载力研究[J]. 环境科学,2000,23(2):20-23.

[10] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.

[11] 惠洪河. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报,2001,12(2):85-89.

[12] 赵建世,王忠静,秦韬,等. 双要素水资源承载能力计算模型及其应用[J]. 水力发电学报,2009,28(3):176-180.

[13] 杨银峰,石培基. 甘肃省城市可持续发展系统协调发展评价研究[J]. 经济地理,2011,31(3):66-71.

[14] 徐学选,蒋定生,高鹏. 延安生态农业建设中的水问题初步分析[J]. 水土保持研究,2000,7(2):70-72,123.

[15] Falkenmark M. Water scarcity and population growth: A spiraling risk [J]. Ecodecision,1992,21(9):498-502.

(上接第 89 页)

[7] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,20(1):9-12.

[8] Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use[J]. Science,2005,309(5734):570-574.

[9] 吴桂平,曾永年,冯学智,等. CLUE-S 模型的改进与土地利用变化动态模拟:以张家界市永定区为例[J]. 地理研究,2010,29(3):460-470.

[10] 国家发展和改革委员会. 中原经济区规划[N]. 河南日报,2012-12(3).

[11] Verburg P H, Veldkamp A, Fresco L O. Simulation of changes in the spatial pattern of land use in China[J]. Applied Geography,1999,19(3):211-233.

[12] 郭延凤,于秀波,姜鲁光,等. 基于 CLUE 模型的 2030 年江西省土地利用变化情景分析[J]. 地理研究,2012,31(6):1016-1028.

[13] Verburg P H, Schot P P, Dijst M J, et al. Land use change modelling: current practice and research priorities[J]. GeoJournal,2004,61(4):309-324.

[14] 王丽艳,张学儒,张华,等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学,2010,26(3):73-77.

[15] Carvalho-Ribeiro S M, Lovett A, O'Riordan T. Multi-functional forest management in Northern Portugal: Moving from scenarios to governance for sustainable development[J]. Land Use Policy,2010,27(4):1111-1122.

[16] 马爱慧,李默,李晓东. 基于 AHP 的新疆土地利用综合承载力研究[J]. 云南地理环境研究,2007,19(3):114-118.

[17] Pontius S J, Laura C S. Land-cover change model validation by an ROC method for the Ipswich watershed, Massachusetts, USA [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2001,85(1/2/3):239-248.

[18] 周锐,苏海龙,王新军,等. CLUE-S 模型对村镇土地利用变化的模拟与精度评价[J]. 长江流域资源与环境,2012(2):174-180.

[19] pontius J. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, 66(8):1011-1016.

[20] 艾乔. 基于 GIS 的风景区生态敏感性分析评价研究[D]. 重庆:西南大学,2007.