

# 陕西关中地区水资源的可持续发展支持能力

王菊翠<sup>1,2</sup>, 仵彦卿<sup>2</sup>, 党碧玲<sup>1</sup>, 胡安焱<sup>1</sup>, 杨磊<sup>3</sup>, 杨海燕<sup>4</sup>

(1 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054; 2 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048

3 陕西省兴平市环境监测站, 陕西 兴平 713100; 4 陕西省咸阳市环境监测站, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 在阐述水资源支持能力涵义的基础上, 计算了关中地区生态需水量、75%保证率时可利用水量、75%保证率时总需水量以及水资源支持能力的供需平衡指数。结果表明: 关中地区生态需水量 2005 年为  $43\ 699 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2010 年为  $44\ 119 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2015 年为  $44\ 394 \times 10^8\text{ m}^3$ ; 2005 年 75% 保证率时可利用水量为  $49\ 885 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2010 年为  $49\ 466 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2015 年为  $49\ 190 \times 10^8\text{ m}^3$ ; 2005 年 75% 保证率时总需水量为  $94\ 26 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2010 年为  $86\ 63 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2015 年为  $84\ 22 \times 10^8\text{ m}^3$ 。最后计算水资源支持能力的供需平衡指数, 2005、2010、2015 年, 供需平衡指数小于 0 说明流域可供的水资源量不具备对这样规模的社会经济系统的支撑能力, 流域水资源对应的人口及经济规模是不可承载的, 供需平衡的差值主要靠侵占河道内的生态需水量来实现的, 河道内的生态破坏就是很好的证据。

**关键词:** 生态需水量; 社会经济需水量; 可利用水资源量; 支持能力

**中图分类号:** TV 211; TV 213 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)02-0177-08

## Water Resources Supporting Capacity for Sustaining Development in Guanzhong Region, Shaanxi Province, China

WANG Ju-cui<sup>1,2</sup>, WU Yan-qing<sup>2</sup>, DANG Bi-ling<sup>1</sup>, HU An-yan<sup>1</sup>,  
YANG Lei<sup>3</sup>, YANG Hai-yan<sup>4</sup>

(1. School of Environmental Sciences and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. School of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710048,

Shaanxi, China; 3. Station of Environment Monitoring of Xingping City, Xingping 713100, Shaanxi, China;

4. Station of Environment Monitoring of Xianyang City, Xianyang 712000, Shaanxi, China)

**Abstract** This paper firstly explicates the idea of regional Water resources supporting capacity, and then calculates the ecological water requirement, the available water resources, the total water demand and Index of Water Supply and Demand. By calculating, the ecological water requirement is  $43\ 699 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2005,  $44\ 119 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2010, and  $44\ 394 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2015 respectively, the available water resources is  $49\ 885 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2005,  $49\ 466 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2010, and  $49\ 190 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2015 respectively; the total water demand is  $94\ 26 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2005,  $86\ 63 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2010, and  $84\ 22 \times 10^8\text{ m}^3$  in 2015 in Guanzhong region. Finally, the formula is applied to calculate the Ib in 2005, 2010 and 2015 which are negative so that the available water resources can not support Social-economic system in Guanzhong region. The industry and agriculture demand for water resources mainly depended on using the ecological water in river leading to the damage of primitive ecological system in river.

**Key words:** ecological water requirement; water demand for socio-economic; available water resources; supporting capacity

## 0 引言

自然环境的变化和人类对资源的不合理利用

加剧了水的危害问题, 包括洪水灾害、干旱、水污染的问题, 这些问题已危及人类基本生境和国家发展利益。其中, 水资源安全问题是最为重要的一个方

收稿日期: 2008-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10572090); 陕西省自然科学基金项目 (2006D16)

作者简介: 王菊翠 (1971-) 女, 陕西周至人, 西安理工大学工学博士研究生, 长安大学讲师, 从事水资源与环境研究。E-mail: wjwcuisw@sina.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面,水资源安全通常指水资源(量与质)供需矛盾产生的对社会经济发展、人类生存环境的危害问题。如何量度水资源安全程度和如何保证水资源安全,水资源支持能力是评价水资源安全的一个基本度量。水资源支持能力可定义为在一定的水资源开发利用阶段,满足生态需水的可利用量能够维系该地区有限发展目标最大的社会-经济规模<sup>[1-3]</sup>。图 1 是一种量化水资源支持能力的系统关系图。

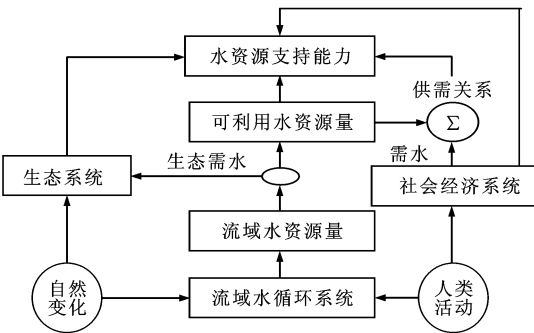


图 1 量化水资源支持能力的系统关系  
Fig. 1 System Relation of Water Resources Supporting Capacity for Regional Development

1 关中地区概况及水资源总量

关中地区位于陕西省中部,黄河的最大支流渭河横贯其间。它西起宝鸡,东到黄河,南依秦岭,北傍渭北低山,是陕西省人口最集中的地区,全区人口占全省人口总数的 59.9%。该地区农业自然条件优越,耕地面积  $175.84 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,人均耕地面积  $0.086 \text{ hm}^2$ ,是全省最重要的农耕区。本区自产水资源总量为  $68.722 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中地表水资源量  $60.392 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,地下水资源量  $48.701 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,两者之间相互转化的重复量  $35.532 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,区外补给重复量  $4.839 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。本区人均占有水资源量  $326 \text{ m}^3$ ,相当于全国平均水平( $2.300 \text{ m}^3$ )的 14.1%;每公顷耕地占有水资源量  $4.290 \text{ m}^3$ ,相当于全国平均水平( $23.715 \text{ m}^3$ )的 18.1%。由此看来,关中地区属于水资源严重贫乏区。

关中地区区外入境的河川径流量主要为渭河、泾河、洛河、漆水河、千河、金陵河等主要河流及支流的入境水量,平均年入境客水量为  $35.759 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中渭河  $20.577 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,泾河  $14.637 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,北洛河  $0.545 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

除了本地流经的水资源量外,人工跨流域调水量可以增加本流域的水资源总量。

关中地区水资源总量为自产水资源量与入境水量之和再加上人工跨流域调水。由于流域降水和径流形成的不确定性,该地区对应不同保证率的水资源量。该地区 75%保证率自产水资源量与入境水量之和为  $104.481 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在 3 种调水方案中,只有引洮济渭在近期是现实可行的,其调水量约为  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ <sup>[3]</sup>,其水资源总量为  $114.481 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2 生态需水量计算

生态需水量是指水资源短缺地区为了维系生态系统生物群落基本生存和河流、湖泊等一定生态环境质量的最小水资源需求量<sup>[4-7]</sup>。根据其定义,结合关中地区的地理环境特征,对关中地区的生态需水类型进行界定和分类。

关中地区地处渭河流域及其支流系统,水系发育,两侧为南北山森林覆盖,且陕西 3 大城市均位于本地区之中,是人工生态系统和天然生态系统复合而成。根据生态系统的组成成分将生态需水划分为 3 类:河道外的生态需水、河道内的生态需水和城市生态需水(图 2)。

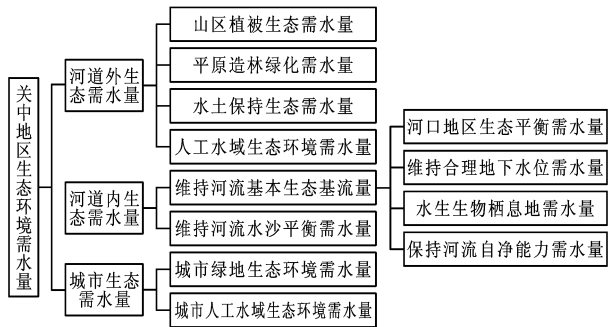


图 2 关中地区生态环境需水量分类组成  
Fig. 2 Components of Water Resources Demand in Guangzhong Region, Shaanxi Province

2.1 城市生态需水

城市生态需水指为维持城市环境的蒸散发而需要的水量,主要包括城市人工水域生态需水、城市绿化与园林建设需水。就各城市而言,城市生态需水的统计数据主要来自城市公共绿地、专用绿地、生产绿地、防护绿地之和。园林绿地生态需水,按不同水平年绿地规划面积和需水定额的乘积加以计算。人工水域生态需水指人工水域由于自然的蒸发作用,为维持一定的水位须向湖泊注入一定的水量,这部分水量就是湖泊生态需水。计算方法根据公式

$$W_c = A \times (E - P)$$

(1)

式中:  $W_c$  为城市水域生态需水量;  $A$  为城市水域面积;  $E$  为水面多年平均蒸发量;  $P$  为多年平均降水量。上述二者之和为城市生态需水量。

根据上述的计算方法和文献[ 8], 现状水平年(2005 年)城市的绿地面积为 7 600  $\text{hm}^2$ , 需水定额 2 600  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 则现状水平年城市绿地生态需水量为 0 197 6 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。现状水平年城市水域面积为 6 700  $\text{hm}^2$ , 多年平均降水量为 550. 05 mm, 水面多年平均蒸发量为 854. 30 mm。

根据公式(1)计算出城市水域生态需水量为 0 203 847 5 $\times 10^8 \text{ m}^3$ , 则 2005 年城市生态需水量是 0 401 447 5 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。2010 年城市的绿地面积为 13 600  $\text{hm}^2$ , 需水定额 2 500  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 则 2010 年城市绿地生态需水量为 0 34 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。2010 年城市水域面积为 8 900  $\text{hm}^2$ , 根据式(1)计算出城市水域生态需水量为 0 270 78 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。则 2010 年城市生态需水量是 0 610 78 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。2015 年城市的绿地面积为 17 100  $\text{hm}^2$ , 需水定额 2 400  $\text{m}^3/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ , 则 2015 年城市绿地生态需水量为 0 410 4 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。2015 年城市水域面积为 9 700  $\text{hm}^2$ , 根据式(1)计算出城市水域生态需水量为 0 295 122 5 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。则 2015 年城市生态需水量是 0 705 522 5 $\times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 1 河道外的生态需水

Tab. 1 Ecological Water Requirement Outside Riverway

项目	地带性植被			水土保持			人工水域		
	2005	2010	2015	2005	2010	2015	2005	2010	2015
面积/ $10^4 \text{ hm}^2$	59. 83	65. 47	66. 97	41. 87	49. 37	59. 37	0. 52	0. 52	0. 55
需水定额/( $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ )	150	150	150	160	160	160	304. 25	304. 25	304. 25
生态需水/ $10^8 \text{ m}^3$	0. 89	0. 98	1. 00	0. 67	0. 79	0. 95	0. 016	0. 016	0. 017

2.3 河道内的生态需水

河道内的生态需水是指为保护和改善河流水体水质, 维护河流水沙平衡、水盐平衡及河口地区生态环境平衡所需要的水量。足够流动的水是使河流具有生态和环境功能的基础, 为了维护河流生态环境的天然结构和功能, 河流系统生态环境需水量主要应包括: ①维持水(湿)生生物栖息地所需的水量; ②维持河口地区生态平衡所需的水量; ③维持河流系统水沙平衡的输沙入海水量; ④维持河流系统水盐平衡的入海水量; ⑤保持河流系统一定的稀释净化能力的水量; ⑥保持水体调节气候、美化景观等功能而损耗的蒸发量; ⑦维持合理的地下水

2.2 河道外的生态需水

河道外的生态需水主要指植被生态建设需水, 其中包括水土保持生态需水、平原造林绿化需水、山区植被生态需水以及水库等人工水域生态需水。水土保持生态需水是指由于水土保持措施而减少了降雨径流量, 这部分减少的径流量大部分通过入渗转化为土壤水, 用于植物生长所必需的蒸散而消耗, 所以这部分水量应计入生态需水。其计算方法为水土保持面积和植被蒸散量的乘积。平原造林绿化主要分布在田间地头, 这部分植物生长所必需的蒸散而消耗水量主要来源于农业灌溉的残余水量, 这里不再重复计算。人工水域生态需水是指由于水域自然蒸发作用而消耗的水量, 计算方法为水域面积和蒸发量与降水量差值的乘积。山区植被生态需水主要是指山区植被蒸散所需要的水分, 其生态需水通过获取的每一种植被的分布面积和其蒸散量的乘积加以计算。植被的分布面积通过航片获取, 蒸散量通过仪器来测量。这一部分工作量很大, 笔者采用陕西省水利厅和水土保持局提供的资料为依据进行估算。

不同植被蒸散量不同, 利用水利部门平均统计数据来估算现状水平年(2005 年)河道外的生态需水量为 1. 576 $\times 10^8 \text{ m}^3$ , 2010 年为 1. 786 $\times 10^8 \text{ m}^3$ , 2015 年为 1. 967 $\times 10^8 \text{ m}^3$ (表 1)。

位所必需的入渗补给水量等<sup>[5]</sup>。河流系统的生态环境需水量并不是上述分量的简单加和, 而是根据其相互关系来分析确定。关中地区河道内的生态需水主要包括两个方面的内容: ①河流的基本生态基流量, 即维持年内各时段的河川径流量在一定的水平上。这一部分包括了维持水(湿)生生物栖息地、维持河口地区生态平衡、维持合理的地下水位所需的水量和保持河流一定的自净能力; ②河流输沙需水量, 是指维持河流形态的动态平衡, 在一定的输沙要求下所需要的水量。汛期的输沙量约占全年输沙量的 80%以上, 河流的输沙功能主要在汛期完成<sup>[4]</sup>。而汛期输运水量的作用不仅是输送泥

沙,而且输送污染物,来水流量的大小直接影响着河流携带污染物的能力。渭河远离海洋,不存在维持河流系统水盐平衡的入海水量。保持河流的基本生态基流量,维持河流输沙需水量,这两方面足以维护渭河流域生态环境的天然结构和功能,渭河流域在 20 世纪 60~70 年代没有遭到人类的破坏。笔者选用这段时期的基流量和输沙水量来计算生态需水量。

2.3.1 河流的基本生态基流量

河流的基本生态基流量主要用以维持水生生物的正常生长、保持合理的地下水位、维持河口三角洲湿地生态系统稳定和保持河流一定的自净能力等方面的要求。以河流早期最小月平均实测径流量的多年平均值作为河流的基本生态基流量。计算式如下

$$W_b = 31\,536\,000\,s \times \frac{\sum_{i=1}^n \min Q_{ij}}{n} \quad (2)$$

式中:  $W_b$  为基本生态基流量 ( $m^3$ );  $n$  为统计年数;  $Q_{ij}$  为第  $i$  年 第  $j$  月的月平均流量 ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )。

笔者取 1964~1983 年的水文资料来计算基本生态基流量。由式(2)计算出渭河流域在关中地区的基本生态基流量为  $3\,579\,5 \times 10^8\,m^3$ 。其计算结果如表 2。

表 2 渭河流域在关中地区的基本生态基流量  
Tab. 2 Ecological Water Requirement for Maintaining Base Fiows of River System in Weihe River Basin of Guanzhong Region Shaanxi Province

河流	测站	最小月平均 流量/ ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	基本生态基 流量/ $10^8\,m^3$	统计年份
渭河林家村	林家村	4.266 2	1.345 4	1964~1983
千河	千阳	0.670 2	0.211 4	1964~1983
石头河	鸛鸽	0.264 6	0.083 4	1964~1983
黑河	黑峪口	2.462 8	0.776 7	1964~1983
沔河	秦渡镇	0.107 6	0.034 0	1964~1983
灞河	马渡王	0.478 8	0.151 0	1964~1983
泾河	桃园	1.007 9	0.317 8	1964~1983
北洛河	状头	2.092 2	0.659 8	1964~1983

注:数据来源文献[9],统计年份缺 1968、1970 年的资料

2.3.2 河流输沙需水量

水沙平衡是通过减沙增水的综合措施来保持多沙河流的河道水沙动力特性基本稳定,防止输沙水动力不足导致的河道萎缩。为了维持水沙平衡,必须具备一定的水动力条件使河流具有与之相匹配的水量,笔者把这部分水量称之为河流输沙需水

量。渭河位于黄土地区,水土流失严重,加上上游用水挤占下游用水,使渭河下游河床变宽,河道摇摆不定。汛期的输沙量占全年输沙量的 80% 以上。充分利用汛期较大的洪水量来完成输沙要求,有利于水资源的最大限度利用。笔者把它作为河流生态需水的一部分,计算公式为

$$W_{\text{sand}} = S_t / C_{\text{max}} \quad (3)$$

$$C_{\text{max}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \max(C_{ij}) \quad (4)$$

式中:  $W_{\text{sand}}$  为输沙用水量;  $S_t$  为多年平均输沙量;  $C_{\text{max}}$  为多年最大月平均含沙量的平均值;  $C_{ij}$  为第  $i$  年 第  $j$  月的月平均含沙量;  $n$  为统计年数。

笔者取 1964~1983 年的水文资料来计算河流输沙需水量。由公式(3)计算出渭河流域在关中地区的输沙需水量为  $38.142\,4 \times 10^8\,m^3$ 。其计算结果如表 3。

表 3 关中地区渭河流域输沙需水量  
Tab. 3 Ecological Water Requirement for Preventing Sedimentation of River System in Weihe River Basin of Guanzhong Region Shaanxi Province

河流	测站	输沙量/ $10^8\,t$	含沙量/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	输沙需水 量/ $10^8\,m^3$	统计年份
渭河	林家村	1.428 9	232.21	6.154	1964~1983
千河	千阳	0.038 5	51.73	0.745	1964~1983
石头河	鸛鸽	0.001 3	0.64	2.049	1964~1983
黑河	黑峪口	0.003 3	0.95	3.436	1964~1983
沔河	秦渡镇	0.022 1	1.32	16.700	1964~1983
灞河	马渡王	0.023 8	31.02	0.767	1964~1983
泾河	桃园	2.419 7	386.74	6.254	1964~1983
北洛河	状头	0.740 5	363.56	2.037	1964~1983

注:数据来源于文献[9]

文献[10] 中把生态需水定义为可持续发展条件下生态系统所需的水量,因此,河道内的生态需水量在不同的水平年是不变的,城市生态需水量和河道外的生态需水量在不同的水平年根据规划目标的不同是变化的。通过初步估算,关中地区现状水平年(2005 年)生态需水量为上述三者之和,是  $43.699\,303\,5 \times 10^8\,m^3$ ,2010 年生态需水量为  $44.118\,635 \times 10^8\,m^3$ ,2015 年生态需水量为  $44.394\,378 \times 10^8\,m^3$ 。

3 可利用水资源量计算

流域可利用水资源量是指在经济合理、技术可行和生态环境容许的条件下,通过技术措施可以利用的不重复的一次性水资源量。在概念上,需要扣

除维系生态环境最小的需水量, 以保证生态环境容许的前提条件。因此, 可利用水资源量可以通过流域可更新恢复的地表水与地下水资源总量加上境外调水扣除生态需水量加以估算。

$$W_s = aW_L + W_T - W_e \tag{5}$$

式中:  $W_s$  为可利用水资源量;  $a$  为反映工程技术措施的开发利用系数;  $W_L$  为自产水资源量和入境水量之和;  $W_T$  为调水量;  $W_e$  为生态需水量。

2005 年和 2010 年关中秦岭北侧支流受工程条件的影响, 开发难度大, 笔者开发利用系数  $a$  取 80%。则在 2005 年关中地区 75% 保证率可利用水资源量为  $49\,885\,496.5 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2010 年为  $49\,466\,165 \times 10^8\text{ m}^3$ , 2015 年为  $49\,190\,422 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

4 社会经济需水总量的计算

流域社会经济发展规模水平可以用人口数量、国民生产总值等指标来衡量。因此, 它们对水资源的需求包括: 人口需水、工业需水、农业需水, 需水量的要素组成见图 3。社会经济发展对水资源需求总量可表达为

$$W_D = W_P + W_I + W_A \tag{6}$$

式中:  $W_D$  为水资源需水总量;  $W_P$  为人口需水量;  $W_I$  为工业需水量;  $W_A$  为农业需水量。

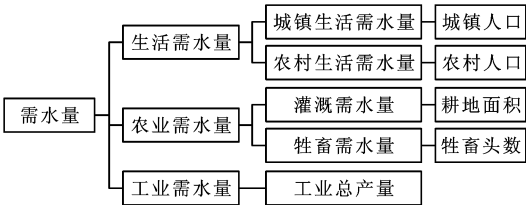


图 3 需水量的要素组成

Fig. 3 Sketch Map of the Components of Water Resource Demand

不同的需水量其预测方法是不同的<sup>[11]</sup>, 笔者采用定额法, 对需水量要素组成应用一种时间序列分析法, 不去探究其内部诸多因素相互影响的复杂关系, 而仅从时间序列灰色变量本身挖掘有用信息, 从而探求其内在规律, 无疑, 灰色预测是最佳选择。

4.1 GM(1, 1)模型

灰色预测是灰色系统理论与技术的重要组成部分, 在灰色预测中应用最广泛的是 GM(1, 1)模型。通过分析关中地区 1989~2001 年需水量变化趋势及特征, 视关中地区需水量为随机数据时间序

列, 满足 GM(1, 1)模型适用范围, 从而可较精确地给出短期甚至中长期的预报结果<sup>[12-14]</sup>。

若存在时间序列

$$x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\} \tag{7}$$

则  $x^{(0)}$  的灰色预测模型<sup>[15]</sup> 为

$$x^{(0)}(k+1) = (1 - e^{-a}) \left[ x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} \tag{8}$$

$(k = 1, 2, \dots)$

式中:  $a$  和  $u$  为参数, 取值参照文献[15]。

为判别模型优劣, 必须经过统计检验, 才能确立其预测精度等级。通常情况下, 使用后验差检验法和小误差概率检验。令

$$e(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k), (k = 1, 2, \dots, n) \tag{9}$$

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e(k), \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k) \tag{10}$$

$$\left. \begin{aligned} s_1^2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2 \\ s_2^2 &= \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [e(k) - \bar{e}]^2 \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

若  $c = \frac{s_2^2}{s_1^2} < 0.35, p = P[|e(k) - \bar{e}| < 0.6745s_1] \geq 0.95$ , 则认为预测模型满足一级模型。表 4 是预测模型精度等级<sup>[15]</sup>。若  $c < c_0, p > p_0$ , 则模型为相对应精度的模型。

表 4 预测模型精度等级

Tab. 4 Precision Assessment Classifications of Grey Model Based on the Possibility Exam of Computing Mean and Variance

项目	好	合格	勉强	不合格
均方差比值	< 0.35	< 0.50	< 0.65	≥ 0.65
小误差概率/%	> 95	> 80	> 70	≤ 70

4.2 模型的改进

关中地区 1989~2001 年水资源需求量指标体系变量参数如表 5。

从表 5 中可以看出, 关中地区水资源需求量要素组成变量参数基数大, 整个时间序列总体呈增长趋势, 序列数据之间差距大。为了提高 GM(1, 1)模型的精度, 采用一种改变背景值的新方法——中心逼近式灰色 GM(1, 1)模型<sup>[16]</sup>。根据该模型的几何意义, 设  $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$  为非负离散点列, 其一次累加序列为  $x^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$ , 对累加序列  $x^{(1)}$  的每点开  $m$  次方(弱化序列变化的幅度), 记为

$$x_m^{(1)} = \{x_m^{(1)}(1), x_m^{(1)}(2), \dots, x_m^{(1)}(n)\} \tag{12}$$

表 5 关中地区 1989~2001 年水资源需求量变量参数

Tab. 5 Parameters of Water Resource Demand in Guanzhong Region From 1989 to 2001

年份	非农业 人口/人	农业 人口/人	耕地 面积/hm <sup>2</sup>	工业总产值/ 10 <sup>4</sup> 元	大牲畜头数/ 10 <sup>4</sup> 头
1989	4 442 660	14 407 798	1 882 333		
1990	4 546 210	14 774 580	1 870 073		324.066 6
1991	4 663 730	14 885 828	1 857 807	4 178 848	329.547 5
1992	4 781 253	14 997 077	1 836 133	4 899 158	343.610 0
1993	4 886 331	15 112 936	1 812 873	5 646 246	353.562 5
1994	5 041 457	15 200 089	1 782 440	6 393 335	373.830 0
1995	5 201 690	15 253 312	1 758 247	7 036 077	389.674 5
1996	5 361 925	15 306 535	1 734 020	7 678 820	405.519 1
1997	5 526 586	15 325 950	1 709 893	8 253 873	473.758 3
1998	5 636 172	15 370 142	1 686 673	7 712 417	335.052 7
1999	5 741 916	15 410 495	1 677 860	8 723 686	351.090 6
2000	5 947 207	15 566 881	1 647 000	9 643 488	389.895 6
2001	6 073 385	15 570 035	1 609 860	9 329 425	407.508 3

注:数据来源于文献 [17]

记  $\hat{\alpha}_m^{\frac{1}{m}}\left(k+\frac{1}{2}\right)=\frac{1}{2}\left(x_m^{\frac{1}{m}}(k+1)+x_m^{\frac{1}{m}}(k)\right)$

$k=1,2,\cdots,n-1$

对  $x_m^{\frac{1}{m}}=\left\{x_m^{\frac{1}{m}}\left(1+\frac{1}{2}\right), x_m^{\frac{1}{m}}\left(2+\frac{1}{2}\right), \cdots, x_m^{\frac{1}{m}}\left(n-\frac{1}{2}\right)\right\}$  建立微分方程模型

$\frac{\mathrm{d} x^{(1)}(t)}{\mathrm{d} t}+a x^{(1)} t=u$  (13)

其离散形式的时间序列函数式为

$x_m^{\frac{1}{m}}(k+1)=\left[x_m^{\frac{1}{m}}(1)-\frac{u}{a}\right] e^{-a k}+\frac{u}{a}$   
 $k=0,1,\cdots,n-1$  (14)

利用最小二乘法求解参数  $a, u$

$a=\left[a, u\right]^{\mathrm{T}}=\left(B^{\mathrm{T}} B\right)^{-1} B^{\mathrm{T}} Y_N$

其中  $B=\left[\begin{array}{cc} -\hat{\alpha}_m^{\frac{1}{m}}\left(1+\frac{1}{2}\right) & 1 \\ -\hat{\alpha}_m^{\frac{1}{m}}\left(2+\frac{1}{2}\right) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\hat{\alpha}_m^{\frac{1}{m}}\left(n-\frac{1}{2}\right) & 1 \end{array}\right]$

$Y_N=\left[\begin{array}{c} x_m^{\frac{1}{m}}(2)-x_m^{\frac{1}{m}}(1) \\ x_m^{\frac{1}{m}}(3)-x_m^{\frac{1}{m}}(2) \\ \vdots \\ x_m^{\frac{1}{m}}(n)-x_m^{\frac{1}{m}}(n-1) \end{array}\right]$

根据时间响应函数式(14)求出  $x_m^{\frac{1}{m}}$  的预测值  $\hat{x}_m^{\frac{1}{m}}$ , 对此值  $m$  次方, 再作累减生成得到  $x^{(0)}$  的预测值。根据精度要求调整  $m$  值, 达到精度要求为目的, 笔者选  $m=2$ 。

4.3 模型预测与检验

文献[11]分别对非农业人口、农业人口、耕地面积、工业总产值和牲畜头数采用 GM(1, 1)模型和改进的 GM(1, 1)模型进行了精度验证, 除了牲畜头数以外, 其他 2 种模型均满足精度要求, 显然改进的模型比传统模型精度提高。笔者采用改进模型对 1989~2001 年水资源需求量要素组成变量参数进行预测, 利用 VisualBasic 编制算法程序, 分别对原始数据进行处理, 并取得结果。

关中地区 5 地市 1989~2001 年的非农业总人口见表 5。利用中心逼近式灰色 GM(1, 1)模型, 对关中地区 2005、2010、2015 年的非农业总人口进行预测, 非农业人口 2005 年为 6 784 729 人, 2010 年为 7 756 445 人, 2015 年为 8 867 345 人。

为了检验模型的精度, 以非农业人口为例, 采用后验差检验法和小误差概率检验法。

$\bar{e}=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e(k)=278.2308$

$\bar{x}=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)=5219.271$

$s_1^2=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n\left[x^{(0)}(k)-\bar{x}\right]^2=2.70812 \times 10^{11}$

$s_1=520396.0031$

$s_2^2=\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n[e(k)-\bar{e}]^2=538952726.8$

$s_2=28964.68068$

$c=\frac{s_2}{s_1}=0.056<0.35$

$p=100 \% > 95 \%$

农业人口、耕地面积、工业总产值和牲畜头数的预测和检验同上, 结果如表 6、7。

表 6 模型预测结果

Tab. 6 Result of the Prediction					
年份	非农业 人口/人	农业 人口/人	耕地面积/ hm <sup>2</sup>	工业总产值/ 10 <sup>4</sup> 元	大牲畜头 数/10 <sup>4</sup> 头
2005	6 784 729	15 889 293	1 536 947	12 792 147	425.510 2
2010	7 756 445	16 248 063	1 436 887	17 630 695	454.954 2
2015	8 867 345	16 614 932	1 343 339	24 299 403	486.435 1

通过预测检验, 其中非农业人口、农业人口、耕

表 7 模型检验结果  
Tab. 7 Result of the Test

分项	非农业人口	农业人口	耕地面积	工业总产值	大牲畜头数
均方差比值	0.056	0.147	0.31	0.241743	0.85
小误差概率/%	100	100	100	100	77
模型等级	一级	一级	一级	一级	不合格

地面积、工业总产值预测模型满足一级模型, 等级为好。牲畜头数预测模型为不合格模型, 分析其原因, 主要是因为时间序列数据不完全符合指数规律。通过牲畜头数 30 年的数据可以看出基本呈现线形上升趋势, 通过线形回归方法求解。回归得出的 2005、2010、2015 年的牲畜头数, 即:

牲畜头数(2005 年)=4 307 740 头

牲畜头数(2010 年)=4 611 315 头

牲畜头数(2015 年)=4 914 890 头

4.4 2005、2010、2015 年生活需水量与工农业需水量

预测年需水量可根据不同预测年的要素组成变量参数数值和用水定额加以计算<sup>[11]</sup>。

生活需水量: 包括城市生活需水量和农村生活需水量。预测 2005 年农村人口将大致为 15 889 293 人, 用水定额每人为 45 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 2 61×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城镇人口大致在 6 784 729 人, 用水定额每人为 150 L · d<sup>-1</sup>, 城镇居民生活需水量为 3.71×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城市公用设施用水按居民生活用水的 10% 计算, 则公用设施需水 0.371×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2005 年关中地区生活需水量为 6 70×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

2010 年农村人口将大致为 16 248 063 人, 用水定额每人为 55 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 3.26×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城镇人口大致为 7 756 445 人, 人均用水定额为 158 L · d<sup>-1</sup>, 城镇居民生活需水量为 4 47×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城市公用设施用水按居民生活用水的 15% 计算, 则公用设施需水 6 709 71×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2010 年关中地区生活需水量为 8 40×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

2015 年农村人口将大致为 16 614 932 人, 用水定额每人为 70 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 4.24×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城镇人口大致为 8 867 345 人, 人均用水定额为 185 L · d<sup>-1</sup>, 城镇居民生活需水量为 5 99×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。城市公用设施用水按居民生活用水的 15% 计算, 则公用设施需水 0.90×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。2015 年关中地区生活需水量为 11.13×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

工农业需水量: 包括工业和农业需水量。预计

2005 年关中地区工业总产值达 12 792 147 万元, 随着水的重复利用率提高, 预计 2005 年工业用水万元增加值用水量 84 m<sup>3</sup>, 工业总用水量达到 10.75×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2010 年工业总产值达 17 630 695 万元, 随着水的重复利用率提高, 工业用水万元增加值用水量为 59 m<sup>3</sup>, 工业总用水量达到 10 40×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2015 年工业总产值达 24 299 403 万元, 随着水的重复利用率提高, 工业用水万元增加值用水量为 47 m<sup>3</sup>, 工业总用水量达到 11.42×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

农业需水量包括灌溉用水量与牲畜饮水量。预计到 2005 年关中地区耕地面积达到 1 536 947 hm<sup>2</sup>, 水的有效利用系数 0.52, 用水定额为 4 950 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 在 75% 保证率下, 农田灌溉需水量为 76 07×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2010 年关中地区耕地面积达到 1 436 887 hm<sup>2</sup>, 水的有效利用系数提高到 0.56, 用水定额为 4 650 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 在 75% 保证率下, 农田灌溉需水量为 66 82×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2015 年关中地区耕地面积达到 1 343 339 hm<sup>2</sup>, 水的有效利用系数提高到 0.60, 用水定额为 4350 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 在 75% 保证率下, 农田灌溉需水量为 58.43×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。预测 2005 年关中地区大牲畜将达到 4 307 740 头(为了计算方便, 将小牲畜的头数折算为大牲畜头数, 大牲畜的饮水量为 2 4 头小牲畜的饮水量), 用水定额每头为 48 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 0 74×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2010 年大牲畜将达到 4 611 315 头, 用水定额每头为 60 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 1 01×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。2015 年大牲畜将达到 4 914 890 头, 用水定额每头为 66 L · d<sup>-1</sup>, 需水量为 3.24×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。

2005、2010、2015 年总需水量: 农业灌溉用水因保证率变化而变化, 其他用水统一以 100% 满足来计算, 到 2005 年关中地区 75% 保证率时总需水量为 94 26×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。在各用水部门中, 农业需水量占总需水量的 81.49%, 工业用水占 11.40%, 生活用水占 7.11%。2010 年关中地区 75% 保证率时总需水量为 86.63×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。在各用水部门中, 农业需水量占总需水量的 78.30%, 工业用水占 12.01%, 生活用水占 9.70%。2015 年关中地区 75% 保证率时总需水量为 84 22×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。在各用水部门中, 农业需水量占总需水量的 73.22%, 工业用水占 13.60%, 生活用水占 13.22%。

5 水资源支持能力的平衡指数计算

水资源支持能力的供需平衡指数可定义为

$$I_b = (W_s - W_D) / W_s = 1 - W_D / W_s \quad (15)$$

式中: $I_b$  为水资源支持能力供需平衡指数; $W_s$  为可利用水资源量; $W_D$  为水资源需水总量。

当流域可利用水量小于流域社会经济系统的需水量时,即  $W_s < W_D$ , 有  $I_b < 0$ , 这说明流域可供的水资源量不具备对这样规模的社会经济系统的支撑能力,流域水资源对应的人口及经济规模是不可承载的。反过来,当流域可供水量大于等于流域社会经济系统的需水量时,  $W_s \geq W_D$ ,  $I_b \geq 0$ , 这说明流域可供的水资源量具备对这样规模的社会经济系统的支撑能力,流域水资源对应的人口及经济规模是可承载的,供需为良好状态。

2005、2010、2015 年,  $I_b < 0$ , 说明流域可供的水资源量不具备对这样规模的社会经济系统的支撑能力,流域水资源对应的人口及经济规模是不可承载的。根据文献[18], 2005 年关中地区可供水量包括农田灌溉需水量  $24.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 林牧渔业用水  $4.132465 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 工业用水  $9.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 城镇公共用水量  $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 居民生活用水量  $6.09 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 总供水量  $46.26 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2005 年关中地区总需水量为  $92.34 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 供水量小于需水量,供需差值为  $46.08 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 这和通过理论计算的结果基本吻合,需水量差值主要依靠侵占河道内的生态需水量(包括河流基流量和输沙需水量)来实现,河道内的生态破坏就是很好的证据。

6 结语

2005、2010、2015 年,  $I_b < 0$ , 说明流域可利用的水资源量不具备对这样规模的社会经济系统的支撑能力。社会经济系统用水主要依靠侵占生态环境系统需水来实现的,渭河河道不时出现断流就是很好的证据。在保障生态用水的前提下,通过两方面提高水资源的支撑能力。一方面通过节约用水减少需水量;另一方面可以适当开源,如开采北山

的岩溶水、秦岭北坡建地下水库等。

参考文献:

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

[2] 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.

[3] 陕西省水利厅.陕西省水资源开发利用规划[R].西安:陕西省水利厅,2001.

[4] 石伟,王光谦.黄河下游生态需水量及其估算[J].地理学报,2002,57(5):595-602.

[5] 李丽娟,郑红星.海滦河流域河流生态系统生态环境需水量计算[J].地理学报,2000,55(4):495-500.

[6] 王芳,梁瑞驹,杨小柳,等.中国西北地区生态需水研究(1)干旱半干旱地区生态需水理论分析[J].自然资源学报,2002,17(1):1-8.

[7] 陈丽华,王礼先.北京市生态用水分类及森林植被生态用水定额的确定[J].水土保持研究,2001,8(4):161-164.

[8] 陕西省建设厅.陕西省城镇体系规划(2000~2020)专题研究[R].西安:陕西省建设厅,2001.

[9] 水利部黄河水利委员会.中华人民共和国水文年鉴·泾洛渭区(1964~1983)[R].郑州:水利部黄河水利委员会,1983.

[10] 王菊翠,丁华,胡安焱.陕西关中地区生态需水量的初步估算[J].干旱区研究,2008,25(1):22-27.

[11] 王菊翠,曹明明,仵彦卿.预测陕西关中地区需水量的改进GM(1,1)模型[J].干旱区地理,2006,29(1):35-41.

[12] 吉培荣,黄巍松,胡翔勇.灰色预测模型特性的研究[J].系统工程理论与实践,2001(9):105-108.

[13] 李玲,施勇.一种新的时间序列综合分析和应用[J].水科学进展,2000,11(4):451-456.

[14] 吴光红,薛纪渝,张德森.北海市地下水资源与可持续发展[J].西北水资源与水工程,1999,10(3):7-13.

[15] 聂相田,邱林,朱普生,等.水资源可持续利用管理不确定性分析方法及应用[M].郑州:黄河水利出版社,1999.

[16] 宋中民,同小军,肖新平.中心逼近式灰色GM(1,1)模型[J].系统工程理论与实践,2001(5):110-113.

[17] 陕西省统计局.陕西省统计年鉴(1990~2002)[R].西安:陕西省统计局,2002.

[18] 陕西省水利厅.陕西省水资源公报(2005)[R].西安:陕西省水利厅,2005.