

西北地区水资源承载力宏观多目标情景分析与评价^{*}

朱一中, 夏 军, 王纲胜

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘 要: 采用多目标情景分析方法和综合评判方法, 从面域尺度对西北地区 2010、2020 年不同情景方案下的水资源承载力进行了预测分析和评价。预测结果表明, 西北地区社会经济用水将在现在基础上继续增加, 但增加幅度有限, 通过提高用水效率、调整产业结构、控制灌溉面积发展等综合措施, 西北地区未来可以实现逐步水资源供需平衡及生态环境和社会经济协调发展的目标。综合评价结果认为, 未来西北地区水资源承载力状况将逐步得到改善, 但中短期内仍不可能达到良好可承载的程度, 其中以 A1+B1+C2 发展情景方案为最优方案。

关键词: 水资源承载力; 多目标情景分析; 水资源承载力评价指标体系; 综合评判

中图分类号: P343 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) 03-0103-04

西北地区包括陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆等 5 个省 (自治区), 其大部分地区处于干旱、半干旱地带, 降水稀少, 蒸发能力为降水量的 4~10 倍。水资源短缺, 生态环境脆弱是西北地区社会发展面临的主要问题。水资源供应能否保证西北地区面临的未来二三十年的社会经济高速增长, 水资源承载能力 (WRCC) 能支撑多大的社会经济发展规模和维持怎样的生态环境保护标准, 回答这个问题对于西北地区的未来开发建设十分重要。本文从面域尺度对西北地区 WRCC 进行了研究, 主要研究内容是: ①对西北地区现状和未来 10 年、20 年水资源承载力总体状况进行了宏观预测评价, 可为西北未来水资源开发、社会经济发展和生态环境保护宏观决策提供依据; ②针对水资源承载力不确定性和动态性的特点, 采用了大量定性和定量分析手段对西北地区未来情景环境进行预测; ③以多目标情景分析模型和综合评判模型为核心, 并借助部门辅助模型探讨了适用于干旱半干旱区水资源承载力研究分析与评价方法的途径。

1 研究方法

1.1 多目标情景分析方法

1.1.1 情景分析 以投资和水资源的分配作为主要的驱动力因子, 考虑到投资是影响经济增长速度、环境保护和供水能力的主要因素; 而社会经济发展用水挤占生态环境用水是导致目前西北地区生态和社会发展危机的根本原因, 其中农业用水, 尤

其是灌溉用水是用水主导部门, 对社会经济用水总量有着决定性的影响。为此, 我们从国民经济发展速度 (以 A 表示)、生态环境保护规模和水资源开发利用水平 (B)、灌溉面积发展规模 (C) 三个方面定义了西北地区未来发展的几个关键情景, 以 1 和 2 表示高、低发展情景。则由固定投资率和水、生态环境投资水平影响的社会经济、供用水和生态发展将有 A1+B1, A1+B2, A2+B1, A2+B2 四种情景方案, 取 A1+B1、A2+B2 两种情景作为典型研究, 并将其与灌溉面积发展情景高、低方案 C1 和 C2 方案组合, 探讨在不同社会经济发展、生态环境保护标准、供水能力、灌溉面积变化情景下水资源承载力的变化。主要情景值描述如表 1。

1.1.2 水资源承载力多目标规划模型 水资源承载力多目标规划模型的决策变量为: 第一产业增加值 (x_1)、第二产业增加值 (x_2)、第三产业增加值 (x_3)、人口总量 (x_4)、城市化水平 (x_5)、草地增加面积 (x_6)、林地增加面积 (x_7)、灌溉面积中粮食作物种植面积比例 (x_8)。

以经济效益、社会效益和环境效益最佳为原则, 确定模型目标函数为: 人均国内生产总值 (GDP) 最大 (f_1)、污水处理达标率最大 (f_2)、林草覆盖面积最大 (f_3) 和人均粮食产量达到预期值 (f_4) 为目标函数, 分别代表经济发展程度、对社会稳定的影响及生态环境状况。

约束条件从水资源供需平衡、社会经济发展速

* 收稿日期: 2003-12-02

基金项目: 中科院知识创新工程资助项目 (KZCX1-10-03/KZCX1-09-02); 中科院“百人计划”资助项目

作者简介: 朱一中 (1969 年生) 女, 博士研究生; E-mail: zhuyz@igsnr.ac.cn

表 1 水资源承载力预测评价主要情景描述

Tah 1 Description of different scenarios of water resources carrying capacity study

年度	情景	GDP 年均 增长 /%	情景	供水量 亿 m ³	万元 GDP 用水 /m ³	万元工业增 加值用水 /m ³	农田亩均灌 溉用水 /m ³	退耕面积 万 hm ²	情景	灌溉面积 万 hm ²
2000				797	1756	335	712			732
2010	A1	8.0	B1	72	850	200	579	244	C1	868
2010	A2	6.5	B2	834	950	250	644	84	C2	731
2020	A1	7.5	B1	910	430	120	483	276	C1	923
2020	A2	4.3	B2	865	530	150	527	218	C2	736

度与结构平衡、生态环境保护和土地资源约束 3 个方面构建。

模型结构为：
$$\text{Max } g(x) = \{f_1(x), f_2(x), f_3(x), f_4(x)\} \quad (1)$$
$$\text{s.t. } x \in S, \quad x \geq 0 \quad (2)$$
多目标决策模型的求解过程实质上是生成非劣解，现采用罚款模型求解，即寻找距理想点距离最近的可行解，其前提是每个目标函数决策者都能提出一个所期望的值作为理想值，同时需要确定一组权值来反映原问题中每个目标函数在总体目标中的权重。由于粮食生产目标可以给出一个可供选择的范围，故可作为约束条件而排除出目标组进入约束条件组中。这样原多目标规划问题就转换为单目标规划问题如式 (3)，该模型可以直接采用单纯形法求解。

$$\text{Min } Z(x) = \sum_{i=1}^3 \left\{ (\lambda_i)^2 * \frac{[f_i^*(x) - f_i(x)]^2}{[f_i^*(x) - f_i^l(x)]^2} \right\}^{1/2} \quad (3)$$

$f_i^*(x)$ 、 $f_i^l(x)$ 分别为第 i 个目标函数理想值和最差值； λ_i 为第 i 个目标的权重。

1.2 水资源承载力综合评价方法

水资源承载力综合评价方法采用模糊数学中的“隶属度”构建水资源承载力综合指数，对水资源承载力基本状况进行评价。从水资源、生态环境、社会经济三个方面选取水资源承载力评价指标体系如表 2。指标权重值以层次分析法得到，并借鉴国际国内权威可持续发展相关指标值确定各单项指标评价标准值。

水资源承载力综合指数的计算过程如下：
第一步，计算单指标的可承载隶属度，设第 i 个子系统第 j 个指标 C_{ij} 值为 x_{ij} ，其可承载临界值和理想值分别为 V_{ij1} 和 V_{ij2} ，其可承载隶属度 μ_{ij} 计算函数为：

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} < V_{ij2} \\ \frac{x_{ij} - V_{ij1}}{V_{ij2} - V_{ij1}} & V_{ij2} \leq x_{ij} \leq V_{ij1} \\ 0 & x_{ij} > V_{ij1} \end{cases} \quad (4)$$

或

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 1 & x_{ij} > V_{ij2} \\ \frac{x_{ij} - V_{ij1}}{V_{ij2} - V_{ij1}} & V_{ij1} \leq x_{ij} \leq V_{ij2} \\ 0 & x_{ij} < V_{ij1} \end{cases} \quad (5)$$

表 2 水资源承载力评价指标

Tah 2 Evaluation index system of water resources carrying capacity study

准则层	权重	因素层	权重	可承载临界 状态值 (V_1)	可承载理想 状态值 (V_2)
水资源子系统 C_1	0.2326	人均水资源 C_{11} /m ³	0.6522	1700	4000
		水资源利用率 C_{12} /%	0.2174	40	20
		人均用水量 C_{13} /m ³	0.1304	800	400
生态环境子系统 C_2	0.3488	林草覆盖率 C_{21} /%	0.4086	15	60
		污水处理达标率 C_{22} /%	0.1796	20	90
		生态需水率 C_{23} /%	0.4118	25	50
社会经济发展子系统 C_3	0.4186	人口自然增长率 C_{31} /%	0.1898	0.95	0.21
		城市化水平 C_{32} /%	0.0485	20	70
		人均 GDP C_{33} /美元	0.2721	400	4000
		第三产业占 GDP 比重 C_{34} /%	0.1455	30	60
		人均粮食占有量 C_{35} /kg	0.0286	300	590
		用水效益 C_{36} / (元·m ⁻³)	0.3155	3	400

前者适应于指标越大,可承载程度越小的情况;后者适应于指标越大,可承载程度越大的情况。

第二步,对多指标反映的子系统可承载程度 L_{C_i} 可表示为:

$$L_{C_i} = \prod_{j=1}^m \mu_{ij}^{a_j}$$

(6)

其中, m 表示子系统有 m 个指标被考虑是否可承载; a_j 表示第 j 指标的指数权重。据此可分别计算水资源子系统、生态环境子系统和社会经济子系统的可承载隶属度。

第三步,计算整个系统的可承载隶属度,即水资源承载力综合指数:

$$L_C = \sum_{i=1}^n \alpha_i L_{C_i}$$

(7)

其中, n 为子系统数量, α_i 为第 i 个子系统的权重。

系统可承载隶属度 L_C 或水资源承载力综合指数是衡量水资源可承载程度或承载质量综合性指标,根据 L_C 值的大小对“可承载”程度进行分级为:0 为不可承载,0~0.2 为准不可承载,0.2~0.6 为可承载,0.6~0.8 为良好可承载,0.8~1.0 为理想可承载。水资源承载力综合指数从 0~1 的变化过程反映了水资源承载力从临界极限状态向理想状态的变化过程。

2 研究结论

2.1 水资源承载力多目标情景预测结果分析

据预测(表 3),西北地区未来水资源承载力基本状况为:2010 年、2020 年人口总规模将分别达到 1.0 亿和 1.1 亿元。高方案下 2010 国内生产总值将在现有基础上翻一番,人均 GDP 接近 1 万元;2020 年人均 GDP 达到 1.5 万元。农业在三次产业结构中的比重将由目前的 18% 下降到 2010 年的

12% 和 2020 年的 8% 左右的水平;第二产业比重变化不大,总体维持在目前的 40% 左右的水平;第三产业比重到 2020 年将上升到近 50%。在适度发展灌溉面积的前提下,到 2020 年人均粮食产量可维持在目前的 350 kg/人左右;严格控制灌溉面积发展,人均粮食产量也可接近 300 kg/人,但由于肉乳类产品的增加,居民膳食结构改变,不会导致粮食安全问题。通过退耕还林还草生态建设工程等措施,西北地区林草覆盖率将由 2000 年的 20% 提高到 2010 的 35% 左右,到 2020 进一步提高到 40% 以上。

西北地区社会经济用水量仍将继续增长,但增长幅度有限。据预测,西北地区 2010 年用水需求总量为 800 亿~849 亿 m^3 ,年均增长率在 0.004%~0.064% 之间;2010—2020 年用水需求增长进一步趋于平缓,到 2020 年总用水量约为 768 亿~861 亿 m^3 ,在经济低增长方案下用水总量甚至趋于停滞和减少。西北地区实现用水总量增长控制的主要潜力在于农田灌溉用水。在农田灌溉面积不变的情况下,通过提高灌溉水利用效率,农田灌溉用水量到 2020 年可较现状水平节水 147 亿~185 亿 m^3 。而工业用水和生活用水量将明显增加,其占总用水的比例将有较大幅度的上升。据估计,到 2020 年,农业用水比例将由目前的近 90% 降低到 80% 左右,工业用水比例则将由 6.3% 增长到 10%,生活用水比例也将由不足 5% 增长到 8%~9%。

用水供需地区极不平衡。高方案下陕西用水量将在现有基础上增加 34 亿 m^3 ,达到 113 亿 m^3 ;甘肃将增加 33 亿 m^3 ,达到 156 亿 m^3 ,未来 20 年水资源供需矛盾依然突出。宁夏和新疆是节水潜力最大的地区,由于灌溉用水效率的提高,两区社会用水总量可望在未来 20 年内基本维持在现状水平甚至略有下降。

表 3 西北地区水资源承载力多目标分析主要指标预测值¹⁾

Tah 3 Forecast of water resources carrying capacity of northwest China with multi-criteria analysis method

情景方案	GDP 亿元	总人口 万人	社会总需水 亿 m^3	生态需水 亿 m^3	用水效益 (元· m^{-3})	农业用水比例 %	工业用水比例 %	生活用水比例 %
2010A1+B1+C1	9523	10105	849	602	11.9	86.0	7.9	6.1
2010A1+B1+C2	9716	10105	828	602	12.5	85.3	8.4	6.3
2010A2+B2+C1	8621	10174	819	628	11.1	85.6	9.1	5.3
2010A2+B2+C2	8833	10174	800	628	11.6	84.9	9.6	5.5
2020A1+B1+C1	18125	10961	861	636	22.7	83.3	8.9	7.8
2020A1+B1+C2	19205	10961	833	636	25.0	81.9	9.9	8.3
2020A2+B2+C1	14858	11116	795	655	20.1	82.9	9.8	7.3
2020A2+B2+C2	15653	11116	768	655	21.9	81.7	10.6	7.7

1) 生态需水的计算仅考虑了河道内外生态需水,其预测仅考虑了退耕还林还草工程的影响

2.2 水资源承载状况评价结果

从水资源承载力综合评价结果看,影响西北地区水资源承载状况的最主要制约因素是水资源开发利用率、用水效益和人口自然增长率,降低水资源开发利用率,提高用水效益和控制人口增长是提高水资源承载水平的关键。水资源承载力综合指数2000年为0.10,已濒于极限不可承载的边缘;2010年为0.16,仍属于准不可承载的范围;2020年达到0.26,属于可承载范畴。这表明西北地区水资源承载状况将逐步改善,但中短期内仍难以达到良好可承载水平。其中以A1+B2+C2方案水资源承载力综合指数值(0.34)为最高,说明采取较高经济增长速度、严格控制灌溉面积发展、适度退耕还林还草工程措施情景方案可取得最佳的社会经济和生态环境发展综合效益。

3 结 论

本文以多目标情景分析法和综合评判方法为核心,并借助于部门辅助模型探讨了4种不同情景方案下西北地区的水资源承载力问题。分析结果表明:西北地区的用水增长在经历了20世纪80年代以前的高速增长阶段后,于90年代进入了低速增长期。未来西北地区用水需求增长速度将进一步减缓,这与世界和我国用水增长的基本规律是一致的;二是尽管目前西北地区出现了水资源紧缺现象,但西北地区的缺水不是资源型缺水,而是工程型和管理型缺水。西北地区未来用水矛盾不会更加激化,而应该能够通过最合理的方式得以解决。明确了这一点,有利于把握今后西北地区水资源开发利用的重点和方向。解决西北地区水资源供需矛盾

的根本出路应立足于本区域水资源的合理开发利用上,而不是一味强调“南水北调”等耗时长,工程量大的大型区域性调水工程。西北地区应该将重点放在大力发展节水技术,调整产业结构和加强水资源管理上,尤其要通过建立高效节水农业体系,控制灌溉面积增长,控制高耗水量工农业项目来抑制用水量的高速增长,以解决社会经济发展和生态环境保护的矛盾,这才是长远的可持续发展道路。

需要指出的是,本文是从各省区面域的尺度对西北地区水资源承载力问题进行的探讨;研究结果对西北地区大开发具有宏观上的指导意义。由于西北地区具有水资源和社会经济分布极不平衡的特征,因此还必需分地区、流域对水资源承载力状况进行更细致的研究。此外,以往我国和部分省市在水资源供需预测中常出现水资源需求预测规模偏大的情况,主要是由于对节水技术进步(尤其是农业节水)和产业结构调整带来的节水潜力估计不足造成的。如何使预测结果更切合实际,还需要广大科研工作者进行更深入细致的调研工作。

参考文献:

[1] 许新宜,王浩,甘泓. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州:黄河水利出版社,1997:32-146.
[2] 王慧炯,李泊溪,李善同. 中国实用宏观经济模型[M]. 北京:中国财政出版社,1995:40-128.
[3] 李子奈. 计量经济学—方法和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001:142-204.
[4] 司全印,冉新全,周得孝,等. 区域水污染控制与生态环境保护研究[M]. 北京:中国环境科学出版社,2000:75-132.
[5] 王西琴,周得孝. 区域水环境经济系统优化模型及其应用[J]. 西安理工大学学报,1999,15(4):80-85.

Assessment of Water Resources Carrying Capacity of Northwest China

ZHU Yi zhong, XIA Jun, WANG Gang sheng

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

Abstract: Taking Northwest China as a study area, a new way of WRCC is explored study by combining the multi-criteria scenario analysis model, comprehensive evaluation model and other sectoral models based on the synthetic analysis of the complex system of water socioeconomy ecoenvironment. The first multi objective analysis model is applied to estimate WRCC of Northwest China in 2010 and 2020 in different scenarios. Then a comprehensive index of WRCC is designed and calculated to assess different policy alternatives by evaluating the quality of WRCC with comprehensive evaluation model. The assessment of the models indicates that the situation of WRCC in Northwest China will be improved evidently in the future and the goals of water supply and demand balance can be achieved by taking such countermeasures as renovating ecological environment, developing water saving technology and adjusting industrial structure etc. The A1+B1+C2 scenario is proved to be a preferred alternative, while reducing the rate of water resources development, improving the efficiency of water use and controlling population growth will be the key factors improving the water resources carrying capacity.

Key words: water resources carrying capacity; multi object scenario analysis; comprehensive evaluation