

中国水资源承载力综合评价研究

刘佳骏^{1,2}, 董锁成¹, 李泽红¹

(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 研究生院, 北京 100049)

摘要: 中国水资源短缺,加之水资源时空分布不均、水土资源分布不匹配,水资源已成为制约中国社会经济可持续发展的重要因素。文章从系统论的角度出发,研究中国经济、社会发展、生态环境与水资源的协调发展关系,运用水资源承载力综合评价模型,通过选取特定年份相关数据计算其水资源承载力综合评价指数,描述中国各省区水资源承载力状况,以此综合分析评价中国水资源的承载能力。结果表明:中国水资源分布不均,与人口分布和经济布局不相匹配;西南省区水资源承载潜力相对较大;长江、珠江流域及东部沿海地区,已无水资源承载力优势;华北平原、西北地区如新疆、宁夏、甘肃等地区水资源严重短缺,水资源超载严重,水资源承载力渐趋枯竭。

关键词: 中国; 水资源; 承载力指数

中图分类号: TV213.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2011)02-0258-12

水是人类社会赖以生存和发展不可替代的资源,是人类社会可持续发展的基本条件之一。随着人口不断增长和社会经济发展,水资源短缺和水环境恶化已经成为全球性问题。中国是水资源短缺的国家,加之水资源时空分布不均,水土资源布局不匹配,水资源已成为制约中国社会经济可持续发展的重要因素。特别对于我国干旱半干旱地区而言,水资源问题尤为突出,已成为这些地区社会经济发展和生态环境演变的关键因素。如何解决经济社会发展与水资源供需的矛盾,加强中国省域内可利用水资源的管理,实现水资源与社会、经济和生态环境的协调发展,是当前迫切需要解决的重要课题之一。

“承载力”一词源于生态学,原用以衡量特定区域在某一环境条件下可维持某一物种个体的最大数量。目前关于水资源承载力(Water Resources Carrying Capacity, WRCC)的定义具有代表性的有两种:施雅风等^[1]认为水资源承载力是指某一地区的水资源,在一定社会和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可承载的农业、工业、城市规模和人口水平,是一个随社会经济和科学技术水平发展变化的综合目标;惠洪河等^[2]认为水资源承载力是指在某一具体的历史发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,经过合理的优化配置后,水资源对该地区社会经济发展的最大支撑能力。综上所述,本研究认为区域水资源承载力是指以可预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以社会可持续发展和水资源可持续利用为原则,以维护生态环境良性发展为条件,以水资源得到合理开发和配置为前提,一定区域上的水资源可支撑的社会、经济、生态环境协调发展的规模。中国水资源承载力的研究领域主要集中在城市水资源承载力和区(流)域水资源承载力两个方面。研究的方法主要有常规趋势方法、模糊

收稿日期: 2010-08-20; 修订日期: 2010-10-28。

基金项目: 国家科技基础性工作专项重点项目(2007FY110300)。

第一作者简介: 刘佳骏(1982-),男,回族,河北唐山市人,博士。E-mail: liujiajun666@yahoo.com.cn

致谢: 两位匿名审稿人对本文提出了十分宝贵的修改意见,在此表示感谢!

综合评价法、主成分分析法、系统动力学方法、多目标分析评价核心模型、多目标线性规划方法、多目标决策分析方法、密切值法等。

近年来,学术界关于中国区域水资源承载力定性定量研究取得了较大进展。徐中民等^[3-4]在传统多目标分析决策技术的基础上,采用基于情景分析的多目标模型,结合黑河流域具体情况,对黑河流域的 WRCC 进行了研究;王浩等^[5]针对生态环境脆弱的内陆干旱区特点,提出了水资源承载力的指标体系、计算流程和边界条件,分析计算了西北内陆干旱区水资源生产能力;阮本青等^[6]采用水资源适度承载能力计算模型对黄河下游地区的 WRCC 进行了研究;高彦春等^[7]采用模糊综合法对汉中盆地的水资源开发利用进行了阈限分析;傅湘等^[8]采用主成分分析法对汉中盆地的 WRCC 进行了研究;夏军等^[9]、朱一中等^[10]从水循环模拟研究切入,建立了水资源承载力综合评价指标体系,进行了不同发展背景下的生态用水和水资源承载力的量化研究;闵庆文等^[11]将地区水资源承载力研究纳入了生态安全领域,开创了水资源和生态安全相结合的研究,即从水资源生态系统管理出发,以水资源承载力和水资源安全为基础,在防止水污染前提下,提出西北地区确保水资源安全的生态系统途径。

鉴于此,本研究从影响水资源承载力各因素出发,综合考虑多方面因素影响,对中国水资源承载力作出系统评价,并借助可持续发展的思想,利用复合系统协同学观点,建立水资源承载力综合评价模型,表征目前中国水资源承载和利用状况。根据系统论原理,建立以社会、经济、生态与水资源为 4 个子系统的区域水资源承载力复合系统,综合频度统计与理论分析方法选取了社会、经济、生态与水资源复合系统评价指标,构建综合评价指标体系,建立区域水资源承载力综合评价模型,以中国 31 个省区 2008 年的基础数据(因资料缺少,未计算香港、澳门和台湾)为样本,计算中国水资源承载力综合评价指数,并结合地理信息系统软件 ArcGIS9.3 图形分析,以此来展现中国水资源承载力的变化状况及其特点;对中国水资源的利用进行评价,得出结论。本研究通过对中国水资源的承载力指数及其利用协调指数的计算,综合评价中国水资源的承载能力和利用状况,以此为国家水资源的优化利用和社会、经济、生态可持续协调发展政策的制定提供依据。

1 区域水资源承载力综合评价指标体系构建

1.1 指标选取原则

区域水资源承载力综合评价指标体系是对区域水资源、社会、生态与经济协调发展状况进行综合评价与研究的依据和标准。确定该综合评价指标体系应使其能够全面客观地反映中国水资源与社会、生态、经济发展之间的协调发展状况,既能够指导和监督中国水资源利用,促进中国可持续发展,又能使指标概念明确且便于数据的采集。

本研究从系统论的角度出发,即将经济、社会发展、生态环境与水资源视为一个复合系统,构成这个复杂系统的 4 个子系统间是辩证统一的关系。选取水资源承载力综合评价指标时,应遵循以下基本原则:①目的性,复合系统协调具有明确的目的性,即实现复合系统的协调发展和良性循环;②整体性,复合系统不是各个子系统的线性加总,其强调的是子系统之间的相互关系、相互作用,其整体功能远远超过各个要素功能线性加和,任合一子系统的发展制约并受制于其他子系统的相应发展;③动态性,复合系统协调不是一种静止状态,而是有序地运动着的;④层次性,主要表现为子系统内部各个组成要素之间的协调以及子系统之间的协调。

1.2 综合评价指标体系确立

本研究在前人研究的基础上,综合频度统计与理论分析方法选取指标,即对目前有关协调发展评价研究报告和论文进行频度统计选取使用频率较高的指标,同时对区域经济、社会、生态与水资源复合系统的内涵、特征、基本要素等主要问题进行分析、比较、综合,选择与和谐发展联系紧密且针对性较强的指标。综上,本研究构建了区域社会、经济、生态与水资源复合系统综合评价指标体系(表1)。

表1 区域社会、经济、生态与水资源复合系统评价综合评价指标体系

Table 1 The comprehensive evaluation index of regional social, economic, ecological and water resources evaluation complex system

目标	指标	指标计算方法	指标选取意义
水资源系统指标 C_1	国土面积 x_1 (10^4 km^2)	测量数据	反映研究区域地域范围
	单位面积水资源量 x_2 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	平均当地水资源可利用量/当地区域面积	反映水资源可利用程度
	水资源开发利用率 x_3 (%)	除生态环境用水之外的平均用水量/平均当地水资源量	反映水资源开发利用状况
	水质综合达标率 x_4 (%)	符合要求的水体总量/多年平均当地水资源量	反映水质的总体状况
	水资源总量 x_5 (10^8 m^3)	统计数据	反映研究区域水资源整体丰裕程度。水资源总量包括地表水实际可利用量、地下水年开采利用量、过境水最多可利用量。
	多年平均降水量 x_6 (10^8 m^3)	统计数据	反映研究区域自然降水补给程度
	供水模数 x_7 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	供水量/国土面积	反映区域单位面积供水保障程度
	产水模数 x_8 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$)	产水量/国土面积	反映区域单位面积产水能力
	人口密度 x_9 (人/ km^2)	总人口/国土面积	反映单位国土面积人口压力
	人口自然增长率 x_{10} (‰)	年净增人数与年平均人口之比	反映人口对区域水资源的动态压力
社会系统指标 C_2	城市人口比例 x_{11} (%)	城镇人口/总人口	反映社会发展水平与人口素质
	生活污水达标处理率 x_{12} (%)	生活污水达标排放量/总排放量	反映社会发展水平, 100% 意味着水清洁生活
	生活用水定额 x_{13} ($\text{m}^3/\text{d} \cdot \text{人}$)	生活用水量/总人口/365 d	综合用水指标, 反映人口素质与节水状况
	人口数 x_{14} (10^4 人)	统计数据	反映区域总人口压力
经济系统指标 C_3	人均 GDP x_{15} (元)	GDP 总量/总人口	反映区域整体经济状况
	GDP 增长率 x_{16} (%)	某年与其前一年 GDP 的增长率	反映区域整体发展能力
	工业用水定额 x_{17} ($\text{m}^3/10^4$ 元)	工业用水量/工业总产值	反映工业用水水平
	农业用水定额 x_{18} ($\text{m}^3/10^4$ 元)	农业用水量/农业总产值	反映农业用水水平
	灌溉覆盖率 x_{19} (%)	有效灌溉面积/耕地面积	反映区域农业灌溉发展水平
	灌溉用水定额 x_{20} (m^3/hm^2)	灌溉用水量/有效灌溉面积	反映作物对水的依赖状况及节水水平
	工业废水处理达标率 x_{21} (%)	工业用水达标处理量/总用水量	反映工业节水水平
	生态环境用水率 x_{22} (%)	生态环境用水量/平均水资源量	反映生态系统对水资源的需求
生态系统指标 C_4	水污染综合指数 x_{23} (%)	受污染水体总量/水资源总量	反映水体受污染状况
	森林覆盖率 x_{24} (%)	森林面积/国土面积	绿色可持续的反映, 水资源更新的基础
	湿地比例 x_{25} (%)	湿地面积/国土面积	绿色可持续的反映, 水资源更新的基础
	化学需氧量排放量 x_{26} (10^4 t)	统计数据	反映出水体的污染程度, 衡量水中有机物质含量
	土地荒漠化比例 x_{27} (%)	荒漠化土地面积/国土面积	反映区域生态状况
	地面沉降比例 x_{28} (%)	地面沉降的面积/国土面积	反映水资源开发利用对生态环境的影响

续表

目标	指标	指标计算方法	指标选取意义	
综合协调指标 C_5	水资源供需平衡指数 r_1 (%)	多年平均需水总量/多年平均水资源可利用量	反映区域水资源供需平衡状态	
	耗水率 r_2 (%)	水资源消耗量/用水总量	反映区域水资源利用效率	
	用水总量 r_3 (10^8 m^3)	统计数据	反映区域用水压力	
	人均耕地面积 r_4 ($\text{hm}^2/\text{人}$)	耕地面积/总人口	可持续的耕地保障(国际粮农组织的警戒线为人均 0.053 hm^2)	
	单位耕地面积水资源占有量 r_5 ($10^4 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)	多年平均当地水资源量/耕地面积	反映水资源与土地资源匹配状况	
	人均用水量 r_6 ($\text{m}^3/\text{人}$)	用水总量/总人口	综合反映区域人口生产、生活用水水平	
	自然灾害损失率 r_7 (%)	各种自然灾害损失/GDP	反映生态环境与社会经济协调状况	
协调指标 C_6	水资源与社会系统协调	人均水资源量 r_8 ($\text{m}^3/\text{人}$)	当地多年平均水资源总量/总人口	反映区域水资源丰、缺状态及发展潜力
	协调	饮水安全人口比例 r_9	饮水安全人口/总人口	反映人口与水资源协调状况
水资源与经济系统协调指标 C_7	单位 GDP 用水量 r_{10} ($10^4 \text{ m}^3/10^4$ 元)	GDP 总量/总用水量	水资源与经济发展协调度量	
	万元 GDP 污水产生量 r_{11} ($\text{m}^3/10^4$ 元)	污水产生量/GDP 总量	区域经济发展与水资源协调状况,反映水资源污染与经济发展之间关系	
水资源与生态系统协调指标 C_8	超采率 r_{12} (%)	超采地下水资源量/地下水资源总量	反映水资源开发利用对生态环境的影响	
	生态环境缺水率 r_{13} (%)	生态环境缺水总量/水资源总量	反映生态环境与水资源协调状况	

2 区域水资源承载力综合评价模型建立

2.1 数据处理

数据标准化处理包括数据同趋化处理和无量纲化处理两个方面。数据同趋化处理主要解决不同性质数据问题,对不同性质指标直接分析计算不能正确反映不同作用力的综合结果,须先考虑改变逆指标数据性质,使所有指标对测评方案的作用力同趋化,再进行分析才能得出正确结果;数据无量纲化处理主要解决数据的可比性,对其指标属性值进行量化,即统一变换在 $[0,1]$ 范围内。数据标准化的目的在于消除各指标量纲不同和量级差异的影响,对现有指标数据进行标准化处理,即对统计过程进行描述。其原理为: $X_{ij}^* = (X_{ij} - \bar{X}_j) / \sigma_j$, 其中, $\bar{X}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ij}$, $\sigma_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_j)^2$ 。 X_{ij} 为指标的原始统计数据; X_{ij}^* 为标准化的变量数据。

2.2 模型构建

根据设计综合评价指标体系,区域水资源承载力综合指标 CW 表达式为:

$$CW = \sqrt[3]{CHI \times CCI \times (\alpha F_e I + \beta F_p I)}$$

式中: $F_e I$, $F_p I$ 分别为区域内水资源承载的经济压力指数和人口压力指数; CCI 为区域水资

源复合系统承载压力指数; CHI 为区域内水资源复合系统协调指数; α, β 为待定权重, 本研究采取 $F_e I, F_p I$ 为同等权重。

根据模型计算数值将区域水资源承载力综合指标 CW 度量标准确定如表 2。

表 2 区域水资源承载力综合指标度量标准

Table 2 The metrics of regional water resources carrying capacity comprehensive index

CW	0.00 ~ 0.50	0.51 ~ 0.80	0.81 ~ 1.00	1.01 ~ 1.30	> 1.30
承载等级	承载盈余 水资源丰裕	承载适宜 水资源利用协调	濒临超载 水资源紧张	轻度超载 水资源短缺	严重超载 水资源严重缺乏

2.2.1 区域水资源承载经济压力指数 $F_e I$

区域水资源承载经济压力指数计算公式为:

$$F_e I = \frac{F_e}{GDP_c} \quad (1)$$

其中: $F_e = \frac{GDP}{W_d} \times W_s$, F_e 为区域内水资源承载的最大经济规模, W_d 为区域内社会系统和经济系统的最低用水总量, W_s 为区域水资源最大可利用总量, GDP 为用水为 W_d 时所产生的国内生产总值, GDP_c 为当前国内生产总值。

2.2.2 区域水资源承载人口压力指数 $F_p I$

区域水资源承载人口压力指数计算公式为:

$$F_p I = \frac{F_p}{P_c} \quad (2)$$

其中: $F_p = \frac{GDP}{GDP_p}$, F_p 为区域在某一社会发展水平, 可利用水资源量转化成全部产品所能供养的人口规模, 即区域内水资源所能承载的最大人口规模, GDP_p 为区域在某一社会发展水平的人均占有国内生产总值的下限阈值, P_c 为当前人口规模。

为保证社会、经济的可持续发展, 应保证经济规模和人口规模不超过区域内水资源的最大支持力, 即 $F_e I \leq 1, F_p I \leq 1$ 。

2.2.3 区域水资源复合系统承载压力指数 CCI

区域水资源复合系统承载压力指数计算公式为:

$$CCI = \frac{CCP}{CCS} \quad (3)$$

式中, CCP 为水资源系统压力指数, CCS 为水资源系统的承压指数。

水资源系统的承压指数计算, 本研究选用水资源系统 C_1 的各项指标进行计算; 水资源系统压力指数计算, 本研究选取社会系统 C_2 、经济系统 C_3 、生态系统 C_4 各项指标进行计算。承载压力指数反映水资源的承载状况。为了保证社会经济的可持续发展, 就应保证水资源社会经济系统的压力不超过支持力, 即承载压力指数 $CCI \leq 1$ 。

其中:

$$C_i = \sum_i \phi_i \times x_i \quad (4)$$

式中: C_i 代表的是表 1 中各层指标的综合评价价值, ϕ_i 、 x_i 分别为第 i 个指标的因子权重和指标评价价值。

为使表 1 中各项指标的权重能在复合系统中客观表达,在计算 CCI 时,本研究采用熵值法来确定复合系统中各项指标的权重,即根据客观社会、经济、生态与水资源质量状况的原始信息载量的大小确定指标的权重。熵的信息量越大,不确定性就越小,熵值也就越小。反之,信息量越小,不确定性就越大,熵值也就越大。通过指标变异度分析各指标间的联系程度,在一定程度上避免了主观因素带来的误差。

熵值法确定指标权重的步骤如下:

第一步,将指标值 x_j 做正向化处理,对评价指标做比重变换:

$$\rho_{ji} = \frac{x_{ji}}{\sum_{i=1}^n x_{ji}}, \text{ 其中, } j \text{ 为指标值所处样本区域。本研究选取中国 31 个省区相关数据,故}$$

$$1 \leq j \leq 31, 1 \leq i \leq n;$$

第二步,对评价指标的熵值计算: $\varphi_i = - \sum_{i=0}^n \rho_{ji} (\ln \rho_{ji})$;

第三步,将熵值逆向化: $\omega_i = \frac{\max \varphi_i}{\varphi_i}, \omega \geq 1, i \in [1, n]$;

第四步,计算指标值 x_{ji} 的权重: $\phi_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i}$ 。

2.2.4 区域经济、社会、生态与水资源复合系统协调指数 CHI

对于经济、社会、生态与水资源复合系统而言,各子系统的有序度为 $\bar{u}_k(\bar{e}_k), k=1, 2, 3, 4, \bar{u}_k(\bar{e}_k)$ 为各区域指标的多年平均值,则在复合系统发展演变过程中的某一时刻 $t_{(r)}$, 其协调指数计算方法如下:

$$CHI = \theta \sqrt[4]{\prod_{k=1}^4 [u_k(e_k) - \bar{u}_k(\bar{e}_k)]}, \quad C_{t(r)} \in [-1, 1]$$

$$\theta = \frac{\min_k [u_k(e_k) - \bar{u}_k(\bar{e}_k) \neq 0]}{|\min_k [u_k(e_k) - \bar{u}_k(\bar{e}_k) \neq 0]|}, \quad k = 1, 2, 3, 4$$

协调指数 CHI 取值越大,表明区域社会、经济、生态与水资源复合系统协调发展程度越高,反之则越低;另外,只要 $u_k(e_k) \geq \bar{u}_k(\bar{e}_k), k=1, 2, 3, 4$ 至少有一个不成立时,表明该复合系统中至少有一个子系统正朝向无序方向发展,即意味着复合系统出现非协调发展状态。将协调指标反映社会、经济、生态与水资源四子系统相互协调关系的四组 (C_5, C_6, C_7, C_8 , 详见表 1) 协调指标数据导入复合系统协调指数模型,计算可得区域经济、社会、生态与水资源复合系统协调指数 CHI 。

3 中国水资源承载力综合评价模型计算结果及解读

3.1 中国水资源承载力综合评价模型计算结果

本研究以中国 31 个省 2008 年相关统计数据为基础数据,数据标准化后导入水资源承载力综合评价模型,得到评价各项指标值(表 3)。

表3 中国省域水资源承载力综合评价各项指标值

Table 3 The value of China provincial water resources capacity evaluation index

地区	$F_e I$	$F_p I$	GCI	CHI	CW
北京	0.932	0.981	7.18	0.60	1.603
天津	1.185	0.968	8.38	0.58	1.736
河北	1.192	1.554	8.37	0.18	1.274
山西	0.954	1.114	7.96	0.25	1.272
内蒙古	0.411	0.800	3.31	0.29	0.835
辽宁	0.527	0.756	3.45	0.19	0.749
吉林	0.307	0.616	3.16	0.21	0.674
黑龙江	0.637	0.612	1.91	0.20	0.620
上海	0.545	0.638	2.41	0.62	0.932
江苏	0.521	0.643	2.74	0.51	0.933
浙江	0.329	0.514	2.47	0.54	0.825
安徽	0.379	0.815	4.47	0.36	0.987
福建	0.192	0.846	2.24	0.41	0.781
江西	0.171	0.846	1.51	0.28	0.599
山东	0.658	1.074	6.60	0.28	1.170
河南	0.592	1.236	5.23	0.38	1.220
湖北	0.262	0.801	2.98	0.36	0.829
湖南	0.234	0.811	2.55	0.43	0.831
广东	0.206	0.678	2.64	0.52	0.847
广西	0.133	0.830	1.05	0.40	0.587
海南	0.112	0.265	0.35	0.38	0.293
重庆	0.143	0.638	3.54	0.23	0.683
四川	0.083	0.698	3.86	0.34	0.800
贵州	0.089	0.668	1.11	0.28	0.490
云南	0.065	0.627	0.66	0.32	0.418
西藏	0.008	0.033	0.27	0.53	0.143
陕西	0.278	0.837	3.91	0.35	0.914
甘肃	0.736	1.161	4.42	0.33	1.114
青海	0.251	0.142	0.90	0.31	0.380
宁夏	1.123	1.345	8.57	0.44	1.669
新疆	0.723	0.476	3.75	0.35	0.923

注:数据来源于《中国统计年鉴2009》、《中国水资源公报2008》、《中国环境统计年鉴2008》和《中国水旱灾害公报2008》。

3.2 中国水资源承载力综合评价模型结果解读

3.2.1 中国水资源承载经济压力指数与区域水资源承载人口压力指数解读

本研究结合地理信息系统软件,运用 ArcGIS9.3 进行相关图形分析,以此进一步展现中国水资源承载力的变化状况及其特点。

区域水资源承载经济压力指数 $F_e I$ 表征区域内水资源所承载的经济发展压力,数字越大则表明该地区水资源承载的经济发展压力越大。如图 1(a)所示:水资源承载经济压力指数 $F_e I > 0.9$ 的省区为宁夏、北京、天津、河北、山西,表明该地区经济发展对水资源的利用状况已经大大超出本区域的水资源支持能力。其中宁夏、河北、北京、天津,其 $F_e I$ 已达到 1.1

以上,其经济发展规模远超出了本省水资源的支持能力;新疆、甘肃、黑龙江、山东四省区的 $F_e I$ 处在 0.6~0.9 之间,表明该类地区水资源的承载能力已经接近支持当地经济发展边缘;吉林、辽宁、内蒙古、河南、安徽、浙江、江苏的 $F_e I$ 处在 0.3~0.6 之间,这表明该类区域水资源对当地经济发展的支撑能力较强;而青藏高原、云贵高原、中部、西南、华南大部分省区 $F_e I$ 处在 0.3 以下,表明该类区域的水资源承载能力较强,对当地经济发展仍有较大的支撑潜力,同时表明这部分省区经济发展相对滞后,对当地水资源利用不够充分。

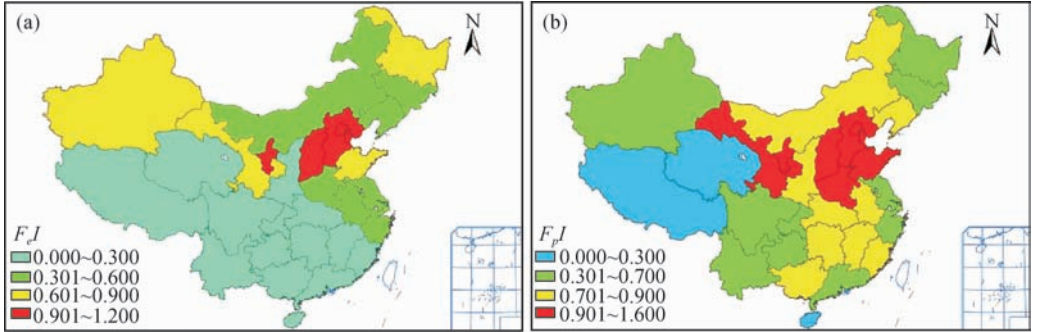


图 1 中国各省水资源承载经济压力指数 (a) 和人口压力指数 (b)

Fig. 1 The index of economic pressure (a) and population pressure (b) on water resources in various provinces of China

区域水资源承载人口压力指数 $F_p I$ 表征区域内水资源所承载的人口规模压力,数字越大则表明该地区水资源承载的人口规模压力越大。由图 1(b) 所示,中国各省水资源承载人口压力指数 $F_p I > 0.9$ 的省区主要集中在华北平原以及甘肃、宁夏西北干旱地区,该部分地区人口规模较大,同时本省区水资源匮乏,人口规模已经超出了该区域的水资源支撑能力;内蒙古、辽宁、中部地区、福建、广西省区 $F_p I$ 处于 0.7~0.9 之间,该类地区人口规模已接近区域内水资源最大支撑能力;黑龙江、吉林、新疆、浙江、江苏、广东以及四川盆地、云贵高原 $F_p I$ 处于 0.3~0.7 之间,该类地区水资源能够支撑其人口规模;青藏高原地区 $F_p I$ 小于 0.3,表明该地区人口规模较小,水资源足以支撑其现有人口规模。

3.2.2 中国水资源复合系统承载压力指数与水资源复合系统利用协调指数解读

区域水资源复合系统承载压力指数 CCI 表征区域内水资源所承载的社会、经济、生态环境复合系统压力,数字越大则表明该地区水资源所承载的社会、经济、生态环境复合系统压力越大。由图 2(a) 所示,青藏高原、云贵高原、广西、海南、黑龙江、江西水资源复合系统承载压力指数 $CCI < 2$,该部分地区经济、社会发展对该区域水资源压力较小,而其它地区 CCI 均大于 2,表明中国其他地区水资源承载的经济、社会发展压力较大。其中华北平原、宁夏、甘肃、安徽地区的 CCI 值均在 4 以上,即该部分地区的社会、经济发展对该区域水资源压力过大,已经严重超出了其水资源的承载压力范围。西部干旱、半干旱省区、内蒙古、东北地区、四川盆地及华东、华南沿海地区 CCI 值处于 2~4 之间,该部分区域水资源承载压力相对较大。

区域经济、社会、生态与水资源复合系统协调指数 CHI 越大,表明区域社会、经济、生态与水资源复合系统协调发展程度越高,也即水资源的利用水平越高,反之,则越低。由图 2(b) 可以看出:2008 年,中国各省水资源利用状况大部分区域趋于协调发展,协调指数不断提高,但华北平原的河北、山西、重庆、东北三省地区 CHI 小于 0.25,水资源利用协调水平较低;西北干旱、半干旱地区由于长期注意水资源利用效率, CHI 处于 0.25~0.35 之间,水资源利用协调水平随经济发展不断提高;福建、广西、海南、安徽、宁夏、河南、湖南、湖北 CHI

处于 0.35 ~ 0.45 之间,随着当地经济实力不断增强,水资源利用效率不断提高,水资源利用协调水平不断提高;北京、天津、上海三直辖市及江苏、浙江、广东等经济发达省区 *CHI* 大于 0.45,由于意识到本区域水资源日趋匮乏,保持经济社会高速发展的同时注意水资源的节约高效利用,使本部分区域水资源利用协调水平始终处于全国最高水平;西藏由于经济发展缓慢,水资源储量相对丰裕,人口、经济对本区与水资源系统压力相对较小,故长期以来水资源利用协调水平保持较好水平。

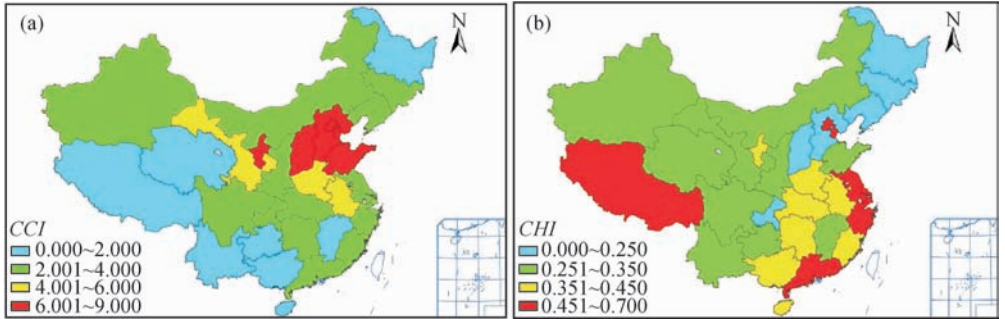


图2 中国各省水资源复合系统承载压力指数 (a) 和协调指数 (b)

Fig. 2 The carrying pressure index (a) and the coordination index (b) of water resource combined system in various provinces of China in 2008

3.2.3 中国各省水资源承载压力综合评价指数解读

结合表 2 区域水资源承载力综合指标 *CW* 度量标准,由图 3 可以看出中国水资源丰裕区域主要集中在青藏高原和云贵高原,该部分地区 $CW < 0.5$,水资源承载力有较大盈余,属于水资源承载盈余地区;四川、重庆、广西、福建、江西及东北地区 $0.5 < CW < 0.8$,属于水资源承载适宜地区;新疆、内蒙古、中部省份、广东、华东沿海地区 $0.8 < CW < 1.0$,水资源趋于紧张,属于水资源承载力濒临超载地区,河北、山东、山西、河南和甘肃地区 $1.0 < CW < 1.3$,水资源短缺,属于水资源承载力轻度超载地区,北京、天津和西部宁夏三省区水资源已严重缺乏,该部分地区 *CW* 值均在 1.3 以上,属于水资源承载力严重超载地区。

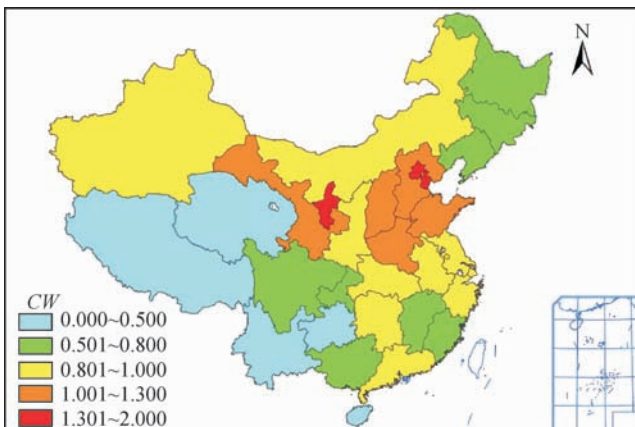


图3 中国各省水资源承载压力综合评价指数

Fig. 3 The comprehensive index of provinces water resources carrying capacity in various provinces of China

4 结论与讨论

本研究运用水资源承载能力综合评价模型,对中国各省影响水资源承载能力主要因素及其水资源利用水平进行了综合分析和评价。结果表明:中国水资源分布不均,与人口分布和经济布局不相匹配。西南省区水资源承载潜力相对较大,应加大未来西南地区水资源开发力度,充分发挥该地区水资源承载能力优势,促进该地区经济社会可持续发展;而水资源开发程度较高的经济重心区域长江、珠江流域及东部沿海地区,却无水资源承载能力优势;华北平原、西北地区如新疆、宁夏、甘肃等地区水资源严重短缺,水资源超载严重,本地水资源利用已无太大潜力,未来该部分地区应逐步调整产业结构,加大节水工程建设力度,利用先进技术促进经济向低耗水发展,提高该地区居民节水意识;对于水资源严重短缺地区,也是生态脆弱区,应采取相关生态治理措施,避免该地区生态环境进一步恶化。华北地区北京、天津、河北、山西四省区的水资源承载力渐趋枯竭,尽管这部分区域水资源利用协调水平较高,但水资源绝对量短缺已成为社会经济发展的瓶颈,大规模调水工程势在必行,同时该地区应充分利用沿海地缘优势,加大对海水淡化与水循环利用工程投入,开源节流,提高该地区水资源相对承载能力。

参考文献(References):

- [1] 施雅风, 曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992. [SHI YA-feng, Qu YAO-guang. The Rational Use of Urumqi River Basin Water Resources and It Carrying Capacity. Beijing: Science Press, 1992.]
- [2] 惠洪河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34. [HUI Yang-he, JIANG Xiao-hui, HUANG Qiang, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 30-34.]
- [3] 徐中民. 情景基础的水资源承载力多目标分析理论及应用[J]. 冰川冻土, 1999, 21(2): 99-106. [XU Zhong-min. A scenario-based framework for multicriteria decision analysis in water carrying capacity. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1999, 21(2): 99-106.]
- [4] 徐中民, 程国栋. 运用多目标分析技术分析黑河流域中游水资源承载力[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2000, 36(2): 122-132. [XU Zhong-min, CHENG Guo-dong. A study on the water resources carrying capacity by using the method of multi-objective optimization model—Taking the Heihe River as an example. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2000, 36(2): 122-132.]
- [5] 王浩, 秦大庸, 王建华, 等. 西北内陆干旱区水资源承载能力研究[J]. 自然资源学报, 2004, 19(2): 151-159. [WANG Hao, QIN Da-yong, WANG Jian-hua, et al. Study of carrying capacity of water resources in inland arid zone of Northwest China. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(2): 151-159.]
- [6] 阮本青, 沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 57-61. [RU-AN Ben-qing, SHEN Jin. Calculating model for moderately bearing capacity of regional water resources. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(3): 57-61.]
- [7] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997(8): 73-79. [GAO Yan-chun, LIU Chang-ming. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(8): 73-79.]
- [8] 傅湘, 纪昌明. 区域水资源承载能力综合评价——主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-173. [FU Xiang, JI Chang-ming. A comprehensive evaluation of the regional water resources carrying capacity—Application of main component analysis method. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1999, 8(2): 168-173.]
- [9] 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(5): 262-269. [XIA Jun, ZHU Yi-zhong. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying

- capacity. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(5): 262-269.]
- [10] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2003(2): 180-188. [ZHU Yi-zhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity. *Progress in Geography*, 2003(2): 180-188.]
- [11] 闵庆文, 余卫东, 张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 14-16. [MIN Qing-wen, YU Wei-dong, ZHANG Jian-xin. Fuzzy-based evaluation of water resources carrying capacity and its application. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 14-16.]
- [12] 程国栋. 承载力概念的演变及西北水资源承载力的应用框架[J]. 冰川冻土, 2002, 24(4): 361-367. [CHENG Guo-dong. Evolution of the concept of carrying capacity and the analysis framework of water resources carrying capacity in Northwest of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(4): 361-367.]
- [13] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005(4): 597-604. [WANG You-zhen, SHI Guo-qing, WANG De-sheng. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2005(4): 597-604.]
- [14] Rijisberman M A. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water system [J]. *Environment Impact Assessment Review*, 2000, 129(3): 333-345.
- [15] 孟庆松, 韩文秀. 复合系统整体协调度模型研究[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 1999(2): 177-179. [MENG Qing-song, HAN Wen-xiu. Study on the whole coordination degree model of non-line composite systems. *Journal of Hebei Normal University: Natural Science Edition*, 1999(2): 177-179.]
- [16] 王岩, 王红瑞. 北京市的水资源与产业结构优化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007. [WANG Yan, WANG Hong-rui. The Optimization of Industrial Planning under the Restriction of Water Resources in Beijing. Beijing: China Environment Science Press, 2007.]
- [17] 关伟. 区域水资源与经济社会耦合系统可持续发展的量化分析[J]. 地理研究, 2007(7): 685-691. [GUAN Wei. The data analysis of regional water resources and economic society coupling system sustainable development. *Geographical Research*, 2007(7): 685-691.]
- [18] 方创琳. “水资源约束下西北干旱区城市化过程及生态效应”研究进展[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 822-824. [FANG Chuang-lin. Research progress in the urbanization of arid area in Northwest China and the ecological effects under the water resource constraints. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 822-824.]
- [19] 姚治君, 王建华, 江东, 等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展, 2002(6): 111-115. [YAO Zhi-jun, WANG Jian-hua, JIANG Dong, et al. Advances in study on regional water resources carrying capacity and research on its theory. *Advances in Water Science*, 2002(6): 111-115.]
- [20] 赵翔, 陈吉江, 毛洪翔. 水资源与社会经济生态环境协调发展评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2009(9): 58-62. [ZHAO Xiang, CHEN Ji-jiang, MAO Hong-xiang. An evaluation of the coordinated development of water resources, social economy and eco-environment. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(9): 58-62.]
- [21] 左其亭. 城市水资源承载能力——理论·方法·应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. [ZUO Qi-ting. Urban Water Carrying Capacity: Theory, Method and Application. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [22] 张永勇, 夏军, 王中根. 区域水资源承载力理论与方法[J]. 地球科学进展, 2007, 26(2): 126-132. [ZHANG Yong-yong, XIA Jun, WANG Zhong-gen. Research on regional water resources carrying capacity theory and method. *Progress in Geography*, 2007, 26(2): 126-132.]
- [23] 鲍超, 方创琳. 水资源约束力的内涵、研究意义及战略框架[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 844-852. [BAO Chao, FANG Chuang-lin. On concept, significance and strategic frame work for water resources constraint force. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 844-852.]
- [24] Daily G C, Ehrlich P R. Population, sustainability, and earth carrying capacity [J]. *Bioscience*, 1992, 42(10): 761-771.
- [25] Daily G C, Ehrlich P R. Social economic equity, sustainability, and earth carrying capacity [J]. *Ecological Applications*, 1996, 6(4): 991-1001.
- [26] World Commission on Environment and Development. Our Common Future [M]. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

Comprehensive Evaluation of China's Water Resources Carrying Capacity

LIU Jia-jun^{1,2}, DONG Suo-cheng¹, LI Ze-hong¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: China's water resources shortages, combined with uneven spatial and temporal distribution of water resources, does not match the layout of land and water resources. Actually in China water resources deficiency has become an important factor, which constrained China's social and economic sustainable development. Based on the point of view of system theory, this paper researches on the coordinated development relationship among socio-economic development, ecological environment and water resources in China. Using comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity and selecting data of a given year from each province in China (not including Hong Kong, Macao and Taiwan due to no data), it calculates the comprehensive evaluation index of carrying capacity of water resources, describes the water resources carrying capacity situation of China's various provinces and autonomous regions, thus to get a comprehensive analysis and evaluation of the water resources carrying capacity in China. The results showed that: 1) the distribution of water resources did not match the distribution of population and economic divisions in China; 2) the southwestern provinces have relatively large potential of water carrying capacity; 3) the Yangtze River, Pearl River, and eastern coastal areas are no longer having the advantages of water carrying capacity; and 4) in North China Plain, northwestern regions, such as Xinjiang, Ningxia, Gansu etc, water shortage is severe, water carrying capacity overload seriously, and the water resources carrying capacity is becoming exhausted.

Key words: China; water resources; carrying capacity index