

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.005

基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法

沈珍瑶^{1,2}, 祝莹欣^{1,2}, 贾超^{1,2}, 陈磊^{1,2}

(1. 北京师范大学环境学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 为了定量分析流域内多种因素对水环境的综合影响, 发展并完善了基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法, 并将其应用于汉江流域中下游干流供水区水环境承载力分析。分析结果表明, 该方法对于水环境承载力的论述更为合理, 得到的结果也更为直观、全面; 仅从水资源供给的角度, 汉江流域中下游干流供水区水环境承载力在2040年存在难以承载社会经济发展的风险, 但从综合角度看, 水环境承载力呈现出改善的趋势。

关键词: 水环境承载力; 水资源量; 水环境容量; 动态模拟递推算法; 向量模法; 汉江流域中下游
中图分类号: X143 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2015)06-0032-08

Calculation method of water environment carrying capacity based on dynamic simulation-recursion algorithm and vector norm method

SHEN Zhenyao^{1,2}, ZHU Yingxin^{1,2}, JIA Chao^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}

(1. School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To quantify the comprehensive effect of multiple factors on the water environment, the calculation method of water environment carrying capacity (WECC) based on dynamic simulation and recursion algorithm and vector norm method is developed and completed. The WECC of the middle-lower of Hanjiang River Basin is analyzed based on this method. The results show that the method is more reasonable in discussing WECC and the results are more explicit and overall. From the point of water supply, there is a risk that WECC of middle-lower of Hanjiang River Basin might not support the local economic development. However, from the point of comprehensive evaluation, the WECC has the tendency of improving gradually.

Key words: water environment carrying capacity (WECC); water resources quantity; water environment capacity; dynamic simulation and recursion algorithm; vector norm method; middle-lower of Hanjiang River Basin

当前, 水资源短缺和水环境恶化已经成为全球性问题^[1]。我国水资源紧缺, 水环境普遍受到较为严重的污染, 水环境与经济社会发展的矛盾日益尖锐。水环境承载力的大小是决定人类经济社会发展规模和速度的重要因素, 对其进行理论和实践的深入研究具有重要的意义。目前, 水环境承载力的概

念在学术界尚无明确定义^[2]。笔者结合前人研究结果, 认为水环境承载力是指某一水域在一定历史时段上, 以可预见的社会经济发展水平为依据, 以可持续发展为前提, 在维护生态环境良性循环的基础上, 其水环境可支撑的社会经济规模和具有一定生活水平的人口数量。但水环境承载力研究涉及范围

基金项目: 国家自然科学基金(51579011)

作者简介: 沈珍瑶(1967—), 男, 教授, 博士, 主要从事流域非点源污染模拟与控制、流域水质模拟与水环境效应、流域水环境管理、环境影响评价等研究。E-mail: zyshen@tsinghua.org.cn

广、内容复杂,目前国内外尚无统一和成熟的水环境承载力研究方法,水环境承载力量化方法呈现多元化发展的特征^[3-4]。近年来,汉江中下游生态环境破坏日益严重,南水北调中线工程实施后,汉江中下游水量减少,水环境容量下降,流域内水环境对经济和社会发展的可持续承载问题已经成为制约流域发展的重要因素^[5-6]。本文发展并完善了基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法,并以汉江流域中下游干流供水区为例进行了验证,对该区水环境承载力进行了综合分析,可为该流域的经济发展规划和水资源可持续利用等提供科学的依据。

1 流域水环境承载力计算方法体系

目前用于水环境承载力评价的方法主要有向量模法、模糊综合评判方法、密切值法、主成分分析法、多目标决策分析法及系统动力学方法等^[1,7-9],评价方法虽然多样,但尚无统一认识,没有具体的判断原则。针对已有评价方法存在片面性等缺陷,本文拟采用一种新方法,即采用动态模拟递推算法对水资源利用系统和水环境污染系统进行分析,同时由于动态模拟递推算法注重一些关键要素的平衡和满足,考虑因素略为单一,而向量模法侧重于描述水环境综合承载力的情况,结合两种算法进行水环境承载力的综合评价。这种研究方法对于开展有时间跨度且区域面积较大的地区水环境承载力研究,具有其他方法无可比拟的优点,既注重关键要素的满足,同时也考虑了综合因素,可以直观反映地区水环境承载力及承载力变化过程、变化趋势,简单实用,研究结果较为直观。

1.1 动态模拟递推算法

动态模拟递推算法^[10]主要是通过水的动态供需平衡计算,来显示水资源承载力的状况和支持人口与经济规模的规模。其优点在于以年(或规划期)为时段,逐年地递推计算下去,并将不同年份的水环境承载力与实际值或预测值进行比较,以判断水环境对社会经济的承载状况。

动态模拟递推算法在水环境承载力计算中具有广泛的适用性,水环境承载力分析主要包括水资源利用系统分析和水环境污染系统分析。动态模拟递推算法也是从这两个角度进行分析和演算,没有复杂的模拟过程,简单易用。由于水环境承载系统非常复杂,而算法考虑的因素是衡量承载力的主要指标,对承载力的综合性和承载潜力考虑较少,所以在实际运用时,为了能够更为准确客观地说明问题,采用向量模法从综合评价的角度进行对照和比较。

1.1.1 分区水资源评价

水资源评价是对分区水资源情况的基础调查和分析工作。对一个具体的区域来说,核心是研究计算大气降水、地表水、地下水、污水及过境或外调水等5块水,调查分析工业用水、农业用水、生活用水、环境用水和生态用水等5种需求。

1.1.2 水资源供需平衡分析

a. 需水量预测。需水量预测公式为

$$Q_t = Q_{at} + Q_{mt} + Q_{pt} + Q_{ot} \quad (1)$$

其中

$$Q_{at} = \sum_j \sum_r A_{arj} q_{arj}$$

$$Q_{mt} = \sum_j \sum_r y_t (1 - \eta_t) q_t$$

$$Q_{pt} = 3.65 \times 10^{-5} P_t \alpha_t$$

$$y_t = y_{t-1} (1 + m_t)^n$$

$$P_t = P_{t-1} (1 + q_{pt})^n$$

式中: Q_t 为地区第 t 年需水总量,亿 m^3 ; Q_{at} 、 Q_{mt} 分别为农业、工业第 t 年的总需水预测值,亿 m^3 ; Q_{pt} 为居民第 t 年生活日常用水量,亿 m^3 ; Q_{ot} 为第 t 年其他产业总用水量,亿 m^3 ; A_{arj} 为第 j 区第 r 种农业产品种植面积, hm^2 ; q_{arj} 为第 j 区第 r 种农产品的用水定额, m^3/hm^2 ; y_t 、 y_{t-1} 分别为预测第 t 年、 $t-1$ 年的第 j 区第 r 种工业产品产值,亿元; m_t 为第 t 年工业产值增长率,%; n 为起算年至预测终止年的年数; η_t 为第 j 区第 r 产业第 t 年的工业用水重复利用率,%; q_t 为第 j 区第 r 产业第 t 年的万元产值用水量, $m^3/万元$; P_t 为第 t 年人口总数,万人; P_{t-1} 为前一年的人口数,万人; q_{pt} 为人口综合增长率,%; α_t 为第 t (或水平)年人均日需水量(指标或定额), L/d 。

b. 地区可供水量预测。可供水量预测是在地区水资源评价基础上,以范围内基准年所有供水工程的实际可供水量为依据,预测未来可供水量情况,以保证地区水资源平衡和新增水源工程的规划与建设。基准年的全区可供水量,包括已建和在建水源工程可供应的地表水、地下水、污水处理回用水等,通常以多年平均可供水量或不同供水保证率来表示。

c. 水资源供需平衡。地区逐年的水量供需平衡方程式为

$$\Delta Z_t = Q_{st} - Q_{dt} = (Q_{s(t-1)} + \Delta Q_{st}) - (Q_{d(t-1)} + \Delta Q_{dt}) \quad (2)$$

式中: ΔZ_t 为第 t 年水量供需平衡值,亿 m^3 ; Q_{st} 、 Q_{dt} 和 $Q_{s(t-1)}$ 、 $Q_{d(t-1)}$ 分别为第 t 年和 $t-1$ 年可供与需要水量,亿 m^3 。

d. 水资源供给承载力计算。通过可用水资源量、可供水量同需水量的比较,确定出水资源供给承载力的主要约束因素(可用水资源量或可供水量)。

选取不同规划年人均综合用水定额(需水量与预期人口数量之比)和单位 GDP 需水量(需水量与预期 GDP 之比)作为推算因子,计算水资源供给能力的可承载人口和可承载 GDP,具体计算公式为

$$P_{ct} = S_t / \alpha_{dt} \quad (3)$$

$$D_{ct} = S_t / \beta_{dt} \quad (4)$$

式中: P_{ct} 为第 t 年水资源供给能力的可承载人口,万人; D_{ct} 为第 t 年水资源供给能力的可承载 GDP,亿元; S_t 为第 t 年水资源供给承载力的主要约束因素,亿 m^3 ; α_{dt} 为第 t 年人均综合用水定额,万 m^3 ; β_{dt} 为第 t 年单位 GDP 需水量, m^3 /元。

1.1.3 水环境污染承纳分析

a. 水环境容量分析。水环境容量是指在一定的水质或环境目标下,某水域能够允许承纳的污染物的最大数量^[11]。污染源及污染物调查具体方法为:①工业废水。按基准年调查统计主要水污染型企业的类别和数量、该年工业废水排放总量、各分区工业废水排入水体的份额及不同工业门类废水中主要含有的污染物。②生活废水。计算公式为

$$Q_{pt} = 365\theta \sum_j Q_{wj} \quad (5)$$

$$W_{pt} = 0.365GP_t \quad (6)$$

式中: Q_{pt} 为地区生活污水年排放总量,万 t; Q_{wj} 为 j 区日生活用水量,万 t; θ 为生活污水的排放系数,其值为生活用水减去蒸发、滴漏等因素损失后的排污系数; W_{pt} 为生活污染物年排放量,万 t; G 为人均日排放污染物数量,kg。③非点源污染。将不同土地类型单位面积上的含量(如农药、化肥等)乘以该类土地单位面积污染物输出速率,即可得出非点源污染物的数量,而后进行汇总得出整个流域或地区主要河流或水体的污染量。河流水环境容量依下式计算:

$$E_i = C_{Ni}(Q_{pi} + q_i) - C_{o1,i}Q_{pi} - C_{o2,i}q_i + C_{Ni}(Q_{pi} + q_i)[1 - \exp(-K_i x_i / u_i)] \quad (7)$$

式中: E_i 为河段水环境容量,t/a; C_{Ni} 为水质标准,mg/L; $C_{o1,i}$ 为上游来水的污染物浓度,mg/L; $C_{o2,i}$ 为污水中污染物浓度,mg/L; Q_{pi} 为上游来水的流量, m^3 /s; q_i 为污水浓度; K_i 为河段水污染物降解系数; x_i 为河段长度,m; u_i 为河流平均流速,m/s。流域各段水环境容量总和为

$$E = \sum_i E_i \quad (8)$$

b. 污染物排放量的预测。水环境污染预测以地区社会经济发展目标及其需水量为依据,分门别类和汇总地区总污染浓度、污染物数量等,具体计算公式为

$$W_{itk} = W_{mtk} + W_{ptk} + N_{tk} \quad (9)$$

其中

$$W_{mtk} = 10^{-6} \sum_j Q_{mj} C_{ijk}$$

$$W_{ptk} = 3.65 \times 10^{-7} \sum_j P_{ijk} \varphi_{ijk}$$

$$N_{tk} = \sum_h A_h \sigma_{thk}$$

$$Q_{mj} = Q_{dj} \psi_{ij}$$

式中: W_{itk} 为第 t 年第 k 类污染物排放总量,万 t; W_{mtk} 为第 t 年各区工业废水含有的第 k 类污染物排放总量,万 t; W_{ptk} 为第 t 年各区生活污水含有的第 k 类污染物总量,万 t; N_{tk} 为第 t 年非点源污染第 k 类污染物输出总量,万 t; Q_{mj} 为第 t 年第 j 区工业废水排放总量,万 m^3 ; C_{ijk} 为第 t 年第 j 区工业废水(污水密度假定为水的密度)含有的第 k 类污染物排放浓度,mg/L; P_{ijk} 为第 t 年第 j 区人口数量,万人; φ_{ijk} 为第 t 年第 j 区第 k 类污染物的人均日排放量,主要为 COD,mg; A_h 为第 h 种土地类型面积, hm^2 ; σ_{thk} 为第 t 年第 h 种土地类型第 k 类污染物的输出率,万 t/ hm^2 ; Q_{dj} 为第 t 年第 j 区工业需水总量,万 m^3 ; ψ_{ij} 为废水排放系数。

c. 水环境污染承纳平衡分析。将水环境容量分析结果和规划年污染物排放量预测结果进行比较。

d. 水环境污染承纳承载力计算及分析。水环境污染承纳承载力的主要约束因素为水环境容量。选取不同规划年人均 COD 排放量(COD 排放量与预期人口数量之比)和单位 GDP 的 COD 排放量(COD 排放量与预期 GDP 之比)作为推算因子,根据 COD 水环境容量可以计算出水环境纳污能力的可承载人口和可承载 GDP,具体方法为

$$P_{wt} = E_t / W_{CODt} \quad (10)$$

$$D_{wt} = E_t / W_{CODgt} \quad (11)$$

式中: P_{wt} 为第 t 年水环境污染承纳能力的可承载人口,万人; E_t 为第 t 年水环境容量,万 t; W_{CODt} 为第 t 年人均 COD 排放量,t; D_{wt} 为第 t 年水环境污染承纳能力的可承载 GDP,亿元; W_{CODgt} 为第 t 年单位 GDP 的 COD 排放量,t/万元。

1.1.4 水环境承载力判定与分析

综合分析不同规划年流域或分区的水资源供给和水环境纳污能力,可以求得水环境的综合承载力。承载力大小的限制因素为水资源供给和水环境纳污能力中的较小值,二者值相同时,由二者共同决定。

承载力大小确定后,将承载力同实测或预测值进行比较,可以反映水环境对人类社会的承载状况。将多个规划年计算结果进行比较,可以看出水环境承载力的变化趋势。

1.2 向量模法

向量模法是一种采用统计方法,选择单项或多项指标进行分析,以反映地区水环境承载力现状和阈值的方法^[12]。该方法将评价因子分为正影响因

子和负影响因子,它们对评价结果的影响分别为正面和负面影响,这个特征符合水环境承载力评价中各评价因子与水环境承载力之间的关系。因向量模法数学理论扎实、形式简单直观、运算易行、结果客观合理等优点,应用极为广泛^[13],常用于横向(不同地区同一时间)和纵向(同一地区不同时间)承载力的综合比较,可以反映不同地区发展水平的相对高低或者同一地区在不同时间上的发展变化趋势。

由于动态模拟递推算法具有自身的局限性,在具体流域的实例研究中,为了使评价结论更为客观可靠,有必要作一些补充和辅助研究。向量模法从综合评价的角度对水环境承载力的变化趋势进行分析,可以弥补动态模拟递推算法的不足。

建立科学合理的指标体系是向量模法研究的基础,关系到流域水环境承载力评价的准确性与合理性,本文选择的具体指标见表1。

表1 流域水环境承载力向量模法指标体系

指标	指标单位	指标用途
人均可用水量	m ³	反映水资源自然供给能力(+)
供水量/需水量	%	反映供水能力大小(+)
万元工业产值用水量	m ³	反映工业用水效率(-)
万元农业产值用水量	m ³	反映农业用水效率(-)
人均GDP	元	反映开发水资源和治理污染的能力(+)
单位COD排放量的工业产值	万元/t	反映同等污染物产生条件下的工业生产效率(+)
人均COD排放量	kg	反映污染物产生能力大小(-)

注:“+”表示正影响因子,“-”表示负影响因子。

对于一个地区而言,假设有 m 个不同的水平年;或者对于同一水平年而言,假设有 m 个不同的分区,这两种情况都会有 m 个水环境承载力,不妨设此 m 个水环境承载力为 $E_j(j=1,2,\dots,m)$,再设每个水环境承载力由 n 个具体指标确定的分量组

成^[14],即有:

$$E_j = (E_{1j}, E_{2j}, \dots, E_{nj})$$

归一化处理后有:

$$E'_j = (E'_{1j}, E'_{2j}, \dots, E'_{nj})$$

其中
$$E'_{ij} = E_{ij} / \sum_{j=1}^m E_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

这样,第 j 个水环境承载力的大小可以用归一化后的矢量模来表示,即:

$$|E'_j| = \left[\sum_{i=1}^n (E'_{ij})^2 \right]^{1/2}$$

这里,视每一分量的权重是一样的,若考虑各项指标的权重,则:

$$|E'_j| = \left[\sum_{i=1}^n (E'_{ij}W_{ij})^2 \right]^{1/2}$$

式中, W_{ij} 为第 j 个水环境承载力的第 i 个指标的权重。

2 汉江流域中下游干流供水区水环境承载力分析

2.1 研究区概况与数据来源

2.1.1 研究区概况

研究区域为以汉江及其分支东荆河为主要水源及补充水源的供水范围,如图1所示。包括襄阳市、荆门市、荆州市、孝感市和武汉市的部分范围,以及天门市、潜江市、仙桃市3个直管市。其中襄阳市包括老河口、谷城县、宜城市及城区的全部或部分范围;荆门市包括沙洋县、京山县及钟祥市的全部或部分范围;荆州市包括洪湖市、监利县的全部或部分范围;孝感市包括汉川市、云梦县、孝南区、应城市的全部或部分范围;武汉市包括蔡甸区、东西湖区、汉南

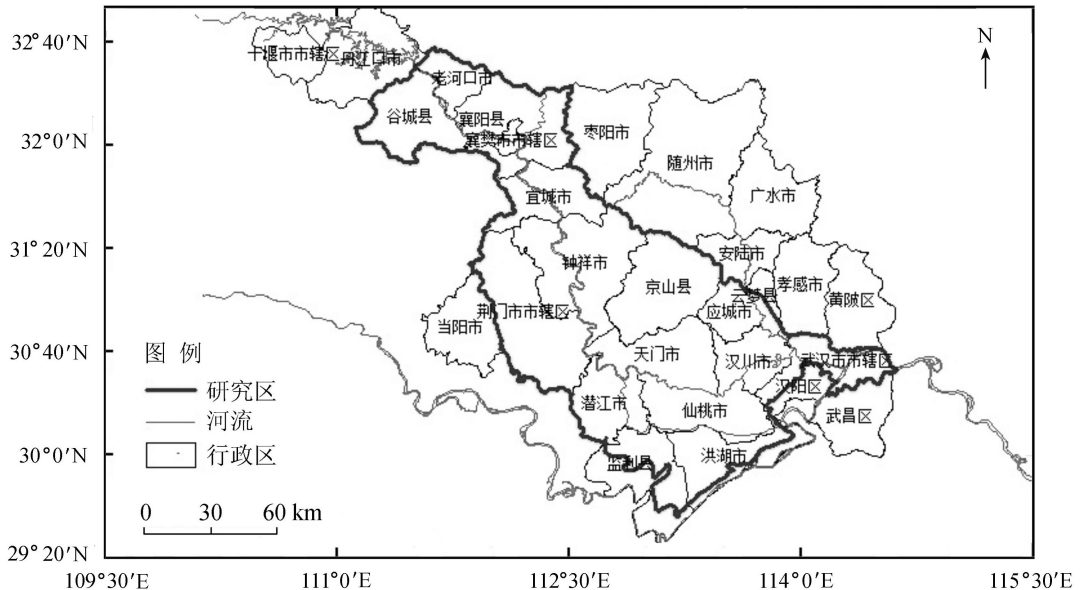


图1 研究区范围示意图

区及中心城区的全部或部分范围。

汉江中下游地表水资源量多年平均约为 178 亿 m^3 ^[15], 中线工程未调水时丹江口水库多年平均下泄水量为 361.53 亿 m^3 ^[16], 水资源丰富, 但是, 汉江中下游人口密集、经济发达, 排入汉江的废水总量逐年递增, 这些废水基本上不经处理就直接排江, 导致汉江中下游水质近年来明显呈现恶化趋势^[17]。2014 年南水北调中线一期工程实施后, 汉江中下游净流量减少、水环境容量下降, 若不采取措施, 水资源的紧缺及水环境恶化将严重制约当地及河流下游地区社会经济发展^[6]。2030 年拟调水 130~140 亿 m^3 , 水资源又一次减少, 会使水环境与社会经济发展的矛盾更为突出。

2.1.2 数据来源

本研究用数据主要来源于《湖北省国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》《湖北省统计年鉴》《南水北调中线规划总报告》《湖北省城镇污水处理及再生利用设施建设规划(2011—2015 年)》《2010 年湖北省水资源公报》及各市州统计年鉴, 以 2010 年为基准年, 所有产值均为 2010 年可比价计算, 部分数据是整理计算后的结果。

2.2 研究区主要经济社会发展指标预测

根据 2010 年相关数据及不同年份的各项指标增长率可预测不同年份的经济社会发展指标, 具体预测值见表 2。

表 2 汉江流域中下游干流供水区主要经济社会发展指标预测值

规划年	耕地面积/ 万 hm^2	灌溉面积/ 万 hm^2	人口总数/ 万人	城镇人口/ 万人	农村人口/ 万人
2010	113.8	98.5	1889.6	1044.4	845.2
2015	112.4	97.5	1937.7	1138.4	799.3
2020	111.4	96.6	1996.8	1240.9	755.9
2025	110.8	96.1	2067.4	1352.5	714.9
2030	110.1	95.5	2150.3	1474.3	676.0
2035	109.8	95.3	2246.3	1606.9	639.3
2040	109.4	95.1	2356.2	1751.6	604.6

规划年	工业总产值/ 亿元	农业总产值/ 亿元	GDP/ 亿元
2010	6726.1	502.5	6539.7
2015	8582.5	641.2	10528.9
2020	10951.3	818.2	15477.5
2025	13973.8	1044.0	21668.5
2030	17830.6	1332.1	28992.5
2035	22751.8	1699.8	36994.4
2040	29031.4	2168.9	47204.8

2.3 研究区水环境承载力动态递推模拟

2.3.1 水资源供需平衡分析

a. 水资源基本情况。汉江中下游河流生态环境需水量为 184.51 亿 m^3 ^[18], 由此可以计算出干流供水区的可用水资源量如表 3 所示。

表 3 研究区水资源量(多年平均) 亿 m^3

项 目	不调水 (2010—2014 年)	调水 95 亿 m^3 (2015—2030 年)	调水 130 亿 m^3 (2030—2035 年)
下泄水量	361.5	258.3	232.8
本地水资源量	178.0	178.0	178.0
水资源总量	539.5	436.3	410.8
可用水资源量	355.0	251.8	226.3

b. 可供水量分析。对汉江中下游干流沿岸水厂、灌溉闸站、大中型水库进行统计, 对各小区分片分时段进行需水量和当地可供水量的供需对口分析, 结合汉江干流引水供水能力, 可计算出总可供水量约为 179.2 亿 m^3 , 考虑到一般情况下供水能力变化不大, 所有规划年均采用该数值。

c. 需水量分析。各指标用水定额或用水增长率如下: ①农业。根据全国灌区节水改造规划和实施情况, 2010—2030 年各灌区渠系水利用系数为 0.50~0.95, 2030 年后提高到 0.62~0.95, 自 2000 年以来, 全省农田灌溉单位面积平均用水量趋势变化不明显。②工业。考虑科技进步、产业结构调整 and 节水水平的提高, 结合工业用水重复利用率的变化趋势, 预测不同规划年(2010 年、2015 年、2020 年、2025 年、2030 年、2035 年、2040 年)的工业用水定额分别为 85 m^3 /万元、80 m^3 /万元、70 m^3 /万元、60 m^3 /万元、50 m^3 /万元、45 m^3 /万元和 40 m^3 /万元。③生活。城镇和农村生活人均日用水量分别为 172.1 L 和 67.4 L。④其他。主要指牲畜需水。大牲畜用水按 50 L/(头·d)计, 小牲畜按 30 L/(头·d)计。结合表 2 中相关数据, 可以计算出不同规划年各部分需水量, 见表 4。

表 4 研究区不同规划年需水量预测 亿 m^3

规划年	农业 需水量	工业 需水量	城镇生活 需水量	农村生活 需水量	大牲畜 需水量	小牲畜 需水量	总需 水量
2010	63.3	57.2	6.6	2.1	0.18	0.78	130.2
2015	62.6	64.4	7.2	2.0	0.18	0.78	137.2
2020	62.0	76.7	7.8	1.9	0.18	0.78	149.4
2025	61.7	83.8	8.5	1.8	0.18	0.78	156.8
2030	61.3	89.2	9.3	1.7	0.18	0.78	162.5
2035	61.2	102.4	10.1	1.6	0.18	0.78	176.3
2040	61.0	116.1	11.0	1.5	0.18	0.78	190.6

d. 水资源供需平衡分析。根据前面计算结果, 可得研究区水资源供需平衡分析结果如表 5 所示。由表 5 可知, 2010—2035 年, 可用水资源量、供水能力基本满足需水要求, 但随着研究区人口的增长和经济社会的发展, 供水压力逐渐增大, 2040 年出现了水资源供需的失衡, 需要加强供水工程的建设。

e. 水资源供给承载力分析。以可供水量为约束因素计算水资源供给能力对人口数量和 GDP 规模的承载力, 结果见表 6。可以看出, 2010—2035 年, 水资源供给承载力大于预期人口数量和经济发

表5 水资源供需平衡分析(多年平均)

规划年	水资源总量/ 亿 m ³	可用水量/ 亿 m ³	可供水量/ 亿 m ³	需水量/ 亿 m ³	可用水量-需水量/ 亿 m ³	可供水量-需水量/ 亿 m ³	水资源供需平衡状况
2010	539.5	355.0	179.2	130.2	224.8	49.0	平衡
2015	436.3	251.8	179.2	137.2	114.6	42.0	平衡
2020	436.3	251.8	179.2	149.4	102.4	29.8	平衡
2025	436.3	251.8	179.2	156.8	95.0	22.4	平衡
2030	410.8	226.3	179.2	162.5	63.8	16.7	平衡
2035	410.8	226.3	179.2	176.3	50.0	2.9	平衡
2040	410.8	226.3	179.2	190.6	35.7	-11.4	失衡

表6 水资源供给承载力与社会经济预测结果

规划年	预测结果		水资源供给承载力	
	人口/万人	GDP/亿元	人口/万人	GDP/亿元
2010	1889.6	6539.7	2600.7	9000.9
2015	1937.7	10528.9	2530.9	13752.1
2020	1996.8	15477.5	2395.1	18564.7
2025	2067.4	21668.5	2362.7	24764.0
2030	2150.3	28992.5	2371.3	31972.0
2035	2246.3	36994.4	2283.2	37602.9
2040	2356.2	47204.8	2215.3	44381.5

展规模,但承载力逐渐变小,2040年出现了不可承载的状况,需要加强供水工程的建设,并通过提高用水效率及重复利用率、改进工艺、减少浪费等途径,努力推进节水型社会的建设。

2.3.2 水环境污染容纳平衡分析

汉江流域干流水质好于支流,从上游至下游污染状况逐渐上升,主要污染物为 COD、NH₃-N 等,污染特征为有机污染型^[19-20],因此将 COD 作为代表污染物进行水环境污染容纳预测分析。

a. 水环境容量。调水前,汉江中下游多年平均 COD 容量为 46.7 万 t/a,由于资料缺乏等原因,为简化计算,现假设南水北调工程实施后,除水量、流速等外,其余水文条件不改变。根据计算,调水 95 亿 m³使汉江流域中下游水环境容量减少 23%,调水 130 亿 m³将减少 29%,即 2015 年和 2030 年水环境容量分别为 35.95 万 t 和 33.15 万 t。

b. 污染物排放预测与水环境污染容纳平衡分析。考虑到污染物总量控制要求的压力、先进生产工艺的实施及污水处理程度的不断提高,工业 COD 排放弹性系数在 2010—2020 年间取 0.20,在 2020—2040 年间取 0.10,生活污水排放系数取 0.9,城镇污水处理率 2010 年取 70%,2015 年及 2020 年取 90%,2030 年及之后取 95%,COD 去除率取 85%,计算结果见表 7。由表 7 可知,调水后,COD 水环境容量大幅减少;同时随着社会和经济发展,COD 排放量仍在增加。应该通过实施污染治理规划,加强水污染物排放的总量控制,深化 COD 的处理,加大工业污染治理力度,淘汰落后工艺和产品,

推行清洁生产等措施以保证水质。

表7 汉江中下游 COD 排放量预测结果与水环境污染容纳平衡分析

规划年	工业 COD 排放量/ 万 t	生活 COD 排放量/ 万 t	COD 排放总量/ 万 t	COD 容量/ 万 t	容量-排放总量/ 万 t	平衡分析
2010	10.01	20.64	30.65	46.70	16.05	平衡
2015	11.03	16.75	27.78	35.95	8.17	平衡
2020	12.15	16.89	29.04	35.95	6.91	平衡
2025	12.46	15.83	28.29	35.95	7.66	平衡
2030	12.79	16.02	28.81	33.15	4.34	平衡
2035	13.12	16.22	29.34	33.15	3.81	平衡
2040	13.46	16.48	29.94	33.15	3.21	平衡

c. 水环境污染容纳承载力分析。根据以上数据可算出水环境纳污能力对人口数量和 GDP 规模的承载力,结果见表 8。可看出,调水后水环境容量明显减小,承载压力增大,但水环境污染容纳承载力始终大于人口数量 and 经济发展规模。

表8 水环境污染容纳承载力与社会经济预测结果

规划年	预测结果		水环境污染容纳承载力	
	人口/万人	GDP/亿元	人口/万人	GDP/亿元
2010	1889.6	6539.7	2879.1	9964.2
2015	1937.7	10528.9	2507.6	13625.4
2020	1996.8	15477.5	2471.9	19160.3
2025	2067.4	21668.5	2627.2	27535.6
2030	2150.3	28992.5	2474.2	33360.0
2035	2246.3	36994.4	2538.0	41798.4
2040	2356.2	47204.8	2608.8	52265.9

2.3.3 水环境承载力分析

综合水资源供给和水环境纳污能力后的水环境承载力变化状况见表 9。可以看出,2010—2035 间,研究区水环境承载力大于预期人口数量和经济规模。2014 年调水 95 亿 m³后,水环境承载力开始下降。2030 年调水 130 亿 m³后,水环境承载力将再次下降,2040 年研究区水环境欠载人口将达到 140.9 万,欠载 GDP 达到 2823.4 亿元,承载力上限的主要约束因素为可供水量。

由于动态模拟递推算法是从水资源利用系统和水环境污染系统进行分析,对承载力的综合性和承载潜力考虑较少,为了能够更为准确客观地说明问题,现选择向量模法对研究区水环境承载力进行综合评价。

2.4 研究区水环境承载力向量模法分析

选取人均可用水量、可供水量/需水量、万元工业产值用水量、万元农业产值用水量、人均 GDP、单位 COD 排放量的工业产值以及人均 COD 排放量 7 个指标作为衡量标准对水环境承载力进行向量模法分析。

根据前文预测结果,经计算可得 7 个指标值,经归一化后如表 10 所示,其中负影响因子取其倒数进行计算。

表9 水环境承载力与社会经济预测结果

规划年	预测结果		水环境承载力		欠载		承载情况	约束因素
	人口/万人	GDP/亿元	人口/万人	GDP/亿元	人口/万人	GDP/亿元		
2010	1 889. 6	6 539. 7	2 600. 7	9 000. 9			可承载	可供水量
2015	1 937. 7	10 528. 9	2 507. 6	13 625. 4			可承载	水环境容量
2020	1 996. 8	15 477. 5	2 395. 1	18 564. 7			可承载	可供水量
2025	2 067. 4	21 668. 5	2 362. 7	24 764. 0			可承载	可供水量
2030	2 150. 3	28 992. 5	2 371. 3	31 972. 0			可承载	可供水量
2035	2 246. 3	36 994. 4	2 283. 2	37 602. 9			可承载	可供水量
2040	2 356. 2	47 204. 8	2 215. 3	44 381. 5	140. 9	2 823. 4	不可承载	可供水量

表10 指标值归一化结果及水环境承载力计算结果

评价指标	2010年	2015年	2020年	2025年	2030年	2035年	2040年
人均可用水资源量	0. 192	0. 133	0. 129	0. 124	0. 107	0. 103	0. 098
可供水量/需水量	0. 158	0. 150	0. 138	0. 131	0. 127	0. 117	0. 108
万元工业产值用水量	0. 096	0. 102	0. 117	0. 137	0. 164	0. 182	0. 205
万元农业产值用水量	0. 061	0. 079	0. 102	0. 130	0. 167	0. 214	0. 274
人均GDP	0. 045	0. 070	0. 101	0. 136	0. 175	0. 214	0. 260
单位COD排放量的工业产值	0. 077	0. 089	0. 103	0. 128	0. 159	0. 198	0. 246
人均COD排放量	0. 105	0. 133	0. 136	0. 150	0. 154	0. 159	0. 164
水环境承载力	0. 047	0. 044	0. 049	0. 063	0. 081	0. 107	0. 147

可以看出,2010—2015年间,研究区水环境承载力呈现递减趋势,这主要是由于人口增长、2014年调水95 m³、水量不足、水环境容量下降等造成的,在2015年达到极小值0.044;2015—2040年间,随着社会进步、经济发展、治污能力的增强,水环境的综合承载力有逐渐上升的趋势,到2040年达到了0.147。说明研究区经过一段“过渡期”后,水环境有改善的趋势。

上述两种算法从不同角度对研究区的水环境承载力进行了分析,动态模拟递推算法注重于一些要素的平衡和满足,对水环境的自身潜力等综合因素考虑较少,而向量模法侧重于描述水环境的综合承载力,因此两种算法在结果上出现差异,在有足够数据支持等条件的情况下,完善这两种算法,理论上可以得出相似的结论。本文运用两种算法,使之互为补充,使用这种综合的研究方法更客观地说明了南水北调中线工程对研究区的水环境承载力的影响。

由于研究区域范围大,数据缺乏,汉江流域上下游水质关联的考虑比较粗略,没有充分考虑水环境功能区划,也没有具体讨论水资源供给与水环境污染的相关关系,计算中不可避免地存在一定的不确定性。本文暂时未考虑其他工程可能带来的影响,如南水北调中线配套工程“引江济汉”的可能影响,该工程年平均输水37亿 m³,其中补汉江水量31亿 m³,补东荆河水量6亿 m³。该工程的实施,会增加汉江中下游地区的水资源量,可在一定程度上缓解该地区的用水矛盾,水环境承载力也会得到大幅提高。

3 结 语

水环境承载力是协调社会、经济、环境可持续发

展的重要依据,本文发展完善了基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法,避免了传统方法存在的片面性等缺陷,既注重了关键要素的平衡也考虑了综合因素,可以直观反映地区水环境承载力及承载力变化过程及趋势,简单实用,结果较为直观。将此研究方法用于汉江流域中下游干流供水区的水环境承载力分析,重点考虑了南水北调中线工程的运营对该地区的影响。汉江流域中下游干流供水区在2014年调水95亿 m³和2030年调水130亿 m³后,水资源量减少,水环境容量下降,从水资源供给能力角度,在2040年,该地区水环境承载力将不能承载其社会经济发展规模;但从综合角度看,水环境有改善的趋势。

参考文献:

- [1] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报,2011,26(2):258-269. (LIU Jiajun, DONG Suocheng, LI Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources,2011,26(2):258-269. (in Chinese))
- [2] 崔兴齐,孙文超,鱼京善,等. 河南省近十年水环境承载力动态变化研究[J]. 中国人口·资源与环境,2013,23(11):359-362. (CUI Xingqi, SUN Wenchao, YU Jingshan, et al. Research on dynamic change of water environment capacity in Henan Province during last ten years[J]. China Population Resources and Environment, 2013,23(11):359-362. (in Chinese))
- [3] 李新,石建屏,曹洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报,2011,31(6):1338-1344. (LI Xin, SHI Jianping, CAO

- Hong. Water environment carrying capacity of Erhai Lake based on index system and analytic hierarchy process[J]. Acta Science Circumstantiae, 2011, 31(6): 1338-1344. (in Chinese)
- [4] 李玮,肖伟华,秦大庸,等. 水环境承载力研究方法及发展趋势分析[J]. 水电能源科学, 2010, 28(11): 30-32. (LI Wei, XIAO Weihua, QIN Dayong et al. Research method of water environment carrying capacity and its trend of development [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(11): 30-32. (in Chinese))
- [5] 张九红,敖良桂. 汉江中下游水质现状及污染趋势分析[J]. 水资源保护, 2004(3): 46-48. (ZHANG Jiuhong, AO Lianggui. Current situation of water quality of the middle and lower Hanjiang River and trend of its pollution [J]. Water Resources Protection, 2004(3): 46-48. (in Chinese))
- [6] 曾祉祥,张洪,单保庆,等. 汉江中下游流域工业污染源解析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 252-259. (ZENG Zhixiang, ZHANG Hong, SHAN Baoqing, et al. Analysis of industrial pollution sources of the middle and lower Hanjiang River Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(2): 252-259. (in Chinese))
- [7] 叶龙浩,周丰,郭怀成,等. 基于水环境承载力的沁河流域系统优化调控[J]. 地理研究, 2013, 32(6): 1007-1016. (YE Longhao, ZHOU Feng, GUO Huaicheng, et al. Optimal regulation of Qinghe River watershed system based on water carrying capacity [J]. Geographical Research, 2013, 32(6): 1007-1016. (in Chinese))
- [8] 赵卫,刘景双,孔凡娥. 水环境承载力研究述评[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 47-50. (ZHAO Wei, LIU Jingshuang, KONG Fane. Review on water environment carrying capacity [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 47-50. (in Chinese))
- [9] GAO L, HAILU A. Ranking management strategies with complex outcomes: an AHP-fuzzy evaluation of recreational fishing using an integrated agent-based model of a coral reef ecosystem[J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 31(12): 3-18.
- [10] 冯尚友. 水资源持续利用与管理导论[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 73-77.
- [11] 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, 2002, 21(2): 180-188. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity [J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 180-188. (in Chinese))
- [12] 来雪慧,王小文,徐杰峰,等. 基于向量模法的陕南地区水环境承载力评价[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 56-59. (LAI Xuehui, WANG Xiaowen, XU Wenfeng, et al. Evaluation of water environment carrying capacity in Southern Shannxi Province based on vector norm method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 56-59. (in Chinese))
- [13] 王玉梅,丁俊新. 山东省水环境承载力动态变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报, 2011, 22(6): 50-55. (WANG Yumei, DING Junxin. Analysis on dynamic changing tendency of water environmental carrying capacity in Shangdong Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2011, 22(6): 50-55. (in Chinese))
- [14] 崔凤军. 城市水环境承载力的实例研究[J]. 山东矿业学院学报, 1995, 14(2): 140-144. (CUI Fengjun. Case study on bearing capacity municipal water environment [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 1995, 14(2): 140-144. (in Chinese))
- [15] 马建华. 关于汉江流域实施水量分配管理若干问题的思考[J]. 人民长江, 2010, 41(17): 1-6. (MA Jianhua. Consideration on water quantity allocation in Hanjiang River Basin [J]. Yangtze River, 2010, 41(17): 1-6. (in Chinese))
- [16] 陈姗姗,刘俊新,王国义,等. 南水北调中线工程对汉江中下游水环境的影响与可持续发展研究[J]. 地下水, 2011, 33(6): 78-80. (CHEN Shanshan, LIU Junxin, WANG Guoyi, et al. Research on water environment impacts of the Middle Route of South-to-North Water Transfer Project on the middle and lower reaches of Hanjiang River and sustainable development [J]. Ground Water, 2011, 33(6): 78-80. (in Chinese))
- [17] VILLARREAL E V, DIXON A. Analysis of a rainwater collection system for domestic water supply in Ringdansen, Norrkoping, Sweden [J]. Building and Environment, 2005, 40(9): 1174-1184.
- [18] ZHANG Xiang, XIA Jun. Coupling the hydrological and ecological process to implement the sustainable water resources management in Hanjiang River Basin [J]. Science in China: Series E Technological Sciences, 2009(11): 3240-3248.
- [19] 石应,古佩,曹俊,等. 汉江流域水污染现状及污染源调查[J]. 环境科学导刊, 2011, 30(5): 42-44. (SHI Ying, GU Pei, CAO Jun, et al. Present condition and pollution source for water pollution of Hanjiang River Basin [J]. Environmental Science Survey, 2011, 30(5): 42-44. (in Chinese))
- [20] 谢文星,黄道明,谢山,等. 丹江口水利枢纽兴建后汉江中下游四大家鱼等早期资源及其演变[J]. 水生态学杂志, 2009, 2(2): 44-49. (XIE Wenxing, HUANG Daoming, XIE Shan, et al. The early of the four major Chinese carps resources in the middle and lower reaches of Hanjiang River after the construction and operation of Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Hydroecology, 2009, 2(2): 44-49. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-08-10 编辑: 熊水斌)