

# 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价

李燕, 张兴奇

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** [目的] 综合评价长江经济带水资源承载力的时空变化特征, 为长江经济带水资源的合理利用和区域的可持续发展提供决策参考。[方法] 从社会经济、水资源量、用水量和废水排放量 4 个方面选取 18 项指标, 建立长江经济带水资源承载力评价指标体系, 运用主成分分析法对长江经济带 9 省 2 市水资源承载力的时空变化特征进行了综合评价。[结果] 2004—2013 年长江经济带水资源承载力呈现逐年上升的趋势, 水资源赋存条件、人口的增加、经济的发展以及水污染治理水平的提高是水资源承载力上升的主要驱动因素; 长江经济带水资源承载力的空间差异显著, 东部和中部地区总体较好, 西部地区除四川省外水资源承载力相对较差。[结论] 长江经济带水资源承载力的时空变化主要受所在地区的水资源赋存条件和社会经济条件的影响。

**关键词:** 水资源承载力; 主成分分析; 长江经济带; 时空变化特征; 评价

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2017)04-0172-07

**中图分类号:** TV213

**文献参数:** 李燕, 张兴奇. 基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):172-178. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.029; Li Yan, Zhang Xingqi. Assessment on carrying capacity of water resources in Yangtze River economic zone based on principal component analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4):172-178. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.029

## Assessment on Carrying Capacity of Water Resources in Yangtze River Economic Zone Based on Principal Component Analysis

LI Yan, ZHANG Xingqi

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** [Objective] Evaluation of spatial-temporal characteristics of the water resources carrying capacity of Yangtze River economic zone is of great significance to the rational utilization of water resources and the sustainable development of the region. [Methods] An evaluation index system of water resources carrying capacity that include 18 indices from four aspects, including social economic, the quantity of water resources, water consumption and wastewater discharge, was established. The spatial-temporal characteristics of water resources carrying capacity of the Yangtze River economic zone were evaluated using the principal component analysis method. [Results] The water resources carrying capacity of the Yangtze River economic zone increased during 2004—2013. The main factors to drive the increasing of water resources carrying capacity are natural conditions of water resources, population and economic growth, and water pollution control. The spatial differences of water resources carrying capacity of the Yangtze River economic zone are significant. The water resources carrying capacity of the eastern and the middle regions is in good situation, whereas the water resources carrying capacity of the western region is relatively poor except Sichuan Province. [Conclusion] These differences are mainly attributed to the natural conditions of water resources and the economic development level.

**Keywords:** water resources carrying capacity; principal component analysis; Yangtze River economic zone; spatial-temporal characteristics; assessment

水资源是支撑和保障经济社会可持续发展的基本要素,区域水资源承载力研究是21世纪区域可持续发展和水资源安全战略研究中的一个基础课题,水资源承载力是衡量区域可持续发展的一项重要指标,水资源承载力的研究对合理开发利用水资源和促进区域可持续发展具有重要的意义。水资源承载力具有动态性、不确定性和复杂性,它的评价与水资源系统、社会经济系统和自然生态系统密切相关,尚未形成完整的理论与方法体系。国外对水资源承载力的研究主要在可持续发展文献中有所涉及<sup>[1-4]</sup>,国内学者主要集中于对水资源承载力的定义<sup>[5-10]</sup>、水资源承载力的主要影响因素与特点<sup>[11-12]</sup>、水资源承载力的评价指标体系以及评价方法等方面的研究<sup>[13]</sup>。目前国内的水资源承载力研究主要集中在城市与流域或区域尺度。水资源承载力的研究始于干旱区,旨在为水资源紧缺的区域提供科学指导。在流域尺度上水资源承载力的研究以北方地区为主,刘昌明等<sup>[14]</sup>围绕水资源与人口、经济、社会与环境的关系对黄河流域水资源进行了研究;秦莉云等<sup>[15]</sup>利用模糊综合评判模型对淮河流域水资源承载力进行了评价研究,表明淮河流域水资源开发利用已接近其开发容量;赵建世等<sup>[16]</sup>提出以经济社会可消耗水量和人均全员耗水量为要素的水资源承载力模型并将其运用于海河流域水资源承载力分析,指出海河流域水资源整体超载,且超载度不断上升;付玉娟等<sup>[17]</sup>利用多目标算法分别计算不同情景下辽河流域各市水资源的“生产”、“生活”和“生态”的极限承载力。与我国北方地区相比,南方地区水资源承载力的研究相对较少。曾浩等<sup>[18]</sup>利用动态因子分析方法对湖北省汉江流域9个城市水资源承载力进行研究,表明汉江流域水资源承载力发展态势不容乐观;曹一梅<sup>[19]</sup>通过区域水资源的人口承载能力与现实人口之间的关系计算滇池流域水资源承载力,指出滇池流域水资源呈过载的状态。虽然南方地区水资源相对丰沛,但是也面临水资源供需矛盾的问题,开展区域性水资源承载力研究具有重要的意义。

长江流域多年平均水资源总量为 $9.96 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,约占全国水资源总量的35%,但受气候、下垫面等条件的影响,水资源时空分布不均;随着长江流域经济社会的快速发展,水污染呈加剧之势<sup>[20]</sup>。2014年中央政府工作报告把建设长江经济带纳入了新时期的国家战略中,表明长江经济带是我国未来经济和社会发展的重要区域,对推动我国经济发展具有重要作用<sup>[21]</sup>。水资源的需求量取决于社会经济活动的现状与发展情况<sup>[22]</sup>,通常随着经济的发展而增加。随着

长江经济带国家发展战略的实施,水资源的需求量将不断增加,水资源供需矛盾凸显,水环境保护的压力加大,水资源仍然是该地区经济社会发展的制约因素之一。本文以长江经济带“9省2市”作为研究对象,构建水资源承载力评价指标体系,运用主成分分析方法分析影响水资源承载力变化的因子,综合评价长江经济带水资源承载力的时空变化特征,为长江经济带水资源的合理利用和区域的可持续发展提供决策参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况与数据来源

长江是我国第一、世界第三大河流,是货运量位居全球内河第一的黄金水道和连通东西部的交通和经济纽带。长江经济带地处长江流域,以亚热带和暖温带气候为主,雨量充沛。覆盖云南省、四川省、重庆市、贵州省、湖北省、湖南省、江西省、安徽省、浙江省、江苏省、上海市等9省2市,面积约 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占国土总面积的21%,横跨中国东中西3个区域,自然社会条件地区差异显著,形成了以成渝为核心的上游城市群、以武汉为核心的中游城市群、以上海为核心的下游城市群<sup>[23]</sup>。长江上游丰富的水资源为工农业和城市的发展提供了优越的自然条件<sup>[23]</sup>,但上游地区生态系统脆弱,经济发展相对落后,水资源开发利用困难。中下游地区经济相对发达,工农业迅速发展,城市化进程加快,废污水排放加剧了水污染,2004—2012年长江流域废污水排放总量逐年增加。水污染造成区域性水质性缺水,加剧水资源供需矛盾,不仅制约了本地区的发展,同时对整个长江流域经济社会的发展产生了不利影响。

本文所采用的数据资料来源于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》以及长江经济带9省2市的水资源公报。综合考虑指标数据的可获取性以及同类研究的可比性,本文搜集了2004—2013年10a跨度的样本数据,经过计算整理获得。

### 1.2 研究方法

选取长江经济带9省2市作为研究对象,将其分为东中西部3个大区;西部地区包括云南省、四川省、重庆市和贵州省,中部地区包括湖北省、湖南省、江西省和安徽省,东部地区包括浙江省、江苏省和上海市。

目前用于水资源承载力评价的方法主要有背景分析法、多因素综合评价方法、模糊综合评价、多目标决策分析方法、系统动力学方法、多目标规划方法等<sup>[1,24]</sup>,这些方法各有优缺点,在具体的分析中都有一定的局限性。主成分分析方法是一种较新的多元

统计方法,有其独特的原理,其本质是对高维变量系统进行最佳综合和简化,可以客观地确定各指标的权重,有效地避免主观随意性<sup>[25]</sup>。主成分分析旨在利用降维的思想,力保数据信息丢失最小,把多个指标转换为少数几个综合指标(即主成分),其中每个主成分都能够反映原始变量的大部分信息,且每个主成分之间是相互独立的。

运用 SPSS 21.0 统计软件对评价指标的数据进行分析,主成分分析的具体步骤为:(1)为了消除量纲的影响,首先对原始数据进行标准化处理;(2)计算标准化指标数据的相关系数矩阵  $R$ ,并求  $R$  的特征值  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ ; (3)计算累计贡献率,一般按照累计贡献率  $\geq 85\%$  的原则确定主成分个数  $t$ ; (4)计算各主成分对应的  $t$  个特征向量并计算其表达式;(5)以各主成分的信息贡献率为权重,对水资源承载力进行综合评价<sup>[26]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 评价指标的选择

水资源承载力的研究涉及自然环境条件与社会经济的诸多要素,依据科学性、全面性、系统性和可行性原则构建长江经济带水资源承载力评价指标体系,选取了社会经济、水资源量、用水量和废污水排放量 4 个准则层,共 18 个指标(表 1)。

### 2.2 长江经济带水资源承载力的时间变化特征分析

选取长江经济带 9 省 2 市连续 10 a(2004—2013 年)时间序列的相关数据指标,对长江经济带水资源承载力时间变化特征进行评价。表 2 是主成分的特征值和各主成分贡献率。由表 2 可知,前 3 个主成分的特征值都大于 1,其累积贡献率达到 92.563%,满足累积贡献率大于 85% 的要求,基本可以反映水资源承载力的影响因子,所以选择前 3 个主成分进行分析。

因子载荷矩阵是主成分与影响因子之间相关系数的矩阵,通过最大方差法对因子进行旋转得到的矩阵,使因子和原始变量之间的关系进行重新分配,因子载荷矩阵的系数更加显著,从而更容易对各主成分进行解释。旋转后的因子载荷矩阵详见表 3。从表 3 可知,第 1 主成分与  $X_4, X_9, X_{11}, X_{14}$  和  $X_{15}$  有较大的载荷,主要反映水资源的利用情况;第 2 主成分在  $X_1, X_2, X_3, X_5, X_{10}, X_{13}, X_{16}, X_{17}$  和  $X_{18}$  有较大载荷,主要反映人口增加和经济发展对水资源的需求与经济发展对水资源开发利用的促进作用以及对水环境质量带来的影响;第 3 主成分主要反映水资源的自然禀赋条件。3 大主成分涵盖了水资源利用情况、人口和经济发展和水资源的自然禀赋条件,比较全面地反

映了驱动水资源承载力变化的因子,能较好地反映水资源承载力状况。因此用这 3 个主成分的变化来分析长江经济带水资源承载力的时间变化特征。

表 1 研究区水资源承载力评价指标

目标层	准则层	指标层	指标属性
长江经济带水资源承载力评价	社会经济	$X_1$ 总人口数/万人	逆向指标
		$X_2$ 地区生产总值/亿元	正向指标
		$X_3$ 固定资产投资额/万元	正向指标
		$X_4$ 城镇居民消费水平/元	正向指标
		$X_5$ 农村居民消费水平/元	正向指标
	水资源量	$X_6$ 地表水资源量/ $10^8 \text{ m}^3$	正向指标
		$X_7$ 地下水资源量/ $10^8 \text{ m}^3$	正向指标
		$X_8$ 人均水资源量/ $(\text{m}^3/\text{人})$	正向指标
	用水量	$X_9$ 供水量/ $10^8 \text{ m}^3$	正向指标
		$X_{10}$ 农业用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	逆向指标
		$X_{11}$ 工业用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	逆向指标
		$X_{12}$ 生活用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	逆向指标
		$X_{13}$ 生态用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	逆向指标
		$X_{14}$ 人均用水量/ $(\text{m}^3/\text{人})$	逆向指标
		$X_{15}$ 城市人均日生活用水量/L	逆向指标
		$X_{16}$ 有效灌溉面积/ $10^3 \text{ hm}^2$	正向指标
废污水排放量	$X_{17}$ 工业废水排放量/ $10^4 \text{ t}$	逆向指标	
	$X_{18}$ 城市污水排放量/ $10^4 \text{ t}$	逆向指标	

表 2 2004—2013 年时间序列主成分的特征值和贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	11.321	62.897	62.897
2	3.168	17.598	80.495
3	2.172	12.068	92.563

表 3 2004—2013 年时间序列旋转因子载荷矩阵

指标	主成分		
	1	2	3
$X_1$	0.684	0.709	-0.008
$X_2$	0.689	0.720	0.000
$X_3$	0.652	0.755	0.010
$X_4$	0.717	0.693	0.004
$X_5$	0.632	0.765	-0.031
$X_6$	0.047	0.036	0.990
$X_7$	-0.011	-0.135	0.987
$X_8$	0.041	-0.063	0.992
$X_9$	0.897	0.437	-0.019
$X_{10}$	0.597	0.734	-0.110
$X_{11}$	0.958	0.065	0.021
$X_{12}$	0.883	0.453	0.025
$X_{13}$	-0.232	-0.687	0.261
$X_{14}$	0.936	-0.117	-0.005
$X_{15}$	-0.961	-0.237	-0.100
$X_{16}$	0.622	0.767	0.019
$X_{17}$	-0.161	0.739	-0.028
$X_{18}$	0.080	0.956	0.015

表4 2004—2013年时间序列特征向量矩阵

指标	主成分		
	1	2	3
$X_1$	0.292	-0.008	0.056
$X_2$	0.295	-0.005	0.062
$X_3$	0.294	-0.011	0.096
$X_4$	0.296	0.005	0.039
$X_5$	0.291	-0.037	0.098
$X_6$	0.010	0.516	0.251
$X_7$	-0.036	0.532	0.192
$X_8$	-0.011	0.532	0.207
$X_9$	0.286	0.058	-0.164
$X_{10}$	0.278	-0.079	0.078
$X_{11}$	0.227	0.144	-0.356
$X_{12}$	0.286	0.077	-0.139
$X_{13}$	-0.188	0.205	-0.166
$X_{14}$	0.186	0.155	-0.440
$X_{15}$	-0.260	-0.160	0.254
$X_{16}$	0.289	-0.012	0.116
$X_{17}$	0.109	-0.149	0.411
$X_{18}$	0.205	-0.124	0.428

表4为特征向量矩阵,表示各主成分的系数,第1主成分得分 $Z_1$ 的表达式为:

$$Z_1 = 0.292X_1 + 0.295X_2 + 0.294X_3 + 0.296X_4 + 0.291X_5 + 0.010X_6 - 0.036X_7 - 0.011X_8 + 0.286X_9 + 0.278X_{10} + 0.227X_{11} + 0.286X_{12} - 0.188X_{13} + 0.186X_{14} - 0.260X_{15} + 0.289X_{16} + 0.109X_{17} + 0.205X_{18}$$

同理,可得第2主成分得分 $Z_2$ 和第3主成分得分 $Z_3$ 的表达式,计算出各主成分的得分和主成分的综合得分(表5)。表5中, $Z_1$ 、 $Z_2$ 和 $Z_3$ 分别为第1、第2和第3主成分的得分, $Z$ 是3个主成分的综合得分,可以看出水资源承载力的主成分得分有正有负,正负并不能代表水资源承载力的真实水平,只是表示水资源承载力所处的相对位置,正值表示被评价地区的水资源承载力高于平均水平,负值表示被评价地区的水资源承载力低于平均水平<sup>[27]</sup>。综合得分( $Z$ )越大,说明水资源承载力越大,反之则越小<sup>[26]</sup>。由图1可知,长江经济带水资源承载力呈现逐年上升的趋势。水资源承载力综合得分与第一主成分得分的正负方向基本趋于一致,但其变化率减小,这是因为第一主成分所占比重大。 $Z_1$ 呈现逐年增长的趋势,它主要反映的是水资源的利用情况。随着人口的增加和工农业的发展,用水量不断增加,供水压力增大。供水安全对保障经济社会的可持续发展具有重要的意义,2013年长江经济带供水量由2004年的 $2.35 \times$

$10^{11} \text{ m}^3$ 增加至 $2.65 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,10 a间增长了12.7%,供水大幅度增加。

第2主成分得分反映人口和经济发展对水资源承载力的影响程度。人口是水资源承载力的压力亦是动力,人口的增加意味着水资源需求量的加大,给水资源带来压力。水资源是经济社会发展的战略资源和经济资源,社会经济的发展有利于产业结构的调整和节水设施的改善,对水资源的集约利用具有重要的意义。科学技术的进步与应用,可提高水资源的开发利用程度与用水效率,对缓解水资源压力具有积极的促进作用。2004—2013年长江经济带生产总值由 $6.82 \times 10^{12}$ 元增加到 $2.59 \times 10^{13}$ 元,增加了2倍多,固定资产投资额从 $3.05 \times 10^{12}$ 元增加到 $1.79 \times 10^{12}$ 元,增加了近5倍,农村居民消费水平不断提高是水资源承载力提高的动力因素。有效灌溉面积的增加是经济发展促进了灌溉设施的改善,使水资源利用程度提高,有效灌溉面积从2004年的 $2.07 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 增加到2013年的 $2.34 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。水资源是生产力的重要因素,生产用水的可持续利用是产业发展的保障,但是如果产业废水得不到有效处理将污染水环境,导致水质性缺水问题的发生。水资源紧缺将制约工农业的可持续发展,并影响区域经济社会的发展。工业废水和城市污水的排放已造成长江流域区域性水环境污染,2013年工业废水排放量由2004年的 $1.08 \times 10^{10} \text{ t}$ 增加到 $1.36 \times 10^{10} \text{ t}$ ,增幅约30%,同期城市污水排放量增幅高于10%。第3主成分得分反映水资源自然禀赋条件对水资源承载力的影响程度。水资源自然禀赋条件中水资源量是保障水资源承载力的基础,相对稳定的水资源量为经济社会的可持续发展提供了坚实后盾。长江流域相对稳定的水资源量,在一定程度上缓解了长江经济带水资源承载力的压力。

表5 长江经济带2004—2013年水资源承载力得分

年份	各主成分得分			
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z$
2004	-4.68	-1.50	1.60	-3.02
2005	-3.68	0.07	1.55	-2.11
2006	-2.88	-1.23	-0.55	-2.09
2007	-2.09	1.10	-1.28	-1.27
2008	-0.82	1.88	-1.07	-0.31
2009	0.68	-0.84	-1.76	0.07
2010	1.49	3.17	-0.15	1.48
2011	3.05	-2.38	-1.66	1.30
2012	3.65	1.20	1.87	2.73
2013	5.27	-1.47	1.46	3.23

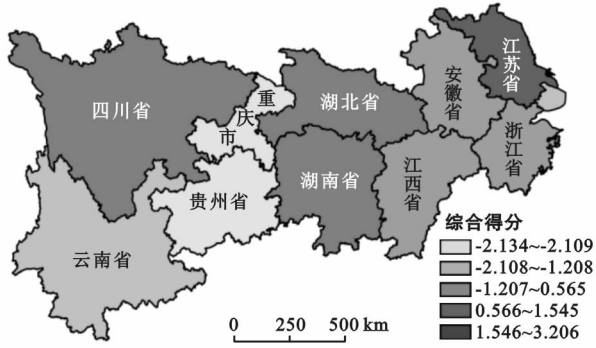


图 1 长江经济带 2004—2013 年水资源承载力动态变化

### 2.3 长江经济带水资源承载力的空间差异

以 2013 年为例分析长江经济带水资源承载力的空间差异,主成分的特征值和贡献率详见表 6,前 3 个主成分的累计贡献率达到 87.577%,能够全面地反映长江经济带各省市水资源承载力的驱动因子。

表 6 主成分的特征值和贡献率(空间差异)

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	9.263	51.463	51.463
2	4.796	26.643	78.106
3	1.705	9.471	87.577

表 7 为旋转后的因子载荷矩阵,第 1 主成分在  $X_3, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{14}$  和  $X_{16}$  上载荷较大,具有强正相关关系,从用水量的角度反映水资源承载力状况;第 2 主成分与  $X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$  和  $X_{18}$  有较大载荷,从水资源量和消费水平反映水资源承载力的状况;第 3 主成分所占的比重较小,主要从社会经济发展状况反映水资源承载力状况。3 大主成分从不同侧面反映了水资源承载力变化的驱动因子。

表 7 旋转因子载荷矩阵(空间差异)

指标	主成分		
	1	2	3
$X_1$	0.632	-0.313	0.688
$X_2$	0.525	0.457	0.666
$X_3$	0.754	0.113	0.576
$X_4$	-0.272	0.887	0.264
$X_5$	-0.178	0.841	0.433
$X_6$	-0.158	-0.865	0.409
$X_7$	-0.110	-0.882	0.311
$X_8$	-0.247	-0.903	0.024
$X_9$	0.899	0.130	0.391
$X_{10}$	0.908	-0.114	0.342
$X_{11}$	0.803	0.485	0.297
$X_{12}$	0.567	0.177	0.786
$X_{13}$	0.186	-0.155	0.707
$X_{14}$	0.747	0.452	0.096
$X_{15}$	0.405	0.347	0.608
$X_{16}$	0.874	-0.242	0.238
$X_{17}$	0.315	-0.085	0.762
$X_{18}$	0.431	0.663	0.584

表 8 为特征向量矩阵,表示各主成分的系数,第 1 主成分得分  $C_1$  的表达式为:

$$C_1 = 0.251X_1 + 0.307X_2 + 0.306X_3 + 0.086X_4 + 0.137X_5 - 0.054X_6 - 0.064X_7 - 0.155X_8 + 0.306X_9 + 0.271X_{10} + 0.304X_{11} + 0.310X_{12} + 0.166X_{13} + 0.247X_{14} + 0.255X_{15} + 0.228X_{16} + 0.216X_{17} + 0.292X_{18}$$

表 8 特征向量矩阵(空间差异)

指标	主成分		
	1	2	3
$X_1$	0.251	0.281	0.077
$X_2$	0.307	-0.063	0.143
$X_3$	0.306	0.098	-0.034
$X_4$	0.086	-0.379	0.319
$X_5$	0.137	-0.33	0.369
$X_6$	-0.054	0.401	0.287
$X_7$	-0.064	0.403	0.207
$X_8$	-0.155	0.363	0.106
$X_9$	0.306	0.085	-0.214
$X_{10}$	0.271	0.185	-0.255
$X_{11}$	0.304	-0.089	-0.209
$X_{12}$	0.310	0.075	0.182
$X_{13}$	0.166	0.168	0.315
$X_{14}$	0.247	-0.103	-0.299
$X_{15}$	0.255	-0.036	0.165
$X_{16}$	0.228	0.224	-0.303
$X_{17}$	0.216	0.158	0.285
$X_{18}$	0.292	-0.171	0.149

同理,可得第 2 主成分得分  $C_2$  和第 3 主成分得分  $C_3$  的表达式,计算出各主成分的得分和主成分的综合得分,如表 9 所示。由表 9 可知,长江经济带水资源承载力综合得分( $C$ )最大的是东部地区的江苏省, $C$  值为 3.205,最小的是西部地区的贵州省, $C$  值为 -2.134,表明长江经济带水资源承载力的地区差异明显。根据长江经济带 9 省 2 市水资源承载力综合得分分布图(图 2),以长江经济带东部、中部和西部分析水资源承载力的空间差异。综合得分大于 2.0 的省市只有东部的江苏省;综合得分介于 1.0~2.0 之间的省市有两个,分别位于中部(湖南省)和西部(四川省);综合得分介于 0~1.0 之间的省市有 3 个,分别位于东部(浙江省)和中部(安徽省和湖北省);综合得分介于 -1.0~0 之间只有中部的江西省;综合得分都小于 -1.0 的省市有 4 个,分别是东部的上海市和西部的云南省、贵州省和重庆市。通过分析可知,东部和中部地区水资源承载力综合得分整体较高,西部地区除四川省综合得分较高之外,其余省市

得分相对较低,排名相对靠后。分析其原因,西部地区位于长江流域的上游,地貌类型以山地、高原为主,水土流失严重,不仅影响当地水资源的开发利用,而且对中下游地区的水资源利用也带来不利影响。西部地区经济社会的发展只能依靠本地水资源,除了四川省水资源禀赋条件较好外,云贵两省受特殊的喀斯特地形影响,水资源量丰富但开发利用困难,缺水严重;而重庆市由于经济的快速发展,水资源供需矛盾突出。另外,受经济增长方式较为粗放与产业结构和布局等因素的影响,西部地区经济社会发展水平低,制约了水资源开发利用率和用水效率的提高,从而导致水资源承载力较差。中东部地区位于长江流域的中下游,丰富的过境水资源为区域经济社会的发展提供了支撑作用,促进了经济社会的快速发展。而中东部地区经济社会的快速发展有利于水资源开发利用率与用水效率的提高、有利于水污染治理水平的提高,从而使水资源承载力得以提升。但中东部地区水资源承载力的压力因素也不容忽视,仅依靠过境水并不能保证供水安全,若上游来水受到污染,将对中下游地区造成影响。而且,在中东部地区沿江工业企业密布,沿江城市化快速发展,大量工业废水和生活污水的排放加剧了水环境污染,导致水质性缺水的风险加大。

### 3 结论

(1) 对长江经济带水资源承载力时空变化特征的评价表明,2004—2013 年长江经济带水资源承载力呈现出逐年上升的趋势。人口的增加、区域经济的发展带动了水资源开发利用率与用水效率的提高,以及水污染治理水平的提高是水资源承载力上升的驱动因素。长江流域优越的水资源自然禀赋条件是长江经济带水资源承载力不断提升的基础,但区域性水质性缺水是长江经济带水资源承载力提高的制约因素。

(2) 长江经济带水资源承载力的区域差异显著,东部和中部地区总体较好,西部地区除四川省外水资源承载力相对较差。长江经济带水资源承载力的区域差异主要与所在地区的水资源自然禀赋条件和社会经济条件相关。

(3) 长江经济带水资源承载力时空变化的驱动因子众多且处于动态变化中,各省市在制定缓解水资源压力、提高水资源承载力的对策时要有针对性。同时,由于长江经济带的发展以长江流域水资源作为支撑,必须在流域尺度上加强水资源管理和水环境保护,以长江流域水资源的可持续利用促进长江经济带以及整个流域经济社会的可持续发展。

表 9 长江经济带 9 省 2 市水资源承载力得分(C)

地区	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C	排名
上海市	-0.896	-4.965	1.056	-1.684	9
江苏省	6.965	-1.092	-0.935	3.205	1
浙江省	1.112	-0.845	2.303	0.565	5
安徽省	0.759	0.378	-1.711	0.329	6
江西省	-1.051	1.206	-0.932	-0.307	7
湖南省	1.258	1.581	-0.282	1.042	3
湖北省	1.426	0.252	-0.480	0.756	4
贵州省	-3.876	-0.266	-0.716	-2.134	11
重庆市	-3.244	-1.47	-0.501	-2.109	10
四川省	0.815	3.435	2.212	1.545	2
云南省	-3.269	1.784	-0.014	-1.208	8

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Rijsberman M A, Ven Fhmvd. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000,20(3):333-345.

[2] Harris J M, Kennedy S. Carrying capacity in agriculture: Global and regional issues [J]. Ecological Economics, 1999,29(3):443-461.

[3] Haddadin M J. Water issues in Hashemite Jordan [J]. Arab Studies Quarterly, 2000,22(5):54-67.

[4] Falkenmark M, Lundqvist J. Towards water security: Political determination and human adaptation crucial[J]. Natural Resources Forum, 1998,22(1):37-51.

[5] 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.

[6] 惠泱河,蒋晓辉,黄强等. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J]. 地理研究,2001,20(2):191-198.

[7] 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.

[8] 朱一中,夏军,谈戈. 西北地区水资源承载力分析预测与评价[J]. 资源科学,2003,25(4):43-48.

[9] 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.

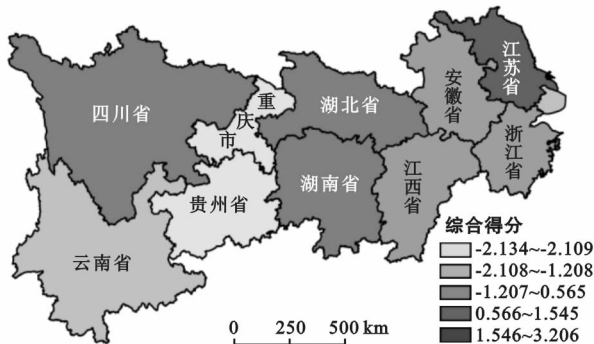


图 2 长江经济带水资源承载力空间分布

- [10] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究:以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229-237.
- [11] 余卫东, 闵庆文, 李湘阁. 水资源承载力研究的进展与展望[J]. 干旱区研究, 2003, 20(1): 60-66.
- [12] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348.
- [13] 段春青, 刘昌明, 陈晓楠, 等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 82-90.
- [14] 刘昌明, 王红瑞. 浅析水资源与人口、经济和社会环境的关系[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 635-644.
- [15] 秦莉云, 金忠青. 淮河流域水资源承载能力的评价分析[J]. 水文, 2001, 21(3): 14-17.
- [16] 赵建世, 王忠静, 秦韬, 等. 海河流域水资源承载能力演变分析[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 647-651.
- [17] 付玉娟, 何俊仕, 强小慢, 等. 辽河流域各市水资源承载力计算分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 171-176.
- [18] 曾浩, 张中旺, 孙小舟, 等. 湖北汉江流域水资源承载力研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(4): 22-25.
- [19] 曹一梅. 滇池流域水资源开发潜力及承载力评价[J]. 水电能源科学, 2013(11): 32-34.
- [20] 杨桂山, 朱春全, 蒋志刚. 长江保护与发展报告[M]. 湖北 武汉: 长江出版社, 2009: 57-65.
- [21] 任俊霖, 李浩, 伍新木, 等. 基于主成分分析法的长江经济带省会城市水生态文明评价[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(10): 1537-1544.
- [22] 张贞遴. 广东省经济社会发展与水资源需求关系研究[D]. 广东 广州: 中山大学, 2006.
- [23] 陆大道. 建设经济带是经济发展布局的最佳选择: 长江经济带经济发展的巨大潜力[J]. 地理科学, 2014, 34(7): 769-772.
- [24] 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, 13(1): 111-115.
- [25] 凌子燕, 刘锐. 基于主成分分析的广东省区域水资源紧缺风险评价[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2324-2328.
- [26] 许朗, 黄莺, 刘爱军. 基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(12): 1468-1474.
- [27] 周亮广, 梁虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 827-833.

(上接第 171 页)

- [12] 周德民, 程进强, 熊立华. 基于 DEM 的洪泛平原湿地数字水系提取研究[J]. 地理科学, 2008, 28(6): 776-781.
- [13] 曾红伟, 李丽娟, 柳玉梅, 等. Arc Hydro Tools 及多源 DEM 提取河网与精度分析: 以洮儿河流域为例[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(1): 22-31.
- [14] 李勇, 于宏兵, 艾丽娜, 张时佳, 耿丽娟. Arc Hydro 模型提取流域水文信息及精度分析: 以松花江流域为例[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(6): 120-123.
- [15] 郑子彦, 张万昌, 郜庆国. 基于 DEM 与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研究[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1730-1739.
- [16] 王立, 李海强, 马放, 等. 基于 SWAT 模型的流域河网提取方法[J]. 中国给水排水, 2014, 30(13): 92-95.
- [17] OCallaghan J F, Mark D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1984, 28(3): 323-344.
- [18] Quinn P, Beven K J, Chevallier P, et al. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models[J]. Hydrological Processes, 1991, 5(1): 59-79.
- [19] David M. ArcGIS Hydro Data Model[M]. USA: The University of Texas at Austin: Center for Research in Water Resources, 2001: 321-330.
- [20] 朱思蓉, 吴华意. Arc Hydro 水文数据模型[J]. 测绘与空间地理信息, 2006, 29(5): 87-90.
- [21] Arnod J G, Srinivasan R, Muttiah R S, et al. Continental scale simulation of the hydrologic balance [J]. Journal of American Water Resources Association, 1999, 35(5): 1037-1051.
- [22] 詹蕾. SRTM DEM 的精度评价及其适用性研究[D]. 江苏 南京: 南京师范大学, 2008.
- [23] 唐从国, 刘丛强. 基于 SRTM DEM 数据的清水江流域地表水文模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2009, 28(4): 652-655.