

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0064

宋帆, 杨晓华. 基于改进突变级数法的长江下游水资源承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(3): 24-32, 58. SONG F, YANG X H. Assessment of water resources carrying capacity based on improved catastrophe progression method: a case study in the lower reaches of Yangtze River[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(3): 24-32, 58. (in Chinese)

基于改进突变级数法的长江下游水资源承载力评价

宋帆, 杨晓华

(北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 随着水资源短缺问题的日益严峻, 水资源承载力研究成为区域可持续发展研究中的一个重要课题。为了克服人为主观排序的影响以及评分结果偏高的问题, 提出了区域水资源承载力评价的改进突变级数法, 并将其应用于长江下游。建立了由水资源供需、生态、经济、社会四个方面的17项指标组成的指标体系并对江西、安徽、江苏、浙江、上海五省市水资源承载力进行了评价。结果表明: (1) 改进突变级数法可较为客观地对指标进行排序, 且评价结果准确、分级明显。(2) 时间上, 五省市水资源承载力整体均呈上升趋势, 在个别年份有较大波动, 且与旱灾年份相一致。(3) 空间上, 2005-2015年五省市水资源承载力综合排序为浙江省>江西省>安徽省≈江苏省>上海市。(4) 从子系统要素来看, 长江下游水资源供需要素波动较大, 生态、经济要素稳定增长, 社会要素几乎不变且评分最低, 今后工作的重点是提高用水效率以及加强水利设施建设以增强应对灾害年的能力。

关键词: 水资源承载力; 长江下游地区; 改进突变级数法; 时间空间分析

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)03-0024-09

Assessment of water resources carrying capacity based on improved catastrophe progression method: a case study in the lower reaches of Yangtze River

SONG Fan, YANG Xiaohua

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the increasing shortage of water resources, the research on water resources carrying capacity has become an important topic in the study of regional sustainable development. In order to reduce the influence of subjective sorting of indexes and to solve the problem of high scoring in results, we proposed an improved catastrophe progression method for the assessment of water resources carrying capacity, and applied it to the lower reaches of the Yangtze River area from 2005-2015. An evaluation index system consisting of seventeen indexes in four aspects (water supply and demand, ecological, economic, social) has been constructed to evaluate the water resources carrying capacity of Jiangxi, Anhui, Jiangsu, Zhejiang, and Shanghai. The results showed that the improved catastrophe progression method could be used to sort the indexes objectively, and the evaluation results were accurate and clearly graded. In terms of time, the water carrying capacity of the five provinces was all on the upward trend, but it decreased significantly in certain years, which coincided with the drought years. In terms of space, the integrated rankings of water resources carrying capacity in 2005-2015 were Zhejiang province> Jiangxi province> Anhui province≈ Jiangsu province> Shanghai. In terms of the element layer, the water supply and demand element fluctuated greatly, the ecologi

收稿日期: 2017-12-31 修回日期: 2018-03-26 网络出版时间: 2018-04-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180423.1519.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0506603; 2016YFC0401305); 国家自然科学基金重点项目(41530635); 国家自然科学基金面上项目(51379013; 51679007)

Funds: National Key Research and Development Program of China (2017YFC0506603; 2016YFC0401305); Key Program of National Natural Science Foundation of China (41530635); General Program of National Natural Science Foundation of China (51679007; 51379013)

作者简介: 宋帆(1994), 男, 山东烟台人, 主要从事水资源承载力以及生态承载力方面研究。E-mail: guicai0014@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 杨晓华(1966), 女, 福建漳平人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。E-mail: xiaohuayang@bnu.edu.cn

cal and economic elements were growing steadily, and the social element seldom changed and had the lowest score. So we suggest to enhance the utilization efficiency of water resources, and to strengthen water conservancy construction to improve the capability of disaster response.

Key words: water resources carrying capacity; the lower reaches of the Yangtze River area; improved catastrophe progression method; time and space analysis

水作为一种不可替代的宝贵的自然资源,在社会经济发展以及人类进步过程中起到了重要的作用。随着人口不断增长和社会经济的发展,水资源短缺和水环境恶化成为一个全球性问题。我国水资源短缺现象十分明显,由此引发的环境问题在全国大部都有出现,水资源已成为制约我国社会经济可持续发展的重要因素^[1]。其中,水资源的时空分布不均使得水资源保护形势更加严峻^[2]。在全球气候变化的大背景下,水资源系统作为一个复杂的不确定性系统其本身是极其脆弱的^[3]。因此,如何正确评价一个地区的水资源承载能力就显得尤为重要,将会对当地的水资源评估、调控与分配起到十分关键的作用。水资源承载能力是指在当地特定的社会生产条件以及经济技术水平下,水资源可最大供给人民生活以及生态环境保护等用水的能力^[4]。目前水资源承载能力评价研究主要集中在三个方面:城市研究^[5-6]、地区研究^[7-8]以及流域研究^[9-10]。较常采用的方法有模糊综合评价法^[11]、主成分分析法^[12]、集对分析法^[13]、神经网络法^[14]、系统动力学等,也有一些其它方法被逐渐应用到这方面来,比如张军等人利用生态足迹法对疏勒河流域水资源承载能力与生态赤字做了研究^[15],屈小娥运用TOPSIS综合评价法对陕西省水资源承载能力进行了评价,实证测算了陕西省各城市水资源承载能力的动态变化及区域差异^[16]。由于影响水资源承载能力的因素大多具有模糊性、非线性等不确定性特点,因此想要对其进行准确的量化往往会遇到困难^[6]。上述传统方法中一些方法在具体运用中涉及的假定条件较多,会对结果造成较大不确定性影响;一些方法能给出的有效信息太少或者计算相对繁琐;另外大多数方法在评价过程中都需要确定指标权重,人主观性对结果的影响也是不可忽视的。

突变理论(Catastrophe theory)是Thom在20世纪60年代提出来的处理不连续现象的一种理论,在特定条件下,由于参数的微小变化而产生的系统突变可以通过突变理论实现量化。突变级数模型建立在突变理论的基础上,主要有以下几方面的优点:模型中状态变量的变化由控制变量的突变隶属函数

决定,而不是由分配的权重决定,减小了主观因素对结果产生的影响;此外,该模型虽然综合了模糊数学和复杂科学的特征,但归一化公式的存在使得实际操作简单易行、便于理解;最后,该模型评价指标层次清晰,适合对各子系统逐步分层剖析评价。近年来突变级数法逐渐在科学领域展示出其对不确定性计算的独特优势,并得到了广泛应用,例如Wang等人^[17]通过基于灵敏度分析算法的突变级数法,确定了控制洪水强度的主要指标;唐志鹏等人^[18]利用突变级数法对我国CO₂减排能力进行了评价。另外,突变级数法还被大量应用在了经济、管理领域。水资源承载力的变化受到众多因素的影响,各因素通过复杂的非线性联系,使整个水资源系统发生连续或非连续变化,我们认为这是一种特殊的突变行为。基于此,本研究建立了水资源承载力评价的突变级数模型,同时通过改进该方法以求进行更合理的评价。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

以往的研究多针对某一地区,本次研究将长江下游五省一并作为研究对象,选取的所有指标皆可进行区域对比。并将五省数据一起进行标准化处理,可对各省水资源承载力进行一个合理的横向对比。

长江下游以江西省九江市湖口县为分界点,包括江西、安徽、江苏、浙江、上海五个省级行政区。位于亚热带季风盛行地区,雨量充沛,光照充足;天气变化较复杂,易出现灾害性气候;降雨时间分布不均,主要集中在夏季;航运发达,货运客运流量大。长江下游地区是我国经济最发达、城市化水平最高、对外开放度最大的地区,也是对我国全球化进程有重大影响的地区,在中国社会发展中具有举足轻重的战略地位。

长江下游水资源相对比较丰富,2015年江西、安徽、江苏、浙江、上海五省平均降雨量为1 678 mm,远高于全国平均水平(661 mm)。五省水资源总量为4 967亿m³,占全国水资源总量的17.76%,相对于5.46%的面积占比而言十分丰富。但近年来,长江沿

线社会经济发展迅速,对水资源的需求与日俱增。2015 年,下游五省用水量达到了 1 258 亿 m³, 占全国用水量的 20.61%, 大幅度超过水资源拥有量占比。同时,工业、农业产生的点、面源污染物大量进入河网水系,使得长江下游城市群人水关系紧张,流域性水环境污染严重,水资源承载形势严峻。因此,对此地区进行正确的水资源承载力评价十分必要,

1.2 数据来源

本次数据主要来自以下数据集:各省《统计年鉴》(2006-2016) 各省《水资源公报》(2005-2015) 以及《环境状况公报》(2005-2015)。

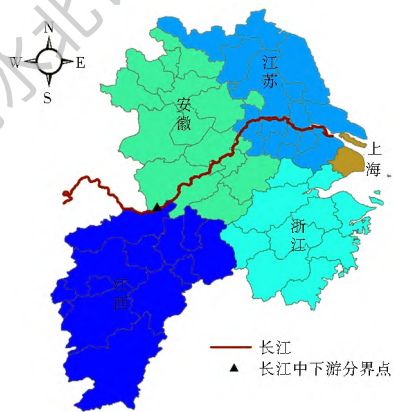


图 1 长江下游地区

Fig. 1 The lower reaches of the Yangtze river area

2 研究方法

2.1 突变级数法简介

各类生态系统的平衡都不是绝对稳定的,一旦受到扰动就会迅速从一种稳定态转化为另外一种稳定态,这个过程叫做突变。而突变理论研究的就是自然现象与社会活动中事物连续性中断的质变过程,描述其现象以及一般规律^[19]。突变级数法是在突变理论的基础上发展起来的,它以势函数 $f(x)$ 为

研究对象,通过状态变量以及外部控制参量 $f = f(x, A)$ 来描述系统突变。通过求解 $f'(x)$ 和 $f''(x)$ 可分别得到系统的临界点方程以及奇点集方程,再通过联立求解 $f'(x)$ 和 $f''(x)$ 消去 x , 得到系统分叉集方程,处于分叉集中的控制变量值会使势函数 $f(x)$ 发生突变,即发生了系统状态的改变。由于控制变量的数值单位不统一,因此需要通过分叉集导出归一化公式,将系统各个控制变量不同的质态化为统一质态。当状态变量为 1 时,常见的突变模型主要有以下 4 种,见表 1^[20]。

突变级数法主要步骤如下。

(1) 根据系统内部的作用机理将系统分解多层次结构,建立指标体系,并在每一层对相关指标进行重要性排序。

(2) 自下而上建立水资源承载力评价的突变级数模型。

(3) 原始数据标准化处理。

由于原始数据在数值单位方面存在较大差异,无法直接进行合并计算。因此采用模糊数学法将原始数据转化为 [0, 1] 之间的无量纲数值。时间尺度上对单省份多年数据进行标准化处理,空间尺度上对多省份多年数据共同进行标准化处理。

标准化处理公式如下:

$$\frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, X_{\min} < X < X_{\max} \quad (1)$$

$$\frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}}, X_{\min} < X < X_{\max} \quad (2)$$

其中 X_{\max} , X_{\min} 分别为所有指标样本中的最大值以及最小值。公式(1)适用于越大越好型指标,公式(2)适用于越小越好型指标。

(4) 归一化运算。将标准化后的数据进行归一化计算,求出评价系统各要素以及总承载力的突变隶属度值。

表 1 一维状态变量的突变模型

Tab. 1 Catastrophe model of one dimensional state variables

突变模型种类	控制变量维数	势函数	分叉集	归一化公式
折叠模型	1	$f(x) = x^3 + ax$	$a = -3x^2$	$x_a = a^{1/2}$
尖点模型	2	$f(x) = x^4 + ax^2 + bx$	$a = -6x^2$	$x_a = a^{1/2}$
			$b = 8x^3$	$x_b = b^{1/3}$
燕尾模型	3	$f(x) = 1/5x^5 + 1/3ax^3 + 1/2bx^2 + cx$	$a = -6x^2$	$x_a = a^{1/2}$
			$b = 8x^3$	$x_b = b^{1/3}$
			$c = -3x^4$	$x_c = c^{1/4}$
蝴蝶模型	4	$f(x) = 1/6x^6 + 1/4ax^4 + 1/3bx^3 + 1/2cx^2 + dx$	$a = -10x^2$	$x_a = a^{1/2}$
			$b = 20x^3$	$x_b = b^{1/3}$
			$c = -15x^4$	$x_c = c^{1/4}$
			$d = 4x^5$	$x_d = d^{1/5}$

2.2 方法改进

本次研究主要从以下两个方面对突变级数法进行了改进: (1) 排序方式的改进。传统的排序方式多采用主观排序法, 近年来演化为熵权法客观排序, 但都不可避免地会对排序结果的准确性存在影响。为最大程度地减少这种影响。本次研究采用主客观相结合的方法, 在要素层采用层次分析法, 指标层采用熵权法。既对各要素层进行了合理排序, 在各要素层内部又充分体现了各指标自身的特征。(2) 对隶属度计算结果的改进。由于评价隶属度值集中在 0.8~1 之间且分数之间相差很小, 本次研究对评价结果进行了改进, 具体步骤如下: a. 将指标层各指标全部赋值{0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1}, 根据所建立的突变级数模型逐级进行计算, 得到各评价等级隶属度值 r_i 。b. 将 r_i 当作等级刻度对水资源承载力评价价值进行

调整, 不同等级相对应的评分区间是 (r_i, r_{i+1}) ($i=0, 1, 2, \dots, 9$)。假设水资源评价系统隶属度得分为 R_j ($j=1, 2, \dots, n$), 若 $r_i \leq R_j \leq r_{i+1}$, 则调整隶属度为:

$$R'_j = \left[\left(\frac{R_j - r_i}{r_{i+1} - r_i} \right) + i \right] \times 0.1 \quad (3)$$

3 模型应用

3.1 指标体系的构建与排序

指标选取主要考虑以下两方面的因素: (1) 建立在评价区域客观条件的基础上, 选取本地区水资源发展的主要制约指标。(2) 全部选取人均数据、单位面积数据等具有通常可比性的指标或者可转化为此类型的指标进行空间对比分析。本次评价在参考已有文献^[1, 16]基础上进行了指标选取, 评价指标体系见表 2, 包括 4 个要素层共 17 个指标。

表 2 水资源承载力评价指标体系

Tab. 2 Assessment index system of water resources carrying capacity

目标层	要素层	子要素层	指标层	含义
W 水资源承载力	A 水资源供需系统	A1	A11 人均水资源量/ m^3	水资源的人均拥有量
			A12 产水模数/($万 m^3 \cdot km^{-2}$)	单位面积的产水能力
			A13 供水模数/($万 m^3 \cdot km^{-2}$)	单位面积的供水能力
			A14 水资源开发利用率(%)	水资源的开发利用程度
	B 生态环境系统	B1	A21 年平均降雨量/mm	地区水资源自然补给能力
			B11 城镇污水处理率(%)	城镇的水清洁状况
	C 经济系统	C1	B12 建成区绿化覆盖率(%)	绿色可持续能力
			B13 Ⅰ类水以上占比(%)	区域水资源质量
			B21 环保投资占 GDP 比重(%)	对环保的重视程度
	D 社会系统	D1	B22 生态环境用水量(%)	生态环境的保障程度
			C11 人均 GDP/元	区域经济发展水平
			C12 工业用水定额/($m^3 \cdot 万元^{-1}$)	工业用水效率
			C13 农业用水定额/($m^3 \cdot 万元^{-1}$)	农业用水效率
D 社会系统	D1	C14 万元 GDP 用水量/ m^3	经济系统用水效率	
		D11 人口密度/($人 \cdot km^{-2}$)	区域人口对水资源压力	
		D12 人口自然增长率(‰)	区域人口对水资源动态压力	
		D13 人均居民生活用水量/($L \cdot d^{-1}$)	城市居民用水情况	

参考已有评价标准采用层次分析法对要素层以及子要素层进行重要性排序见表 2, 采用熵权法对指标层进行权重计算, 以确定其重要性排序见表 3。

3.2 构建突变模型

结合表 1 中突变模型分类及表 3 中指标排序, 以江西省为例建立水资源承载力评价基本突变模型(图 2)。以要素层 A 为例, A11 至 A14 四个指标组成了蝴蝶模型, 根据蝴蝶突变模型的分叉集方程以及归一化公式可对 A1 隶属度进行计算, 同理得到 A2 隶属度。A1 和 A2 又组成了一个尖点模

型, 可得 A 要素层隶属度。待四个要素层隶属度全部计算完毕, 可根据蝴蝶模型公式计算总的水资源承载力隶属度, 同理可得其他四省突变模型。值得注意的是, 指标进行评判时要考虑两个原则: “互补”和“非互补”原则, 若各控制变量之间存在明显的相关联系时, 即为“互补”型, 此时一般用平均值法取值; 反之若各控制变量之间没有明显关联, 为“非互补”型, 按照“大中取小”的原则取值^[21]。本次突变模型中指标间关系比较紧密, 均为“互补”型指标。

表 3 各省指标排序结果

Tab. 3 The ranking results of the indexes of each province

目标层	要素层	子要素层	指标层	江西省	安徽省	江苏省	浙江省	上海市
W 水资源承载力	A 水资源供需系统	A1	A11 人均水资源量	A13	A13	A13	A13	A13
			A12 产水模数	A12	A12	A12	A12	A12
			A13 供水模数	A11	A11	A11	A11	A11
			A14 水资源开发利用率	A14	A14	A14	A14	A14
		A2	A21 年平均降雨量	A21	A21	A21	A21	A21
	B 生态环境系统	B1	B11 城镇污水处理率	B11	B11	B13	B13	B13
			B12 建成区绿化覆盖率	B13	B13	B11	B11	B11
			B13 Ⅵ类水以上占比	B12	B12	B12	B12	B12
		B2	B21 环保投资占GDP比重	B22	B22	B21	B22	B22
			B22 生态环境用水率	B21	B21	B22	B21	B21
	C 经济系统	C1	C11 人均GDP	C11	C11	C11	C11	C11
			C12 工业用水定额	C13	C12	C13	C13	C12
C13 农业用水定额			C14	C14	C12	C12	C14	
C14 万元GDP用水量			C12	C13	C14	C14	C13	
D 社会系统	D1	D11 人口密度	D12	D11	D11	D11	D11	
		D12 人口自然增长率	D11	D12	D13	D12	D12	
		D13 人均日居民生活用水量	D13	D13	D12	D13	D13	



图 2 评价突变模型

Fig. 2 Catastrophe progression model

3.3 归一化计算

(1) 时间尺度。根据归一化公式以及标准化处

理后的数据得到五省市水资源承载力评价价值以及改进值见表 4。

表 4 各省水资源承载力评价价值以及改进值

Tab. 4 Assessment value of water resources carrying capacity and its improved value

年份	江西省		安徽省		江苏省		浙江省		上海市	
	评价结果	改进结果	评价结果	改进结果	评价结果	改进结果	评价结果	改进结果	评价结果	改进结果
2005	0.466 4	0.054 7	0.821 9	0.096 4	0.693 0	0.081 3	0.649 9	0.076 2	0.682 8	0.080 1
2006	0.880 2	0.168 2	0.712 6	0.083 6	0.914 2	0.282 7	0.890 0	0.192 1	0.907 6	0.256 5
2007	0.838 1	0.098 3	0.919 8	0.306 8	0.939 7	0.417 1	0.931 6	0.370 3	0.911 7	0.272 8
2008	0.926 7	0.343 6	0.920 4	0.309 8	0.935 2	0.389 7	0.926 6	0.343 2	0.933 4	0.379 7
2009	0.920 5	0.310 2	0.924 6	0.332 3	0.933 4	0.380 0	0.936 8	0.398 3	0.920 5	0.310 3
2010	0.967 6	0.631 3	0.956 4	0.536 6	0.880 2	0.168 0	0.961 4	0.576 6	0.931 4	0.369 3
2011	0.858 4	0.115 0	0.939 8	0.418 3	0.945 2	0.454 4	0.805 8	0.094 5	0.836 3	0.098 1
2012	0.968 1	0.636 5	0.960 3	0.568 1	0.939 0	0.412 9	0.954 5	0.520 7	0.941 9	0.432 4
2013	0.940 5	0.422 7	0.846 3	0.099 3	0.836 9	0.098 2	0.936 3	0.395 5	0.934 0	0.383 2
2014	0.950 6	0.491 3	0.962 2	0.583 8	0.978 3	0.737 1	0.930 1	0.361 8	0.939 2	0.413 9
2015	0.961 2	0.575 0	0.940 9	0.425 7	0.986 3	0.825 4	0.966 1	0.617 6	0.977 1	0.724 8

(2) 空间尺度。与时间尺度计算方法相同,将五省市数据合并进行标准化处理以及模型构建,得到各省水资源评价隶属度改进值见图4。

(3) 要素层。综合各省计算数据得到长江下游地区总的水资源承载力以及各要素层隶属度评价改进值,见图5。

3.4 结果与讨论

(1) 时间尺度五省水资源承载力评价。

时间尺度五省水资源承载力评价结果见图3,从单省份分析,江西省经济要素评分稳步上升,社会要素评分较低且几乎不变,其余两个子系统均有较大年份波动,由于重要性排序的原因导致水资源承

载力综合得分也随之波动。值得注意的是2011年,四个子系统得分全部在0.3以下,导致综合得分出现断崖式下滑,从上年的0.63直接跌到了0.11。通过历史资料可以发现,2011年江西省大旱,历史同期降水量以及河流水位都达到了历史低点,导致可用水大量减少,水资源承载力大打折扣,并且环保投资以及生态用水的投入也出现了不同程度的减少。总体上,江西省水资源承载力呈上升趋势,但过于依赖自然气候,自我调节能力较差,年份波动大。此变化趋势与安彬^[22]等人的研究结果一致,今后需加强水利设施建设,在汛期储水以提高应对灾变年份的能力。

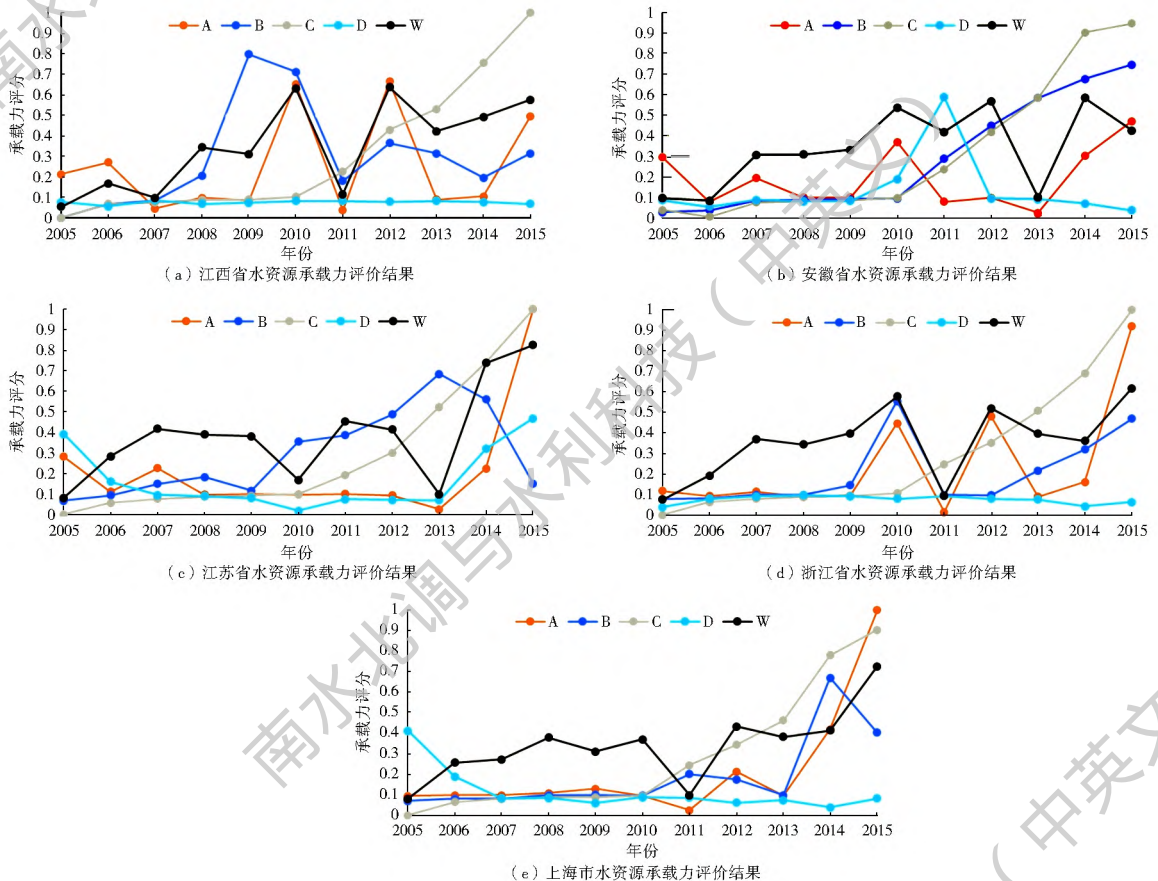


图3 各省水资源承载力评价结果

Fig. 3 Assessment results of water resources carrying capacity of each province

2005–2015年间,安徽省生态环境要素和经济要素稳步上升。社会因素除了2011年较好外,其余年份评分较低且有下滑趋势,人口自然增长率居高不下是其主要原因。水资源承载力综合评分主要随水资源供需系统上下波动,2010年以后(除2013年外)基本稳定在0.4~0.6之间。通过查阅资料发现2013年安徽省大旱,高温气候为1961年以来最强,主汛期降水为2005年来最少,特别是淮河以南水资源匮乏、作物减产严重。此综合得分变化符合实际情况,并且与余盼^[23]等人的水生态足迹研究结果变化

趋势完全一致。总的来看,安徽省近年来水资源承载能力一般,小范围内波动但并没有明显的上升趋势,需采取措施提高其承载能力使其做到稳中有升,建议除了完善水资源调配制度之外控制人口增长。

江苏省经济要素逐年上升,水资源供需要素和社会要素在2005–2013年评分较低且略有下降,但在2013年以后迅速增长。与此相反,生态要素在2005–2013年评分稳定上升,在2013年以后迅速下降,主要原因是生态环境用水量的降低。在作为转折点的2013年江苏省同样遭遇了旱灾,但程度较

安徽省轻。整体来看,江苏省近两年水资源承载力上升明显,今后提升水资源承载力的主要措施应放在生态环境要素上,提高生态环境治理投资以及生态用水率。

浙江省经济要素稳定上升,社会要素评分较低且几乎不变,主要归因于人口自然增长率的居高不下甚至略有上升。水资源供需要素和生态环境要素经过 2011 和 2013 年两个旱年之后逐渐好转。在此背景下,整体水资源承载力在波动中略有上升,此变化趋势与周丽^[24]的研究成果基本一致。今后提升水资源承载力的主要措施应该是控制人口增长,减轻社会对水资源系统的压力。

上海市是五个省级行政区中水资源承载力波动最小的。作为我国的经济中心,过量的人口涌入造成了巨大的用水压力,因此社会因素评分一直偏低。水资源供需因素、经济因素、生态因素则为稳定的上升趋势,除 2011 年旱灾外整体水资源承载力稳中有升。总的来说,虽然整体水资源承载能力不强但发展趋势是好的,这与丁华^[25]等人的研究成果保持一致。今后的工作重点应放在提高用水效率上,增加中水回用,形成水资源的多级利用体系,使有限的水资源发挥最大的效用。

综合五省份整体情况来看,2005–2015 年长江下游五省市综合水资源承载力整体处于上升趋势,但个别年份波动较大,对自然降水依赖较强。经济要素评分稳定上升,但社会要素评分很低,人口对水资源压力依然巨大。

(2) 空间尺度五省水资源承载力评价。

空间尺度长江下游五省市水资源承载力比较结果见图 4。可分为两个时间段来看,2005–2009 年五省市水资源承载能力增长趋势大致相同且波动不大,除浙江省外其他四省在 2009 年时水资源承载能力评分全部都在 0.389~0.422 之间,而浙江省承载力明显大于其他四省。原因如下:首先是 2005–2009 年间各省水资源供需系统指标变化不明显。以人均水资源量为例,2005–2008 年各省人均水资源量与 2009 年平均差距分别是 6.27% (浙江省), 8.21% (安徽省), 9.58% (上海市), 13.51% (江苏省), 23.97% (江西省), 而在 2010–2015 年间这一数值是 30.28%, 16.69%, 29.14%, 18.24%, 51.81%。除此之外,2005–2009 年经济发展速度还比较慢,并且对于生态环境的重视程度还不够。综合这些因素导致了上述变化趋势的产生,而浙江省得分较高的原因将在后文说明。2010–2015 年间,五省市水资源承载能力都有较大幅度波动,主要

原因是自然降水条件变化较大。但由于科技的进步以及对水环境保护的重视,整体综合承载力又能做到波动中有上升。此阶段各省水资源承载力强弱排序比较明显:浙江省>江西省>安徽省>江苏省>上海市。若将评分等级区间 $\{[0, 0.2], (0.2, 0.4], (0.4, 0.6], (0.6, 0.8], (0.8, 1]\}$ 分别对应承载能力 $\{\text{极弱, 弱, 中等, 强, 极强}\}$,可得各省水资源承载力空间对比见表 5。

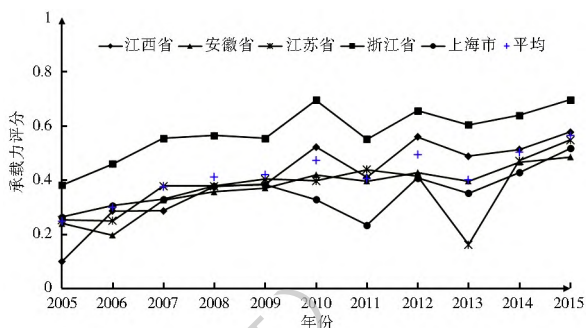


图 4 五省水资源承载力空间比较

Fig. 4 The spatial comparison of water resources carrying capacity of the five provinces

表 5 五省水资源承载力评价等级

Tab. 5 The assessment grade of water resources carrying capacity of each province

省份	江西省	安徽省	江苏省	浙江省	上海市
“极弱”年份数	1	1	1	0	0
“弱”年份数	4	6	5	1	8
“中等”年份数	6	4	5	5	3
“强”年份数	0	0	0	5	0
“极强”年份数	0	0	0	0	0
超过区域平均值年份数	6	0	3	11	2
各年平均值	0.409 (中等)	0.370 (弱)	0.372 (弱)	0.576 (中等)	0.356 (弱)

由表 5 可知,长江下游五省 2005–2015 年水资源承载力排名为浙江省>江西省>江苏省>安徽省>上海市,表现最好的是浙江省,评分接近“强”,究其原因是浙江省在生态环境治理以及环保投入上评分远远领先其他省,并且有五省中最高的降雨量和评分第二的水资源供需系统。江西省是另外一个中等承载力省份,得益于较高的降雨量以及较低的用水量,江西省水资源量尤为充足,2005–2015 年间江西省平均降雨量达到了 1 666 mm,比五省平均量 1 362 mm 多出了 22.3%,而 145 000 m³/km² 的供水模数更是远远低于其他四省。但由此也引发了水资源浪费,废水处理率低等一系列问题。江西省需加强用水效率,增加在水处理上的投入,使水资源承载力得到进一步提升并具有较强的抵御灾害年的能力。安徽省和江苏省水资源承载力大致相当,属于

第三梯队。二者在水资源供需上表现相仿,安徽省在水环境保护以及治理方面大幅度高于江苏省,生态环境用水率高达1.04%,仅次于浙江省。但江苏省在经济能力以及控制人口对水资源的压力上的表现远远好于安徽省,今后二省需在薄弱处加以改进。上海市在四个省份中水资源承载力表现最差,除经济要素外其他三个子系统都很脆弱。由于拥有众多的人口以及发达的工业,符合用水条件的水资源不能自给自足,水资源开发利用常年居高不下。上海市正在并将长期在产业区域转移上进行努力,在舒缓人口压力的同时进行高耗水行业的改革。当然,得益于经济要素和生态环境要素的稳定上升,上海市整体水资源承载力评分呈上升趋势。

(3) 研究区水资源承载力整体评价。

长江下游五省市水资源承载力综合得分以及各要素得分平均值见图5,从图中可以看出,长江下游水资源承载力整体处于上升趋势,发展势头良好。2015年已经接近“强”承载水平,与李燕^[26]等人的研究成果一致。从各要素来看,生态环境要素得分以及经济得分在十年间都得到了较大提升,由于长江下游经济的快速发展,人口压力的问题一直都没有得到解决,因此社会要素评分一直较低且没有上涨趋势。水资源供需要素年际变化非常大,2011年和2013年两个旱灾年对水资源系统造成了非常大的冲击。未来一段时间内长江下游针对水资源承载力各要素的工作中心应该在以下几方面:加强水利设施建设以增强应对水资源年际变化的能力;加强对生态环保的投入,提高生态系统自身保水产水能力;保持科技、经济的发展。调整产业结构,降低高耗水行业的比例;增强用水效率,提高居民节水意识,最大化地弱化人居用水量给水资源系统带来的压力。

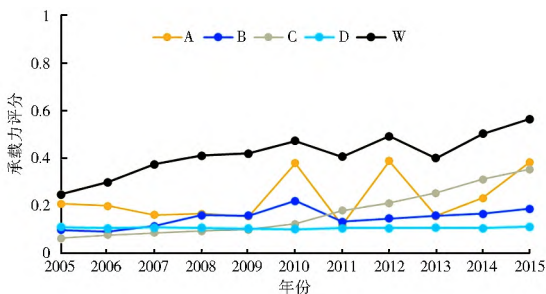


图5 长江下游五省市水资源承载力整体评价

Fig. 5 Overall assessment results of water resources carrying capacity of the five provinces in the lower reaches of Yangtze river area

4 结论

本次研究利用改进突变级数法对长江下游五省市水资源承载力进行了评价,方法可行且评价结果

准确。长江下游五省市中水资源承载力最强的是浙江省,最差的是上海市,整个长江下游整体水资源承载力在逐渐变强。今后的工作重点在水利设施建设上,要建立一套完整的水资源常态与应急综合管理机制来调节年份间的差异,同时要在提高用水效率上努力,形成水资源多级利用体系。

改进突变级数法优点非常明显,权重只参与指标排序而不参与计算,既可以保证指标排序的可信度,又可以最大程度地避免人为赋权的主观性。另外,突变级数法简单易懂便于操作,改进后的结果层次分明。本次研究结果与之前学者的成果基本一致,证明本方法在水资源承载力中是切实可行的,差别在于本次研究结果的年际变化幅度更大一些。如何削弱个别指标对结果的过大影响以及如何建立更为科学合理的指标体系将是之后研究的重点。

本研究为水资源承载力的评价开拓了新思路,并且拓展了突变级数法的应用领域。评价结果可为各省今后水资源的管理规划提供理论参考,有利于长江下游水资源的可持续发展。

参考文献(References):

- [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 J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese)) DOI: 10.11849/zrzyxb.2011.02.009.
- [2] 张利平,夏军,胡志芳.中国水资源状况与水资源安全问题分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(2):116-119. (ZHANG L P, XIA J, HU Z F. Situation and problem analysis of water resources security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-119. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-8227.2009.02.004.
- [3] YANG X H, SUN B Y, ZHANG J, et al. Hierarchy evaluation of water resources vulnerability under climate change in Beijing, China[J]. Natural Hazards, 2016, 84: S63-S67. DOI: 10.1007/s11069-015-1932-2.
- [4] 戴明宏,王腊春,魏兴萍.基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J].水土保持研究,2016,23(1):193-199. (DAI M H, WANG L C, WEI X P. Spatial difference of water resource carrying capacity of Guangxi using fuzzy comprehensive evaluation model based on entropy weight method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 193-199. (in Chinese))
- [5] SONG X M, KONG F Z, ZHAN C S. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 857-873. DOI: 10.1007/s11269-010-9730-9.
- [6] 邢军,孙立波.基于因子分析与模糊综合评判方法的水资源承载力评价[J].节水灌溉,2014(4):52-59. (XING J, SUN L B. Evaluation of water resources carrying capacity based on factor

- analysis and fuzzy comprehensive evaluation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(4): 52-59. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2014.04.013.
- [7] YANG Q Y, ZHANG F W, JIANG Z C, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(1): 1-8. DOI: 10.1007/s12665-015-4816-6.
- [8] 康艳, 宋松柏. 水资源承载力综合评价的变权灰色关联模型[J]. *节水灌溉*, 2014(3): 48-53. (KANG Y, SONG S B. Variable weight and grey correlation model for water resources carrying capacity comprehensive assessment[J]. *Water Saving Irrigation*, 2014(3): 48-53. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-4929.2014.03.013.
- [9] 顾自强, 高飞, 汪周园. 汉江流域水资源现状及承载力研究[J]. *环境与可持续发展*, 2014(6): 99-102. (GU Z Q, GAO F, WANG Z Y. Study on carrying capacity water resources and status of Hanjiang River Basin[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2014(6): 99-102. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1673-288X.2014.06.025.
- [10] WANG Y J, YANG G, XU H L. Evaluation of water resources carrying capacity based on fuzzy comprehensive evaluation on river basin in arid zone. *Advanced Materials Research*, 2010, 113-116(3): 488-494. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.113-116.488.
- [11] 段新光, 栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(3): 119-122. (DUAN X G, LUAN F F. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinjiang based on fuzzy comprehensive model[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(3): 119-122. (in Chinese)
- [12] 肖迎迎, 宋孝玉, 张建龙. 基于主成分分析的榆林市水资源承载力评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 218-223. (XIAO Y Y, SONG X Y, ZHANG J L. Assessment of water resources carrying capacity in Yulin based on principal component analysis[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(4): 218-223. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7601.2012.04.039.
- [13] 杨鑫, 王莹, 王龙, 等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(4): 98-102. (YANG X, WANG Y, WANG L, et al. Assessment model of water resources carrying capacity based on set pair analysis in Yunnan Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(4): 98-102. (in Chinese) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.04.18.
- [14] LIU S F, CHEN J H. Water resources carrying capacity based on the theory of ANN[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 99-105.
- [15] 张军, 张仁陟, 周冬梅. 基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J]. *草业学报*, 2012, 21(4): 267-274. (ZHANG J, ZHANG R Z, ZHOU D M. A study on water resource carrying capacity in the Shule river basin based on ecological footprints[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(4): 267-274. (in Chinese) DOI: 10.11686/cyxb20120432.
- [16] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(2): 91-97. (QU X E. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi province[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(2): 91-97. (in Chinese) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.050.
- [17] WANG L N, CHEN X H, XU Y X, et al. A catastrophe progression approach based index sensitivity analysis model for the multivariate flooding process[J]. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 2016: 1-13. DOI: 10.1007/s00477-016-1339-y.
- [18] 唐志鹏, 刘卫东, 周国梅, 等. 基于突变级数法的中国CO₂减排的影响要素指标体系及其评价研究[J]. *资源科学*, 2009, 31(11): 1999-2005. (TANG Z P, LIU W D, ZHOU G M, et al. An evaluation index system about contributing factors of China's CO₂ abatement based on a catastrophe progression method[J]. *Resources Science*, 2009, 31(11): 1999-2005. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2009.11.023.
- [19] 郑雯, 刘金福, 王智苑, 等. 基于突变级数法的闽南海岸带生态安全评价[J]. *福建林学院学报*, 2011, 31(2): 146-150. (ZHENG W, LIU J F, WANG Z Y, et al. Eco security assessment in southern coastline of Fujian based on catastrophe theory[J]. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2011, 31(2): 146-150. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1007-389X.2011.02.011.
- [20] 麻秋玲, 林惠花. 基于突变级数法的福州市生态安全评价[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 29(3): 118-124. (MA Q L, LIN H H. Application of catastrophe progression method in assessing urban eco security of Fuzhou City[J]. *Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, 29(3): 118-124. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-5277.2013.03.021.
- [21] 白金生. 突变理论在环境科学研究中的应用[J]. *环境科学与管理*, 2015, 40(11): 70-73. (BAI J S. Application of catastrophe theory in environmental science research[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(11): 70-73. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1673-1212.2015.11.017.
- [22] 安彬, 肖薇薇. 基于水足迹理论的江西省水资源时空特征分析[J]. *江西农业学报*, 2016, 28(8): 74-78, 82. (AN B, XIAO W W. Analysis of spatial and temporal features of water resources in Jiangxi Province based on water footprint[J]. *Acta Agriculture Jiangxi*, 2016, 28(8): 74-78, 82. (in Chinese) DOI: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2016.08.17.
- [23] 余盼, 熊峰. 安徽省水资源生态足迹动态分析: 2005—2013[J]. *南京林业大学学报(人文社会科学版)*, 2015, 15(1): 79-86. (YU P, XIONG F. Dynamic analysis of ecological footprint of water resources in Anhui Province: from 2005 to 2013[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Humanities and Social Sciences Edition)*, 2015, 15(1): 79-86. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1165.2015.01.010.
- [24] 周丽. 基于多元统计分析的浙江省水资源承载力综合评价[J]. *浙江水利科技*, 2016, 44(1): 48-52. (ZHOU L. Comprehensive evaluation on the water resources bearing capacity of Zhejiang Province based on multivariate statistical analysis[J]. *Zhejiang Hydraulics*, 2016, 44(1): 48-52. (in Chinese) DOI: 10.13641/j.cnki.33-1162/tv.2017.02.005.

(下转第58页)

- tional method of design flood in small watershed[J]. Yangtze River, 2000, 31(7): 13-14. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2000.07.005.
- [15] 王博, 崔明霞. 城镇小汇水面积设计洪水计算方法比较[J]. 中国农村水利水电, 2009(10): 84-86, 93. (WANG B, CUI M X. Comparison of calculation methods for catchments area of design flood in town[J]. China Rural Water and Hydropower, 2009(10): 84-86, 93. (in Chinese))
- [16] 刘俊萍, 韩君良. 小流域截洪沟洪峰流量计算方法的比较[J]. 中国水运, 2015, 15(3): 153-155. (LIU J P, HAN J L. Comparison of calculation methods of flood peak discharge of cut-off ditch in small watershed[J]. China Water Transport, 2015, 15(3): 153-155. (in Chinese))
- [17] 郑佳重, 朱梅, 黄双双, 等. “84 办法”在特小流域洪峰流量计算中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(6): 63-65, 69. (ZHENG J Z, ZHU M, HUANG S S, et al. Application of 84 method in peak discharge calculation of extra small watershed[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(6): 63-65, 69. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.06.014.
- [18] 钟鸣辉. 水土保持截排水工程设计标准比较[J]. 南昌工程学院学报, 2014, 33(4): 77-80. (ZHONG M H. A comparison of design standards of water interception and drainage in soil and water conservation[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2014, 33(4): 77-80. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4869.2014.04.017.
- [19] GB 51018-2014, 水土保持工程设计规范[S]. (GB51018-2014, Code for design of soil and water conservation engineering[S]. (in Chinese))
- [20] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000. (LI W, XU X P. Hydraulics[M]. Wuhan: Wuhan University Press of Hydraulic and Electric Engineering, 2000. (in Chinese))
- [21] GB 50433-2008, 开发建设项目水土保持技术规范[S]. (GB50433-2008, Technical code on soil and water conservation of development and construction projects[S]. (in Chinese))
- [22] GB 50014-2006 (2014 年版), 室外排水设计规范[S]. (GB50014-2006 (version of year 2014), Code for design of outdoor wastewater engineering[S]. (in Chinese))
- [23] GB 50201-2014, 防洪标准[S]. (GB50201-2014, Standard for flood control[S]. (in Chinese))
- [24] SL 723-2016, 治涝标准[S]. (SL723-2016, Standard for waterlogging control[S]. (in Chinese))
- [25] SL 575-2012, 水利水电工程水土保持技术规范[S]. (SL575-2012, Technical specification on soil and water conservation for water conservancy and hydropower engineering[S]. (in Chinese))

(上接第 32 页)

- [25] 丁华, 邱卫国. 基于生态足迹的上海市水资源生态承载力评价[J]. 人民长江, 2013, 44(15): 19-21. (DING H, QIU W G. Assessment on ecological carrying capacity of water resources in Shanghai City based on ecological footprint model[J]. Yangtze River, 2013, 44(15): 19-21. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2013.15.005.
- [26] 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. (LI Y, ZHANG X Q. 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. (in Chinese) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.029.