

# 长三角经济区水资源承载力的综合评价

王春娟<sup>1</sup>, 冯利华<sup>1</sup>, 罗伟<sup>2</sup>

(1. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004;

2. 江西省庐山自然保护区管理处, 江西 庐山 332900)

**摘要:** 运用主成分分析法对长三角经济区各分区水资源承载力进行综合评价,取得了较好的评价结果,并对水资源承载力影响因素进行分析,依此提出应对措施,可为长三角经济区的可持续发展提供佐证。

**关键词:** 水资源承载力; 主成分分析; 长三角经济区

中图分类号: TV213.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)04-0038-05

## Comprehensive evaluation of carrying capacity of water resources in Yangtze river delta

WANG Chunjuan<sup>1</sup>, FENG Lihua<sup>1</sup>, LUO Wei<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Nature Reserve Management Office of Lushan, Lushan 332900, China)

**Abstract:** The water resources carrying capacity in each district of the Yangtze River Delta has been comprehensively evaluated by using the principal components method, and obtained good assessment results. The paper then analyzed the influential factors for water resources carrying capacity and proposed some related counter measures in order to provide a reference for sustainable development of Yangtze River Delta.

**Key words:** carrying capacity of water resources; principal component analysis; Yangtze River Delta

水资源承载力是20世纪80年代提出的,一直以来受到高度重视,并在当前水资源科研领域成为重点和热点<sup>[1-3]</sup>。区域水资源承载力研究的方法很多,常见的有背景分析法、多目标模型分析法、模糊综合评判法等,以上方法各有优缺。背景分析法<sup>[4]</sup>即在一定历史时段内自然的和社会的背景相似的研究区域的实际情况作对比,推算对比区域可能的承载能力。这种方法只采用一个或几个承载因子分析,因子之间相互独立,简单易行,但分析多局限于静态的历时背景,割裂了资源、社会、环境之间的相互作用关系,对水资源承载力这一复杂的自然-社会经济系统而言,就显得过于单薄;多目标模型分析法<sup>[5]</sup>是通过选取能够反映水资源承载力的人口、社会、经济发展以及资源环境等若干指标,依据可持续发展目标,追求整体最优的分析方法。该方法综合考虑了区域自然资源及其相互作用关系,比较适合处理社会-经济-生态-水资源系统复杂的多属性多目标群决策问题<sup>[6]</sup>。但是多目标决策中各影响因子权重的确定多是通过主管判断的方法,客观性

相对较差;模糊综合评判法<sup>[7]</sup>是一种对主观产生的“离散”过程进行综合的处理,其方法自身存在明显的缺陷<sup>[8]</sup>,取小取大的运算法则,是使得大量有用的信息遗失,模型的信息利用率低,当评价因素越多,遗失的有用信息就越多,信息利用率则越低,误判的可能性也就越大。而主成分分析法主要是通过线性变换,把多个指标转化为少量具有代表性的综合指标,并且客观地确定权重,避免了主观随意性,保留大部分原始数值,以此来准确地反映结果,更具科学性。

鉴此,以长三角经济区为例,采用主成分分析法对区域水资源承载力进行具体分析及综合评价,从而保障长三角经济区的可持续发展。

## 1 研究区概况

长江三角洲经济区地处我国东部沿海,介于北纬27°12'~35°20',东经116°18'~123°之间。行政区域包括上海(直辖市)、江苏(宁、苏、锡、常、镇、通、扬、泰)、浙江(杭、嘉、湖、甬、绍、台、舟)两省一市,

收稿日期:2012-04-08; 修回日期:2012-05-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41171430; 40771044)

作者简介:王春娟(1984-),女,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为水文学与水资源、资源地理。

通讯作者:冯利华(1955-),男,浙江建德人,教授,主要从事水文学与水资源的教学与研究工作。

共16个城市(图1)。区内属于亚热带季风气候区,四季干湿冷暖分明,地形复杂,雨量充沛,光照充足,河湖交错,水系众多。其中土地面积(109 600 km<sup>2</sup>)占全国总面积的1.1%,总人口约为(8536.6万人)占全国总人口的6.3%,截至2007年实现区内生产总值GDP(46672.07亿元)占全国经济总量的18.9%<sup>[9]</sup>。随着经济社会的飞速发展,人口的激增,城市化的高速前进,区内的用水规模不断扩大,水资源所承载的压力必然加大。因此研究长三角经济区的水资源承载力,对于协调区域建设、社会经济发展、生态环境的关系,实现区域可持续发展,具有重要的现实意义。因此,本文应用主成分分析法对长三角经济区的水资源承载力进行综合评判。

## 2 水资源承载力综合评价——主成分分析法

### 2.1 主成分分析法原理

主成分分析是把原来多个指标化为少数几个综合指标的一种统计分析方法,从数学角度来看,这是一种降维处理技术<sup>[7]</sup>。设原始变量为 $X_1, X_2, \dots, X_p$ ,主成分分析后得到的新变量(综合变量)为 $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ ,它们是 $X_1, X_2, \dots, X_p$ 的线性组合( $m \leq p$ )。新变量 $Z_1, Z_2, \dots, Z_m$ 构成的坐标系是在原坐标系经平移和正交旋转后得到的,称 $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ 空间为 $m$ 维主超平面。在主超平面上,第一主成分 $Z_1$ 对应于数据变异(贡献率 $e_1$ )最大的方向。对于 $Z_2, \dots, Z_m$ 依次有 $e_2 \geq e_3 \geq e_4 \geq e_m$ 。因此, $Z_1$ 是携带原始数据信息最多的一维变量,而 $m$ 维主超平面是保留原始数据信息量最大的 $m$ 维子空间。

### 2.2 主成分分析法

主成分分析法的主要步骤如下<sup>[10-11]</sup>:

(1) 为了排除数量级和量纲带来的误差,对数据的标准化处理。公式为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{S_j} \quad (1)$$

( $i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J$ )

式中: $X_{ij}$ 为第 $i$ 个样本中第 $j$ 个指标的原始数据; $\bar{X}_j$ 、 $S_j$ 分别为第 $j$ 个指标原始数值的平均值和标准差。

(2) 计算 $(Y_{ij})_{I \times J}$ 相关矩阵 $R$ 。

(3) 计算 $R$ 的 $J$ 个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_j$ ,以及对应的特征向量 $U_1, U_2, \dots, U_j$ ,它们是标准正交, $U_1, U_2, \dots, U_j$ 称为主轴。

(4) 计算贡献率 $e_k = \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j$ 和累计贡献率 $E$

$$= \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j。$$

(5) 求主成分: $Z_k = \sum_{j=1}^J U_{kj} X_{kj}$  ( $k = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, J$ )。式中: $U_{kj}$ 为特征向量 $U_k$ 的第 $j$ 个分量。

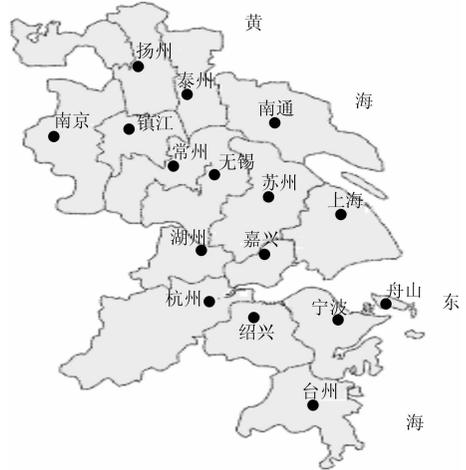


图1 研究区域示意图

(6) 综合分析:一个 $m$ 维主超平面究竟以多大的精度来近似代替原变量系统以确保尽可能夺得数据信息?可以通过求累计贡献率 $E$ 来判断 $E = \sum_{k=1}^m \lambda_k / \sum_{j=1}^J \lambda_j$ ,如取 $E > 80\%$ 时最小 $m$ ,则可得主超平面的维数 $m$ ,从而对 $m$ 个主成分进行综合分析。

## 3 以长三角经济区为例

### 3.1 指标的选取

综合评价指标的选取要求能从不同方面、不同角度客观地反映水资源供、需关系以及开发利用状况。通过对区域水资源系统及各影响因素的综合分析,参照全国水资源供需分析中的指标体系,并在充分考虑不同区域水资源自然赋存量的差异以及开发利用方式不同的基础上,根据科学性原则,参考专家意见从中选取了13个指标,构建出长三角经济区水资源承载力指标体系<sup>[12-14]</sup>。本文基础数据来源于:《江苏省2007年统计年鉴》、《浙江省2007年统计年鉴》、《上海市2007年统计年鉴》、《2007年长江与珠江三角洲及港澳台统计年鉴》及各市《2007年水资源公报》。

### 3.2 主成分的推求

运用分析软件对样本进行分析计算,得出各评价指标的标准化矩阵(表1),主成分特征值、贡献率(表2),主成分载荷矩阵(表3),取累计贡献率大于80%的最小特征值的个数,并得出相应的特征向量 $U$ 。

表1 水资源各评价因子的标准化矩阵

地区	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
上海市	3.01631	3.07899	1.79617	1.51684	1.06137	0.18511	3.24918
南京市	0.31221	0.52655	0.05746	0.24240	1.27808	-0.56211	1.37769
苏州市	0.33798	1.01761	0.54876	0.60592	1.29384	-0.89241	-0.03857
无锡市	-0.23959	0.33560	0.59539	0.46637	1.08895	-0.29679	0.00695
常州市	-0.61008	-0.12777	0.17237	-0.23098	0.55704	-0.31304	0.30032
镇江市	-0.56961	-0.73460	-0.24399	-1.12301	0.39943	-0.84637	-0.26618
南通市	0.84103	-0.06678	2.26749	-1.24791	-0.56590	-0.78953	-0.53426
扬州市	-0.24843	-0.60661	0.18070	-1.78528	-0.43982	-0.79494	-0.56461
泰州市	-0.10352	-0.62031	0.60206	-1.82268	-0.64076	-1.11982	-0.65060
杭州市	0.50810	0.34536	-1.15165	0.77130	-0.45952	1.10561	-0.39263
宁波市	0.12543	0.26003	-0.86852	1.01917	-1.00326	1.59293	-0.37746
嘉兴市	-0.68311	-0.42720	-0.39388	0.16954	-0.95203	-1.11982	-0.13973
湖州市	-0.96361	-0.86239	-1.08836	-0.00971	-1.14116	0.10931	-0.56461
绍兴市	-0.33012	-0.48296	-0.94680	0.88000	-1.12934	1.33303	-0.45333
舟山市	-1.53557	-1.03846	-0.70864	0.06469	-0.91263	0.59122	-0.30159
台州市	0.14258	-0.59706	-0.81856	0.48333	1.56571	1.81493	-0.65060
地区	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$	
上海市	-1.02501	2.99435	2.81523	0.90860	1.06820	-0.25930	
南京市	-0.77899	1.74674	-0.05341	0.58574	0.65838	0.94078	
苏州市	-0.55519	-0.06474	1.70917	1.80440	2.11782	-1.02507	
无锡市	-0.62459	-0.36080	0.49547	0.80537	0.94843	1.07793	
常州市	-0.67940	-0.34318	-0.32061	0.20637	0.31162	0.82649	
镇江市	-0.32515	-0.46301	-0.68793	-0.79104	-0.83594	0.07215	
南通市	-0.90900	-0.49473	-0.35970	-0.52543	-0.50061	0.71219	
扬州市	-0.35299	-0.63217	-0.61023	-0.82317	-0.83498	0.65505	
泰州市	-0.66340	-0.70266	-0.66671	-0.53091	-0.53107	0.94078	
杭州市	1.49131	0.29825	0.39299	2.15617	1.50873	0.59790	
宁波市	1.34272	0.14318	0.29505	-0.43401	-0.49523	-0.73934	
嘉兴市	-0.52533	-0.36080	-0.48009	-0.52242	-0.50543	-0.91078	
湖州市	1.00845	-0.63570	-0.75484	-0.76659	-0.79036	0.57504	
绍兴市	1.09993	0.06564	-0.21349	0.07460	0.15098	0.31217	
舟山市	-0.48379	-0.69914	-0.97674	-1.15485	-1.21515	-0.75655	
台州市	1.98044	-0.49120	-0.58415	-0.99283	-1.05583	-2.01943	

注:表中选取的指标分别为:总人口 $X_1$ (万人);固定资产 $X_2$ (亿元);人口密度 $X_3$ (万人/ $\text{km}^2$ );居民消费水平 $X_4$ (元/人);城市化率 $X_5$ (非农人口/总人口, %);降水量 $X_6$ (mm);水资源利用率 $X_7$ (供水总量/水资源总量, %);人均水资源量 $X_8$ (水资源总量/总人口,  $\text{m}^3/\text{人}$ );日供水能力 $X_9$ ( $\text{万 m}^3/\text{d}$ );工业总产值 $X_{10}$ (亿元);工业废水排放量 $X_{11}$ ( $\text{万 t}$ );工业废水排放达标量 $X_{12}$ ( $\text{万 t}$ );生活污水处理率 $X_{13}$ (%)。

表2 主成分的特征值和贡献率 %

主成分	特征值	贡献率	累计贡献率
1	4.29	48.41	48.41
2	2.97	22.87	71.28
3	1.34	10.27	81.55

由于前3个特征值的累计贡献率已经超过80%,因此计算主成分载荷(主成分与变量间的相关系数)(表3),并求出相应的3个特征向量(表4)。

通过计算,各指标与前三个主成分的线性关系可表示为:

表3 主成分载荷矩阵

变量	第一主成分	第二主成分	第三主成分
总人口	0.856	-0.009	-0.222
固定值产值	0.981	0.041	-0.102
人口密度	0.533	-0.700	-0.227
居民消费水平	0.545	0.757	-0.007
城市化率	0.588	-0.046	-0.069
降水量	-0.055	0.913	-0.120
水资源利用率	0.860	-0.075	-0.332
人均水资源量	-0.331	0.848	0.130
日供水能力	0.869	0.125	-0.228
工业总产值	0.942	0.128	0.001
工业废水排放量	0.737	0.157	0.628
工业废水排放达标量	0.790	0.081	0.571
生活污水处理率	0.109	-0.535	0.553

注:表3中各变量单位与表1相同。

表 4 相关矩阵的特征向量

特征向量	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$	$X_{11}$	$X_{12}$	$X_{13}$
$U_1$	0.34	0.39	0.21	0.22	0.23	-0.02	0.34	-0.13	0.35	0.38	0.29	0.32	0.04
$U_2$	0.19	0.09	0.20	0.01	0.06	0.10	0.29	-0.11	0.20	0.01	-0.54	-0.49	-0.48
$U_3$	-0.01	0.02	-0.41	0.44	-0.03	0.53	-0.04	0.49	0.07	0.07	0.09	0.05	-0.31

$$Z_1 = 0.34X_1 + 0.39X_2 + 0.21X_3 + 0.22X_4 + 0.23X_5 - 0.02X_6 + 0.34X_7 - 0.13X_8 + 0.35X_9 + 0.38X_{10} + 0.29X_{11} + 0.32X_{12} + 0.04X_{13}$$

$$Z_2 = 0.19X_1 + 0.09X_2 + 0.20X_3 + 0.01X_4 + 0.06X_5 + 0.10X_6 + 0.29X_7 - 0.11X_8 + 0.20X_9 + 0.01X_{10} - 0.54X_{11} - 0.49X_{12} - 0.48X_{13}$$

$$Z_3 = -0.01X_1 + 0.02X_2 - 0.41X_3 + 0.44X_4 - 0.03X_5 + 0.53X_6 - 0.04X_7 + 0.49X_8 + 0.07X_9 + 0.07X_{10} + 0.09X_{11} + 0.05X_{12} - 0.31X_{13}$$

由主成分  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  与客观权重  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$  之积,可得各分区水资源承载力的综合评价结果  $Z$ (表 5)。

表 5 各分区水资源承载力的综合评判结果

序号	地区	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z$	排序
1	上海市	7.36	2.10	0.06	3.72	1
2	南京市	2.34	-0.13	-0.79	0.99	3
3	苏州市	3.01	-1.29	-0.01	1.42	2
4	无锡市	1.31	-1.33	-0.75	0.39	5
5	常州市	0.01	-0.68	-1.00	-0.25	9
6	镇江市	-1.68	0.40	-1.27	-0.99	12
7	南通市	-0.30	0.54	-2.74	-0.77	11
8	扬州市	-1.89	0.12	-1.90	-1.33	15
9	泰州市	-1.63	-0.28	-2.48	-1.41	16
10	杭州市	1.19	-2.51	2.37	0.82	4
11	宁波市	-0.57	0.61	2.63	0.30	6
12	嘉兴市	-1.32	0.51	-0.46	-0.75	10
13	湖州市	-2.53	-0.41	0.66	-1.18	14
14	绍兴市	-0.91	-0.74	2.03	-0.15	8
15	舟山市	-2.83	1.42	0.69	-1.11	13
16	台州市	-1.56	1.67	2.95	0.29	7

### 3.3 水资源承载力分类

根据表 5 的综合主成分,参考了有关等级分类方法<sup>[15-16]</sup>,得到了各分区水资源承载力影响程度的综合主成分的分级标准,并将其分为 3 个等级(水资源承载力大、中、小 3 种情况)(表 6),用此标准可对各分区水资源承载力状况进行评判。

### 3.4 综合评价

由表 6 可知,长三角经济区水资源承载力已具有一定规模,可供开发、利用的水资源已有一定限值。由于区域内各城市水资源分布不均和经济发展速度

不同,水资源承载力较小,开发利用程度较大的为杭州市、南京市、苏州市和上海市 4 个城市,其中上海市居首,区域内基本已无水资源承载能力优势;而水资源承载力较大,开发利用程度较小的为泰州市、扬州市、湖州市、舟山市、镇江市、南通市和嘉兴市 7 个城市,泰州市承载力最小,应加大对这 7 个城市水资源开发力度,充分发挥水资源承载潜力优势,促进此区域经济社会持续发展;而水资源承载力已具有一定规模的为常州市、绍兴市、台州市、宁波市和无锡市 5 个城市。这一结果与实际情况较为符合,因此评价结果较为准确。

表 6 综合主成分的分级标准

序号	综合主成分	承载力等级	地区(按水资源承载力由大到小排列)
1	$\leq -0.75$	大	泰州市、扬州市、湖州市、舟山市、镇江市、南通市、嘉兴市
2	$-0.75 \sim -0.40$	中	常州市、绍兴市、台州市、宁波市、无锡市
3	$>0.40$	小	杭州市、南京市、苏州市、上海市

注:1. 其中水资源有较大承载力,开发利用程度和发展规模都较小,整个国民经济发展都处于用水低效型,因而区域国民经济发展对水资源的需求是有一定保障的;2. 而介于这两者之间的水资源,其开发已具有相当规模,仍具有一定的开发潜力,对国民经济发展有一定保证;3. 水资源承载力小,说明水资源承载力已处于饱和状态,水资源开发利用程度已经接近极限,整个国民经济发展已处于用水高效型,进一步开发水资源的潜力已很小,很难保障整个国民经济发展。

## 4 讨论与结论

表 3 表明:第一主成分与  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_7$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$ 、 $X_{12}$  有较大的正相关,而与  $X_6$ 、 $X_8$  有较大的负相关;第二主成分与  $X_6$ 、 $X_8$  有较大的正相关,与  $X_3$ 、 $X_{13}$  有较大的负相关;第三主成分与  $X_{11}$ 、 $X_{12}$  有较大的正相关,与  $X_3$ 、 $X_7$ 、 $X_9$  有较大的负相关,由此可综合概括为区域内人口大幅度增长和经济高速发展所引起的水资源短缺、水资源开发利用不当和水污染严重等因素。这一结果与任美镔等<sup>[17]</sup>和王颖等<sup>[9]</sup>的分析较为一致,因此运用主成分分析法得到的这三个主成分可全面的、客观地反映长三角经济区水资源

承载力变化状况。

长三角经济区河网密布,水资源丰富,但人均水资源量较少,尤其是上海和江苏省水资源紧缺,加上开发成本和水质问题等,可利用的水资源量远远不及人口增长、经济发展的速度;长江沿岸各城市随着经济的高速发展,向长江排放大量的工业、生活污水,随之产生的水污染,其治理能力滞后于经济发展速度,致使水体污染日趋严重。并且据余之祥<sup>[18]</sup>预测,到2020年长三角经济区用水需求将比2004年(多年平均水资源量537.8亿 $m^3$ ,人均425 $m^3$ ,仅为全国平均水平的1/5)增加40%,这对区域内水资源的承载能力提出了巨大的挑战。

做为中国经济最发达、人口密度最大、在世界经济格局中有着举足轻重地位的长三角经济区,承载着中国大部分经济发展命脉,对于所出现的种种水资源问题,应采取相应措施予以治理,使其持续稳定发展。

(1)调整区域内产业结构及产业布局,对于经济增长方式、消费方式进行合理的转变,控制人口增长,提高用水效率和废水、污水处理率。

(2)加强区域内水利工程建设管理来调控水资源的时空分布不均衡,加大对海水淡化、水循环利用工程的投入,开源节流,提高区域内水资源相对承载力。

(3)利用网络、新闻媒体对公民进行宣传教育,提高用水效率,形成良好的用水习惯,加强对节水型社会的建设,实现经济增长和水资源协调发展。

(4)大力发展科学技术,开展深入研究,以《2011-2015年长三角经济区产业投资环境分析及前景预测报告》为宗旨,优化、发展区域水资源,加强对长三角经济区的可持续发展。

#### 参考文献:

[1] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展,2001(3):227-232.  
[2] Daily G C, Ehrlich P R. Socioeconomic equity, sustainability and earths carry capacity[J]. Ecological Application,

1996,6(4):991-1001.

- [3] 李令跃,甘泓.试论水资源合理配置和承载能力概念与可持续发展之间的关系[J].水科学进展,2001,12(3):307-313.  
[4] 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.  
[5] 朱一中,夏军,王纲胜.西北地区水资源承载力宏观多目标情景分析与评价[J].中山大学学报(自然科学版),2004,43(3):103-106.  
[6] 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):316-367.  
[7] 傅湘,纪昌明.区域水资源承载力综合评价:主成分分析法的应用[J].长江流域资源与环境,1999,8(2):168-172.  
[8] 林衍,顾恒岳,盛湘渝.模糊综合评判误判原因的探讨[J].系统工程理论方法应用,1997,6(2):67-70.  
[9] 王颖,王腊春,朱大奎.长江三角洲水资源现状与环境问题[J].科技通报,2010,26(2):171-179,188.  
[10] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].(第二版).北京:化学工业出版社,2001.30-35.  
[11] 冯利华,赵浩兴,瞿有甜.灾害等级的综合评价[J].灾害学,2002,17(4):16-20.  
[12] 陈腊娇,冯利华,毛小军.主成分分析法在水资源承载力影响因子评价中的应用[J].水利科技与经济,2006,6(12):362-364.  
[13] 李坤峰,谢世友,张润甲.重庆市水资源承载力影响因子评价[J].人民长江,2009,40(7):4-6.  
[14] 惠洪河,蒋晓辉,黄强,等.水资源承载力指标体系研究[J].水土保持通报,2001,21(1):30-34.  
[15] 许有鹏.干旱区水资源承载能力综合评价研究[J].自然资源学报,1993,8(3):229-237.  
[16] 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,1997,28(8):73-79.  
[17] 任美镠.长江三角洲可持续发展的若干问题[J].世界科技研究与发展,1996,18(3-4):97-101.  
[18] 余之祥.长江三角洲水土资源与区域发展[M].合肥:中国科技大学出版社,1997.