

# 基于水足迹理论的河南省水资源利用评价

祝稳, 赵锐锋, 谢作轮

(西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

**摘要:** 水足迹可从人类产品消费量和消费模式角度衡量区域水资源利用效率。近年来河南省水资源匮乏状况日渐加剧, 为使决策者对河南省水资源利用状况有一个清晰的认识, 基于水足迹理论, 运用 M-K 突变检验和系统聚类法对河南省水足迹结构、效益和生态安全三方面在时间及空间维度进行综合评价。结果表明: 河南省水足迹呈增加趋势, 在 2006 年发生突变, 2009 年达到 1 382 亿  $\text{m}^3$ , 内部水足迹起决定作用; 水足迹增长超出了省内水资源负荷, 2003 年以后水资源超采现象更加突出; 河南省水资源消耗量增大的同时水资源利用效率也有所提高。全省各地市水资源利用的空间差异明显, 驻马店和周口水资源利用效率很低, 水资源消耗总量最大; 郑州、三门峡和洛阳的水资源利用效率较高; 驻马店、商丘的水资源依赖度最小; 漯河、许昌水资源匮乏指数最大的同时水资源依赖度却较低, 水资源超采严重。为了改变水资源利用效率低、超采严重的现状, 河南省各地需要加强水资源的合理配置和高效利用。

**关键词:** 水足迹; 水资源评价; M-K 突变检验; 系统聚类法; 河南省

**中图分类号:** TV213.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)01-0292-07

## Evaluation of Water Resource Utilization in He'nan Province Based on Water Footprint Theory

ZHU Wen, ZHAO Ruifeng, XIE Zuolun

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The water footprint can measure the efficiency of regional water resources from the point of view in amount and patterns of human product consumption. In recent years, water resources shortage in He'nan Province has been intensified. Based on the theory of water footprint, water footprint calculation results in structure, benefit and ecological safety were evaluated by M-K verification and hierarchical clustering method from temporal and spatial sequence so that policy makers have a clear understanding of water resources utilization in He'nan. The results showed that: water footprint in He'nan Province showed an increasing trend, water footprint in 2009 was  $1.382 \times 10^{11} \text{ m}^3$ , additionally, the abrupt change points of which occurred in 2006; the internal water footprint played a decisive role in water footprint growth; water footprint growth had been beyond the water resources load so that water resources were over exploited seriously from 2003; consumption of total water resources was increasing, at the same time, efficiency of water resources was also improved. The water footprint index spatial clustering in 2009 results showed that: efficiency of water resources in Zhumadian and Zhoukou was very low so that its water resources consumption was the largest; efficiency of water resources in Zhengzhou, Sanmenxia and Luoyang was larger; local water resources in Zhumadian and Shangqiu are highly depended; water resources in Luohe and Xuchang were over exploited seriously. In order to change the present situation of water resources in He'nan Province, rational allocation and efficiency of water resources need to be strengthened.

**Keywords:** water footprints; water resource evaluation; M-K verification; hierarchical clustering method; He'nan Province

收稿日期: 2014-04-19

修回日期: 2014-06-07

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(41261047, 41201196); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划骨干项目(NWNU-LKQN-11-11)

第一作者: 祝稳(1988—), 女, 河南虞城人, 硕士研究生, 主要从事资源环境变化方面的研究。E-mail: zw\_19881014@126.com

通信作者: 赵锐锋(1976—), 男, 甘肃漳县人, 副教授, 主要从事土地利用及资源环境变化等方面的研究。E-mail: zhaoruifeng@126.com

随着经济和社会发展,水资源日益紧缺,水资源安全及其引发的粮食安全问题开始备受关注。河南省是我国的粮食主产区之一,1978—2009年,其粮食总产量从 2 097.4 万 t 增加到 5 389.0 万 t,年均增长 3.18%,占全国粮食产量的 10%<sup>[1]</sup>,同时河南也是我国严重缺水的地区之一,人均水资源量约为 352 m<sup>3</sup>,仅为全国人均水资源占有量的 16%<sup>[1]</sup>,因此如何有效配置和利用水资源已成为河南省可持续发展十分迫切的问题。水资源问题大多数都是人类通过消费水资源及其提供的产品和服务对水资源系统产生影响,而水足迹从消费角度衡量人类对水资源的需求和占有状况,建立水资源利用与人类消费模式的联系,为测定人类活动对水资源系统影响和解决水资源安全以及由其引起的粮食安全问题提供了新思路<sup>[2-3]</sup>。

1993年,在 SOAS 的一次讨论会上 Allan<sup>[4]</sup>首次提出了虚拟水概念,在虚拟水研究基础上,Hoekstra 等<sup>[5]</sup>于 2002 年提出了水足迹的概念。我国学者龙爱华等<sup>[6]</sup>首次引进水足迹概念,估算了我国西北 4 省区的水足迹。二十年来,国内外虚拟水研究主要集中在地区水资源利用状况评价<sup>[7-10]</sup>,国家或地区尺度的水足迹计算<sup>[11-12]</sup>、水足迹的驱动力、基于水足迹的流域生态补偿<sup>[13-14]</sup>、水足迹的变化与人均国内生产总值、消费模式的关系<sup>[15]</sup>、水污染足迹问题<sup>[16]</sup>等方面。纵观我国虚拟水研究,主要在两个方面存在不足,一是研究尺度上,国家尺度研究成果多,区域尺度成果少,且局限于经济比较发达和水资源稀缺省份;二是研究内容上,主要限于部分农产品的虚拟水量化及低层次战略运用方面,研究深度不够,迫切需要拓宽研究领域和深化研究内容。这两方面不足在河南省均有体现,目前关于河南省水足迹的研究成果相对较少,且主要限于部分农产品的虚拟水量化研究,致使相关决策者从水足迹角度对河南省水资源利用状况认识不够。因此本文针对河南省严重缺水的客观事实,对河南省各行政区水足迹的时空分布特征进行评价,有利于虚拟水战略背景下河南省水资源的合理配置、产业结构的优化调整、经济发展方向的正确定位等。

## 1 试验材料与方法

基于虚拟水和水足迹基本理论及计算方法,首先在单位虚拟水含量计算基础上对河南省主要农畜产品生产用水量进行计算与分析;接下来计算与分析河南省总体与农畜产品虚拟水贸易量;在此基础上计算 2000—2009 年河南省水足迹及其相关指数,借此对

河南省水资源利用时空差异进行分析与评价。

### 1.1 水足迹及其相关指数计算方法

1.1.1 水足迹计算方法 根据水足迹的定义,一个区域的水足迹等于该区域内用水量和虚拟水净进口量(虚拟水进口量扣除虚拟水出口量)之和,即水足迹由内部水足迹与外部水足迹两部分组成。

$$WFP = IWFP + EWFP \quad (1)$$

$$IWFP = AWU + IWW + DWW + EWW - VWE_{dom} \quad (2)$$

$$EWFP = VWI - VWE_{reexport} \quad (3)$$

式中:WFP——一个国家或地区的水足迹;IWFP——内部水足迹,定义为生产该国家或地区本地居民所消费的所有产品和服务的水资源需求总量,即该国家或地区的农业生产需水量 AWU(不包括农业灌溉中损失的水量)、该国家或地区的工业生产需水量 IWW、本地居民生活用水量 DWW 和本地生态环境用水量 EWW 之和减去本地出口虚拟水量  $VWE_{dom}$ ;EWFP——外部水足迹,定义为本地消费的进口虚拟水总量,即该国家或地区从其它国家或地区进口的虚拟水总量 VWI 减去向其他国家或区域输出的进口产品再出口的虚拟水总量  $VWE_{reexport}$ <sup>[7]</sup>。根据数据获得的难易程度,单位产品的虚拟水含量是水足迹计算的核心。

1.1.2 水足迹相关指标的计算 参考戚瑞等<sup>[8]</sup>的研究成果,本文选择水资源进口依赖度、水资源自给率、万吨水足迹人口密度、水足迹经济效益、水足迹土地密度、水足迹净贸易量、水资源贡献率、水资源匮乏指数、水资源压力指数 9 个指标,表征河南省水足迹结构、效益、生态安全状况。

### 1.2 数据来源

农畜产品生产用水量等于单位产品虚拟水含量乘以产品总产量。限于实际情况,本文单位农畜产品虚拟水含量采用 2004 年 Chapagain 和 Hoekstra 等<sup>[17]</sup>有关中国部分研究成果及雷玉桃等<sup>[18]</sup>对河南省虚拟水研究成果。农畜产品产量数据来源于河南省统计年鉴(2001—2010)<sup>[19]</sup>。

限于实际统计数据缺乏,本文采用间接方法估算河南省总体和农畜产品虚拟水贸易量,不区分工业产品和农业产品<sup>[7]</sup>,即虚拟水贸易量为进出口贸易值与生产总值的比值乘以总生产耗水量。进出口贸易额和生产总值的数据均来源于河南省统计年鉴(2001—2010)<sup>[19]</sup>。用水数据来自 2001—2010 年的河南省水资源公报<sup>[20]</sup>。农畜产品虚拟水进出口量采用以下方

法进行估算:首先根据城乡居民年均消费食物量,计算消费的虚拟水量,再根据具体年份生产的农产品计算生产的虚拟水量,二者之差就是虚拟水贸易量<sup>[2]</sup>。该部分数据来源于《河南省统计年鉴(2009)》。

1.3 研究方法

运用 M-K 突变检验法对水足迹及其相关指数 2000—2009 年的序列数据进行分析,以找到这些序列数据的变化趋势及具体突变年份。借助 SPSS 软件,对 2009 年河南省 18 个地市具有代表性的 4 个水足迹指数(IWD,WFEB,WFNTV,WS)的 72 个样本点数据进行系统聚类分析,数据处理方法为标准差标准化,采用欧氏距离平方测度样本间距离,最远邻元素法计算类间的距离对样本进行归类。得到聚类结果,进而运用 GIS 软件得到水足迹空间聚类图。

2 结果与分析

2.1 主要农畜产品生产用水量

从图 1 可以看出,2000—2009 年河南省主要农畜产品的生产用水结构发生了明显变化。牛奶、水产品、水果生产用水比例呈增加趋势;粮食、油料、蔬菜、禽肉、禽蛋生产用水比例无显著变化;棉花、猪肉、牛肉、羊肉生产用水比例呈减少趋势。以上突出显示,随着生活水平的提高,饮食结构也发生变化,居民对

营养饮食格外重视,对牛奶、水产品、水果等营养价值高的产品需求明显上升;对粮食、油料、蔬菜、禽肉、禽蛋等生活必需产品的需求无显著变化;对单位产品生产用水量大的猪、牛、羊肉等的需求明显下降。河南省一些地市在某种产品生产方面已经形成特色产业,生产用水有一定的集中性(见表 1)。例如,驻马店、周口、许昌、漯河猪肉生产用水量占其主要农畜产品生产用水量的比例分别为 47.56%,42.17%,53.58%,61.51%,猪肉生产已成为其特色产业和耗水大户。此外,牛肉、油料生产成为南阳的特色产业和耗水大户,水产品生产成为信阳的特色产业。

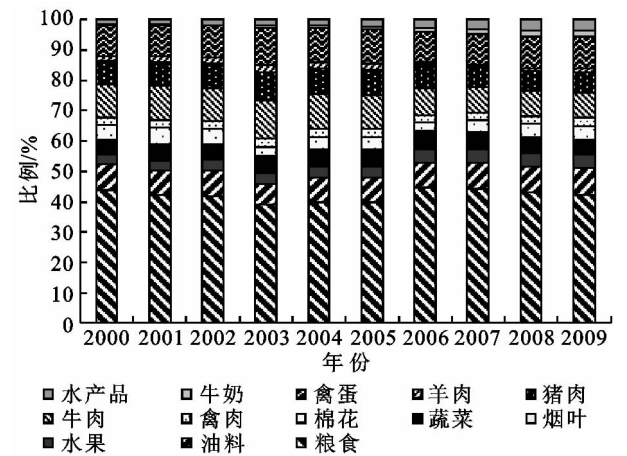


图 1 农畜产品生产用水量 2000—2009 年变化情况

表 1 2009 年河南省主要农畜产品生产用水量 亿 m<sup>3</sup>

地区 产品类型	粮食	油料	水果	烟叶	蔬菜	棉花	禽肉	牛肉	猪肉	羊肉	禽蛋	奶类	水产品
郑州	16.84	3.99	0.28	0.04	2.83	0.29	1.83	2.61	3.27	0.39	7.30	4.68	6.59
开封	25.70	8.80	0.42	—	6.10	4.40	1.88	6.90	5.30	1.17	8.81	2.40	1.95
洛阳	23.84	2.67	0.61	1.14	2.22	0.25	1.33	6.24	3.27	0.37	4.86	4.11	1.93
平顶山	19.85	2.89	0.08	0.53	2.38	0.22	1.67	6.89	4.82	0.64	5.11	1.99	1.75
安阳	33.77	5.26	0.52	—	5.31	1.44	2.30	1.35	2.90	0.37	9.92	0.75	0.31
鹤壁	11.25	1.20	0.04	—	0.54	0.05	2.15	0.42	1.58	0.27	5.07	0.84	0.43
新乡	38.41	6.69	0.14	—	2.61	1.30	2.28	4.70	4.88	0.62	11.9	2.73	1.99
焦作	20.06	1.89	0.29	—	2.23	0.30	1.57	3.36	2.39	0.24	9.90	2.07	0.63
濮阳	25.24	3.32	0.24	—	2.29	0.70	1.82	2.11	2.36	0.58	9.58	0.63	0.56
三门峡	6.37	0.65	1.56	0.71	0.98	0.16	0.58	2.70	1.00	0.14	1.67	0.35	0.42
南阳	58.75	23.4	0.59	1.07	9.28	6.30	3.39	17.3	9.15	1.99	11.1	2.90	4.87
商丘	60.30	7.56	1.66	0.24	8.79	6.97	3.29	12.4	6.48	2.17	9.49	2.44	3.81
信阳	58.10	13.5	0.10	0.05	3.08	0.52	3.47	3.87	6.43	0.53	8.41	0.08	11.9
周口	72.67	7.29	0.38	0.30	8.14	10.5	2.77	11.2	93.0	1.91	8.46	1.01	2.84
驻马店	67.10	18.4	0.12	0.36	3.76	1.41	3.44	14.3	115	1.21	11.4	0.60	4.96
济源	2.19	0.07	0.04	0.05	0.30	—	0.14	0.39	7.33	0.03	0.97	0.28	0.54
许昌	27.67	1.70	0.07	0.83	2.16	0.69	1.57	4.87	56.7	0.64	7.87	0.66	0.42
漯河	16.87	0.75	0.10	0.19	1.98	1.10	1.09	1.56	48.0	0.15	4.21	1.46	0.56

由图 2a 可见,居民购买商品所消耗的水资源远大于日常生活和改善生态环境所消耗的实体水量,河

南各地市农畜产品生产用水量占用水总量的比例为 81.65%~98.46%,因此区域间虚拟水总量是除生

活、农业、工业用水之和之外评价地区水资源消费的重要指标<sup>[16]</sup>。河南各地市主要作物小麦、玉米、棉花生产用水量之和占用水总量的比例为 11.58%~40.24%,18 个地市小麦、玉米、棉花生产用水量之和占用水总量的比例平均值为 26.25%,表明传统作物小麦、玉米、棉花生产占作物种植比例较高(图 2b)。根据单位产品虚拟水含量,将上述作物划分为低度、中度和高度耗水作物<sup>[18]</sup>,由图 2c 可知,开封、南阳、三门峡、商丘、周口等行政区中,高耗水作物种植比例较高,这些地区应该调整种植结构,增加低耗水作物种植比例。

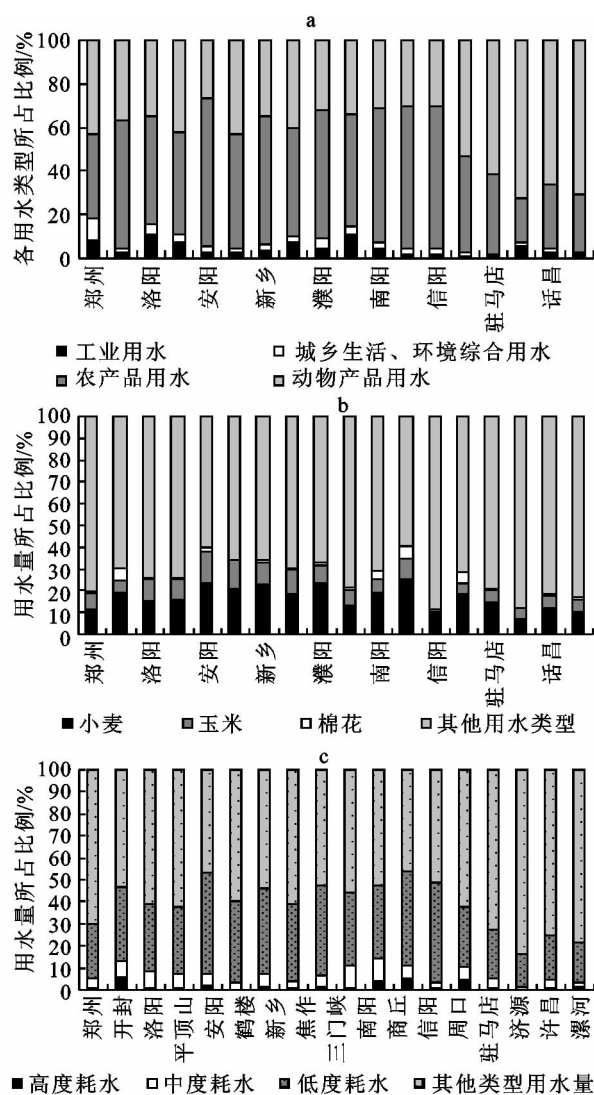


图 2 河南省 2009 年各用水类型占总用水量比例

## 2.2 虚拟水贸易量

2000—2009 年,河南省虚拟水贸易量呈显著增加趋势(见图 3)。由表 2 列出的 2009 年代表地区(年度人均生产总值最高的郑州和年度人均生产总值最低的周口)主要农畜产品虚拟水贸易量计算结果可知,农畜产品虚拟水贸易量多呈负值,虚拟水进口大于出口,作

为农业大省的河南省却是农产品出口小省,这种强烈反差值得反思。两市虚拟水贸易量绝对值占生产用水量的比例在产品种类上差异很大,两市之间同种产品的比例也有差异。虚拟水消费与区域经济发展水平、饮食结构息息相关,对于水密集型产品(如禽肉、猪牛羊、牛奶、水产品)的消费,郑州在牛奶和水产品等营养价值较高的新兴产品的消费上远高于周口;而在禽肉、猪牛羊等传统产品的消费上郑州却远低于周口。由此可知,经济发达的郑州在饮食结构上有别于经济落后的周口,居民更注重营养饮食。

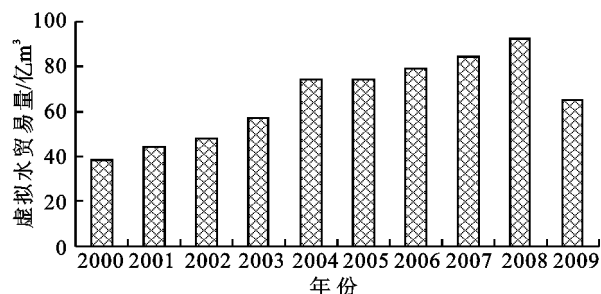


图 3 2000—2009 年河南省虚拟水贸易量变化

## 2.3 水足迹及其相关指数时空差异分析

2.3.1 水足迹及其相关指数时间序列分析 由表 3 可得出 2000—2009 年水足迹指数平均值:水自给率为 97.99%,进口依赖度仅为 2.02%;水资源匮乏指数为 305.00%,水资源压力指数为 309.00%;万吨水足迹人口密度为 8.41 人/万 t,水足迹经济效益为 8.80 元/ $\text{m}^3$ ,水足迹土地密度为 70.08 万  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ;水资源净贸易量输出量为 17.70 亿  $\text{m}^3$ ,贡献率为 4.44%。计算结果表明:河南省对本地水资源依赖度较高,水资源超采现象严重,水足迹内部效益较大,呈现较高的外向型。由表 3 也可得出 2000—2009 年及其水足迹指数变化趋势:WFP 呈增长趋势,人口数量增加、城市化和经济水平的提高为主要驱动因素;水资源匮乏指数和压力指数变化剧烈,表明河南省作为农业大省,经济发展与对外贸易多受气候因素年际变化制约;单位土地消耗的水资源量稳步增长和单位水足迹能支撑的人口数量呈小幅减少的同时,单位水足迹经济价值呈稳步增长趋势,表明水资源消耗总量增加的同时水资源利用效率也在提高;水自给率一直处于高水平,水足迹净贸易输出量和贡献率呈增长趋势,但增长过程不明显且多有起伏,表明河南省水资源外部化变化不明显且不稳定。

由图 4 可知,2000—2009 年河南省水足迹(图 4a)和内部水足迹(图 4b)均呈增加趋势,且均在 2006 年左右发生突变,可见水足迹的变化大部分取决于内

部水足迹的变化。与此相对应的是单位水足迹可支撑人口数的减少(图 4f)和单位土地水足迹消耗量的增加(图 4h)。外部水足迹也呈增加趋势(图 4c),且在 2004 年左右发生突变,突变点早于内部水足迹。与外部水足迹变化相对应的是水资源匮乏指数(图 4k)及压力指数(图 4l)在 2003 年左右开始逐渐增加;水资源自给率(图 4e)在 2003 年左右发生突变,开始逐渐减小,水资源进口依赖度(图 4d)及水资源净贸易量(图 4i)也在 2003 年发生突变,开始急剧增大。

2.3.2 水足迹系统聚类及空间差异分析 从图 5 和

图 6 可以看出,驻马店和周口水足迹最高,都超过 200 亿 m<sup>3</sup>,源于其粮食和肉类生产较发达,同时,其 WFEB 聚类结果属于第 4 类,表明这两地水资源利用效率很低。全省 IWD 都小于 4%,说明河南省的产品虚拟水消费高度依赖本地水资源,对外贸易不发达,安阳 IWD 聚类结果属于第 1 类与其 WFNTV 聚类结果属于第 4 类结论相吻合。

WS 很大,例如,漯河、许昌的 WS 超过了 1 000%,属于聚类结果第 1 类,IWD 却很低,属于聚类结果第 3 类,表明省内存在严重的水资源超采现象。

表 2 河南省 2009 年主要农畜产品虚拟水贸易量

项目	郑州			周口		
	产量/万 t	消费量/万 t	虚拟水贸易量/亿 m <sup>3</sup>	产量/万 t	消费量/万 t	虚拟水贸易量/亿 m <sup>3</sup>
粮食	166.08	182.92	-1.71	716.71	789.38	-7.37
食用油	19.02	23.01	-0.84	34.72	42.01	-1.53
水果	29.00	29.74	-0.02	39.00	39.52	-0.03
烟叶	0.22	0.52	-0.06	1.66	0.52	0.21
蔬菜	274.39	277.22	-0.03	790.60	798.74	-0.08
棉花	0.42	—	—	15.01	—	—
禽肉	5.01	6.84	-0.67	7.58	10.35	-1.012
牛肉	2.08	4.70	-3.28	8.90	20.08	-14.04
猪肉	14.79	18.06	-0.72	42.02	134.94	-20.55
羊肉	0.75	1.14	-0.20	3.67	5.58	-0.99
禽蛋	20.57	27.87	-2.59	23.82	32.28	-3.003
牛奶	40.67	45.35	-0.47	10.05	11.06	-0.10
水产品	13.18	19.77	-3.30	5.68	8.52	-1.42

表 3 河南省 2000—2009 年水足迹及其相关指数计算结果

年份	WFP/ 亿 m <sup>3</sup>	IWFP/ 亿 m <sup>3</sup>	EWFP/ 亿 m <sup>3</sup>	IWD/ %	WSS/ %	WFPMT/ (人/万 t)	WFEB/ (元·m <sup>-3</sup> )(万 m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	WFA/ (元·m <sup>-3</sup> )(万 m <sup>3</sup> ·km <sup>-2</sup> )	WFNTV/ 亿 m <sup>3</sup>	CRW/ %	WS/ %	WPI/ %
2000	1011	998	13.1	1.30	98.7	9.38	4.50	60.54	11.93	1.78	151	153
2001	1045	1028	17.0	1.63	98.4	9.14	5.29	62.59	10.08	4.61	478	483
2002	1080	1064	16.3	1.51	98.5	8.90	5.59	64.67	15.54	4.96	344	349
2003	989	968	21.0	2.12	97.9	9.77	6.94	59.23	15.07	2.16	142	144
2004	1140	1112	27.4	2.40	97.6	8.53	7.51	68.24	19.51	4.80	280	285
2005	1229	1204	25.3	2.05	98.0	7.95	8.61	73.62	23.64	4.23	220	224
2006	1221	1196	25.5	2.08	97.9	8.04	10.12	73.13	27.99	8.70	380	388
2007	1267	1237	29.1	2.30	97.7	7.79	11.85	75.84	26.23	5.64	272	278
2008	1340	1304	35.7	2.67	97.3	7.40	13.45	80.21	20.93	5.64	361	366
2009	1382	1352	29.6	2.15	97.9	7.21	14.10	82.72	6.10	1.86	420	422

内部效益方面,郑州、三门峡和洛阳的 WFEB 为聚类结果第 1 类和第 2 类,单位水足迹产值较大,而这 3 地的经济发展水平在河南省也名列前茅,表明 WFEB 与区域经济发展水平一定程度上呈正相关;郑州的 WFEB 是驻马店的 14.6 倍,表明省内水资源的利用效率地区差别很大;河南省 18 个地市中 有 10 个 WFEB 聚类结果属于第 4 类,表明河南省大部分

地区水资源利用效率处于低水平。

外部效益方面,WFNTV 若为正,则地区在虚拟水贸易中为水资源输出地;反之,为输入地。河南省 18 个地市,有 6 个是水资源输入地,水资源输入量济源最大,表明济源经济发展有很强的外部依赖性;其余是输出地,许昌水资源输出量最大,WFEB 聚类结果属于第 4 类,这一定程度上造成其 WS 聚类结果为第 1 类。

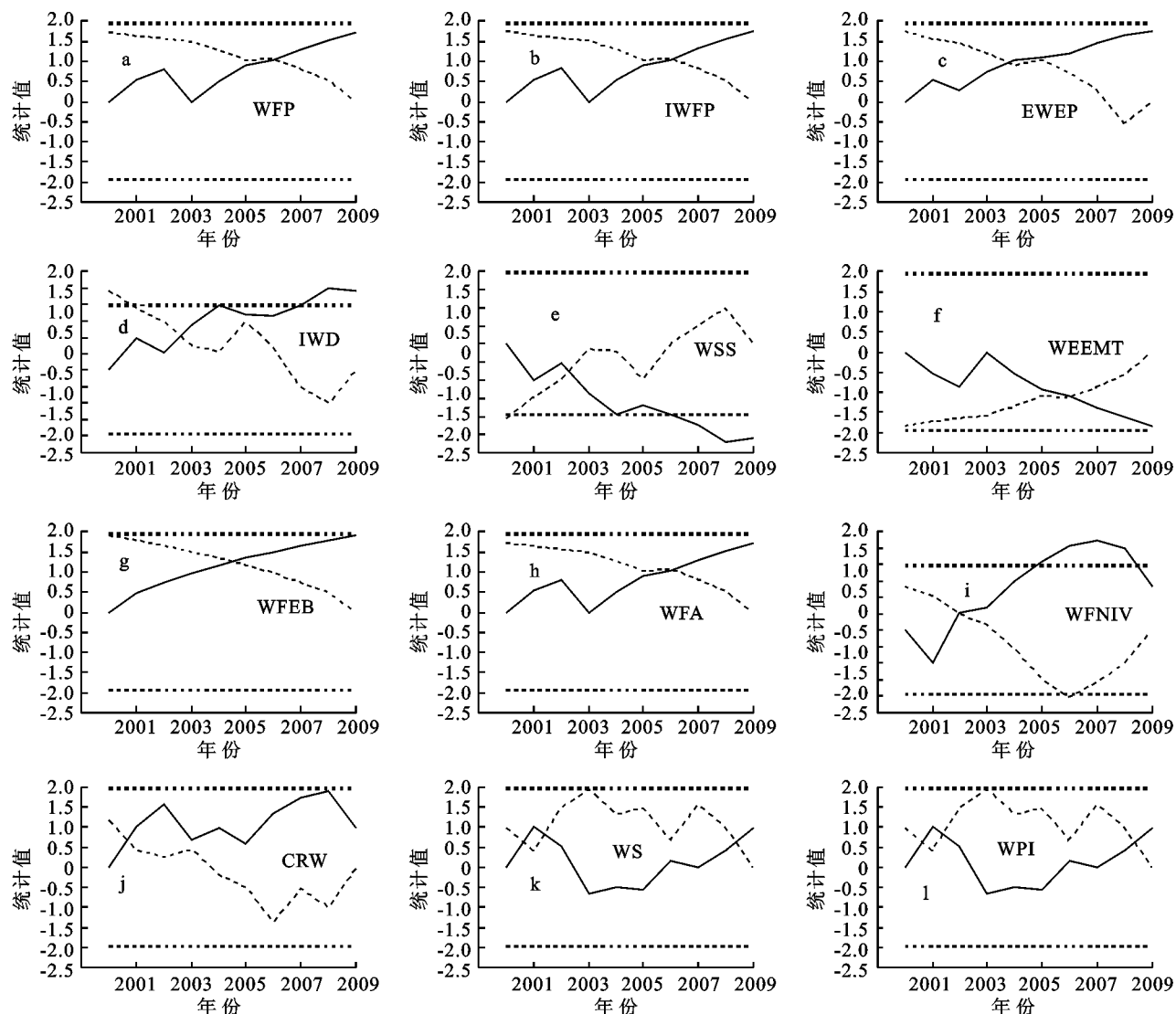


图 4 2000—2009 年河南省虚拟水贸易量突变检验

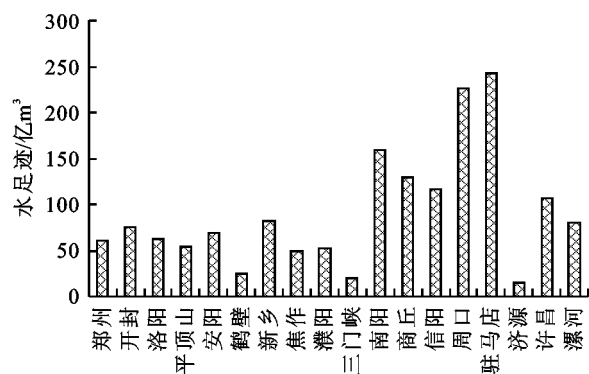


图 5 河南省 2009 年水足迹

### 3 结论

水足迹从人类产品消费量和消费模式角度衡量区域水资源利用效率,本文选取水足迹结构、效益和生态安全三方面指标,采用定性定量相结合的方式对河南省水资源利用做了系统评价。通过对河南省水足迹及其相关指数进行计算与分析,得到以下结论:

(1) 2000—2009 年,河南省水足迹、内部水足迹及外部水足迹均呈增加趋势,其中水足迹及内部水足迹在 2006 年左右开始突变,外部水足迹在 2004 年左右开始突变。河南省水资源消耗总量增加了 35.64%,单位土地水资源消耗量增加了 36.64%,万吨水足迹能支撑的人口数量减少了 23.13%,水资源利用效率提高了 213.33%,反映出河南省水资源消耗总量、单位土地水资源消耗量增加和单位水足迹支撑的人口数量减少的同时,水资源的利用效率也在逐步提高。水资源自给率平均值为 97.99%,水资源匮乏指数 305.00%,表明水足迹土地密度和水足迹的增长超出了省内的水资源负荷,超采水资源现象突出。

(2) 河南省各地市水资源利用的空间差异明显,其中,驻马店和周口水资源消耗总量最大,水资源利用效率却很低;驻马店、商丘的水资源依赖度最小,产品虚拟水消费高度依赖本地水资源;郑州、三门峡和

洛阳的水足迹经济效益最大,水资源利用效率较高;许昌水足迹净贸易输出量最大,水足迹外部化较高;

漯河、许昌水资源匮乏指数最大同时水资源依赖度却较低,水资源超采严重。

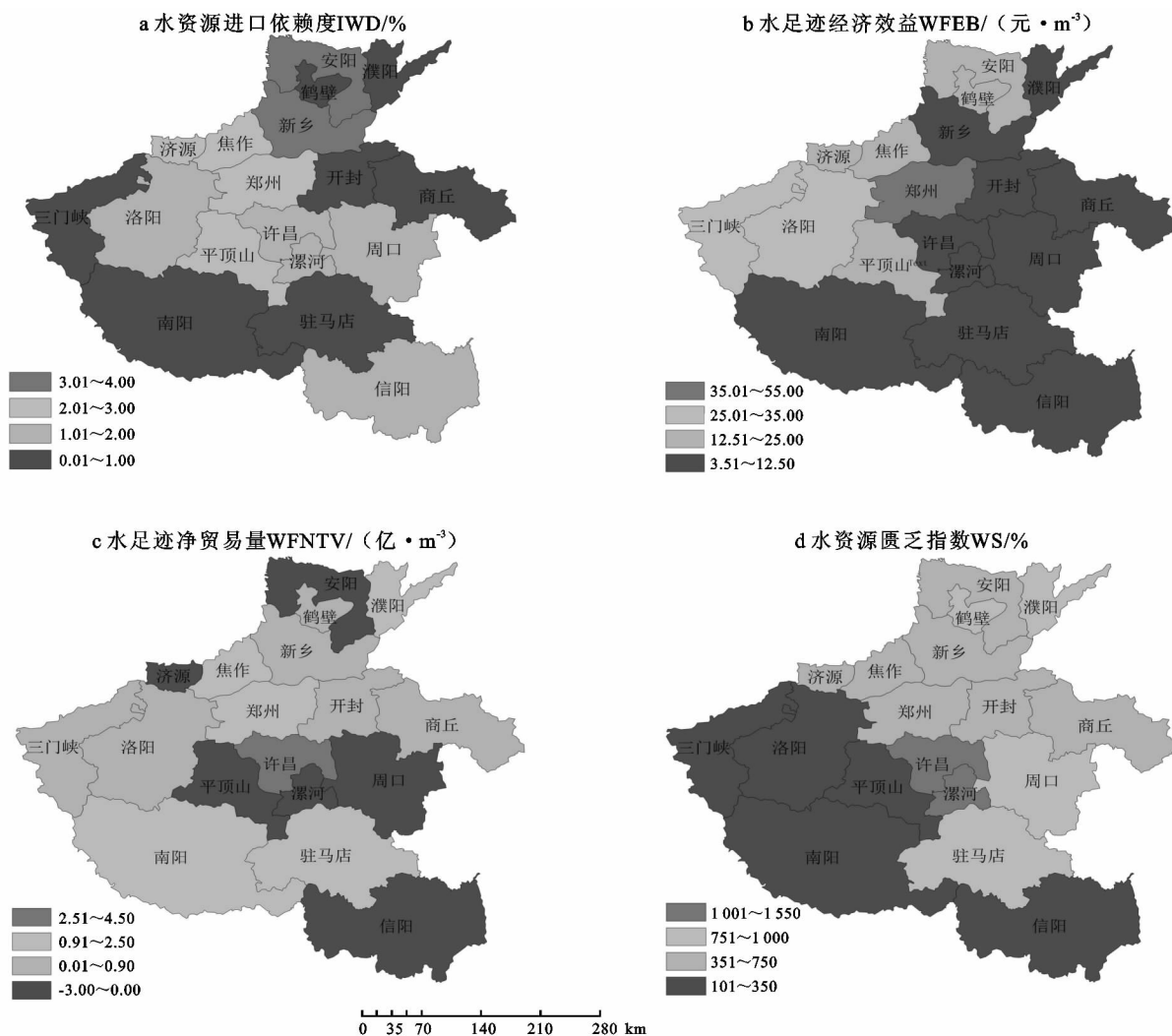


图 6 河南省 2009 年水足迹代表指数空间聚类

限于气象数据的不足,本文单位农畜产品虚拟水含量采用 2004 年 Chapagain 和 Hoekstra 等<sup>[17]</sup>有关中国部分研究成果及雷玉桃<sup>[18]</sup>等对河南省虚拟水研究成果,并非自己利用彭曼公式计算所得,所以研究结果会在时间和空间上存在一定的误差。这是本文存在的局限性,本人将在今后的研究中解决这些问题。

#### 参考文献:

- [1] 白景锋,杨杰. 河南省主要农作物虚拟水空间分布及水资源配置研究[J]. 地域研究与开发,2012,31(3):167-171.
- [2] 刘梅,许新宜,王红瑞,等. 基于虚拟水理论的河北省水足迹时空差异分析[J]. 自然资源学报,2012,27(6):1026.
- [3] Aldaya M M, Allan J A, Hoekstra A Y. Strategic importance of green water in international crop trade[J]. Ecological Economics,2010,69(4):887-894.

- [4] Allan J A. Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydropolitical futures would be impossible [C]//Hoekstra A Y. In Priorities for Water Resources Allocation and Management. London: United Kingdom, ODA,1993:13-26.
- [5] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual water trade: A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade[R]. Value of water research report series,2002.
- [6] 龙爱华,徐中民,张志强. 西北四省(区)2000 年的水资源足迹[J]. 冰川冻土,2003,25(6):692-699.
- [7] 潘文俊,曹文志,王飞飞,等. 基于水足迹理论的九龙江流域水资源评价[J]. 资源科学,2012,34(10):1905-1912.
- [8] 戚瑞,耿涌,朱庆华,等. 基于水足迹理论的区域水资源利用评价[J]. 自然资源学报,2011,26(3):487-493.

(下转第 304 页)

#### 4.4 水体富营养化防治分析

在监测点1的评价结果中,处于中偏中富营养的有2个,处于3级(中营养)的有6个;在监测点2,3,4的评价结果中,处于中偏中富营养的有1个,处于3级(中营养)的有12个。虽然整体水质较好,不会出现供水障碍、影响鱼类生存等现象,但也应密切关注湿地内水体营养盐的变化情况,防止其富营养等级向4级(中营养)过渡,以确保用水安全,保证湿地生态系统的健康发展。

人工湿地对营养盐具有去除效果,主要是因为湿地内水生植物对营养物质的吸附作用,但水生植物生长长期过后腐解也会导致营养物质的再释放,即二次污染。如表7所示,2011年汛期出口处营养级别比进口处稍有提高,可能是由二次污染引起的。因此应加强对水生植物的管理,秋季要对其进行收割,带走营养物质。此外,要控制点源污染及面源污染。

## 5 结论

合理的水体富营养化评价是对石佛寺人工湿地进行管理与治理的前提条件。将灰色聚类法应用于湿地水体富营养化评价中,建立湿地水环境综合评价模型,不仅考虑到了水体富营养化程度的灰色性,也考虑到了系统的白化性。评价结果科学、客观地反映了石佛寺人工湿地水体富营养化程度。

从监测点1,2,3,4的评价结果来看,除有3个处于中偏中富营养之外,其他均处于1—3级,说明水质状况良好,不影响供水及鱼类生存。灰色聚类法反映的是水体富营养化的综合情况,并不能反映湿地对

氮、磷等营养盐去除效果的细节,明晰细节变化还需对各指标做单独分析。对于汛期水体富营养级别高于非汛期,是因为农田施肥后,营养物质随径流进入湿地内部引起的。防止石佛寺人工湿地水体富营养化措施:及时对水生植物进行收割防止二次污染;控制流域内面源及点源污染。

#### 参考文献:

- [1] 熊飞,李文朝,潘继征,等.人工湿地脱氮除磷的效果与机理研究进展[J].湿地科学,2005,3(3):228-234.
- [2] 周林飞,谢立群,周林林,等.灰色聚类法在湿地水体富营养化评价中的应用[J].沈阳农业大学学报,2005,36(5):594-598.
- [3] 王辉,周林飞,康萍萍,等.基于灰色聚类法的大凌河水环境质量综合评价[J].人民黄河,2011,33(9):74-76.
- [4] 胡丽慧,潘安,李铁松,等.灰色聚类法在升钟水库水体富营养化评价中的应用[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2407-2412.
- [5] 慕金波,侯克复.灰色聚类在水环境质量评价中的应用[J].环境科学,1990,12(2):86-90.
- [6] 庞博,李玉霞,童玲.基于灰色聚类法和模糊综合法的水质评价[J].环境科学与技术,2011,34(11):185-188.
- [7] 付利华,朱百鸣.用灰色聚类法评价大气环境质量[J].环境与开发,1994,9(4):358-361.
- [8] 陈守煜.工程模糊集理论与应用[M].北京:国防工业出版社,1998:24-31.
- [9] 李祚泳,汪嘉杨,金相灿,等.基于进化算法的湖泊富营养化投影寻踪回归预测模型[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(2):1-8.
- [10] 周林飞,高云彪,许士国.模糊数学在湿地水质评价中应用的研究[J].水利水电技术,2005,36(1):35-38.

(上接第298页)

- [9] Gerbens-Leenes P W, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The water footprint of poultry, pork and beef: a comparative study in different countries and production systems[J]. Water Resources and Industry,2013,1:25-36.
- [10] Vanham D, Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The water footprint of the EU for different diets[J]. Ecological Indicators,2013,32:1-8.
- [11] 秦丽杰,靳英华,段佩利,等.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1024.
- [12] 邢海虹.基于GIS的陕南水源区农产品虚拟水空间差异分析[J].水土保持研究,2013,20(5):301-304.
- [13] 邵帅.基于水足迹模型的水资源补偿策略研究[J].科技进步与对策,2013,30(14):116-119.
- [14] 邓晓军,谢世友,崔天顺,等.新疆棉花消费水足迹及其对生态环境影响研究[J].水土保持研究,2009,16(2):176-185.
- [15] 龙爱华,张志强,徐中民,等.甘肃省水资源足迹与消费模式分析[J].水科学进展,2005,16(3):419-424.
- [16] 孙才志,刘玉玉,陈丽新,等.基于基尼系数和锡尔指数的中国水足迹强度时空差异变化格局[J].生态学报,2010,30(5):1312-1321.
- [17] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations[C]. Delft, the Netherlands: Value of Water Research Report Series: No. 16. IHE,2004.
- [18] 雷玉桃,陈瑾渐,王凤棠.基于虚拟水的河南省农作物结构优化研究[J].农业技术经济,2011,(11):118.
- [19] 河南省统计局.河南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2001—2010.
- [20] 河南省水资源公报[Z].河南省:河南省水利厅,2001-2010.