

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.003

# 中国省际水风险评价及空间关联格局研究

孙才志, 杨宇, 陈相涛, 韩琴

(辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 辽宁 116029)

**摘要:**参考世界自然基金会(WWF)与德国投资与开发有限公司(DEG)提出的水风险评估方法,从短缺风险、污染风险、灾害风险、生态风险以及监管与声誉风险5个方面构建水风险评价体系,以中国31个省(市)为研究对象,采用加权综合评价方法对2000—2013年各省(市)的水风险进行评估,并利用Fuzzy ISODATA聚类模型对水风险评价结果进行分类。在此基础上运用空间自相关分析方法,对中国水风险指数的总体空间区域差异及时间演变趋势进行研究。结果表明:①中国水风险总体处于中低水平,且风险等级呈现出由高向低发展的良好状态。②各省(市)风险大小差异明显,南方地区水风险普遍低于北方地区。③风险子系统中短缺风险与污染风险对各省(市)水风险影响较大,但影响程度随时间减弱;生态风险小幅上升;灾害风险受自然条件影响表现出随机性特征。④水风险空间上存在显著的集聚现象,但空间集聚特征减弱,省际水风险关联度减小。

**关键词:**水风险;指标体系;加权综合评价;空间自相关分析

中图分类号:X37 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0018-09

## Water risk assessment and spatial correlation patterns research in provincial scale in China

SUN Caizhi, YANG Yu, CHEN Xiangtao, HAN Qin

(College of Urban and Environmental Science, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** Referring to the water risk assessment method presented by World Wide Fund for Nature (WWF) and German Investment and Development Limited Liability Company (DEG), the water risk assessment system was constructed, considering five aspects of water shortage risk, pollution risk, disaster risk, ecology risk, regulation risk and reputation risk. Taking 31 provinces and cities as the research objects, the water risk in each region during 2000-2013 was evaluated using weighted comprehensive assessment method. The results of water risk assessment were classified according to Fuzzy ISODATA classification model. Based on that, the overall spatial differences and temporal evolution trends of water risk indexes in China were studied using spatial self-correlation analysis method. The results show that: 1. The overall water risk in China is at low-medium level and is developing from high to low. 2. The differences among regions are obvious. In general, water risks in southern regions are lower than those in northern China. 3. The shortage and pollution risk have a strong impact on the comprehensive water risk in each region, while the impact degree is getting weaker over time and ecological risk is rising slightly. Disaster risks affected by natural conditions show randomness characteristic. 4. Water risks show a significant agglomeration in space dimension, while its features are weakening. The correlation of water risks among regions is decreasing.

**Key words:** water risk; indicator system; weighted comprehensive assessment; spatial self-correlation analysis

水资源既是基础性的自然资源,也是战略性的经济资源和社会资源<sup>[1]</sup>。近年来,随着社会经济和人民生活水平的提高,水资源供需矛盾日益突出,对水系统带来的压力和风险也随之上升,与水相关的风险逐渐被各界重视<sup>[1]</sup>。水资源具有自然和社会双重属性,所谓水风险是指在自然因素及人类活动的影响下,水系统与生态系统和经济系统难以协调发展,并由此危及自身平衡和经济可持续发展的可能性。世界自然基金会(WWF)与德国投资与开发有限公司(DEG)将水风险表述为:自然因素与人类活动引起的一些潜在的与水有关的风险,包括与水相关的物理、环境、社会、监管等方面的风险<sup>[2]</sup>。水风险的大小实质上是由水引发的对生态系统和经济发展带来损失的大小,主要表现为水短缺、水污染、水灾害、水生态系统健康等。水资源作为维持各方平衡的重要因素,水风险的出现很可能引发全局风险。因此,对水资源进行合理科学的风险评价以及采取有效的风险管理措施,减少由水风险引发的一系列资源、环境、生态和社会系统的损失显得尤为重要。

中国是世界上缺水的国家之一,存在着水资源时空分布不均、人均占有量少、利用效率低等问题。自然条件的变化以及不合理的开发利用水资源,已经逐步超过了水环境系统与水生生态系统的承载力,导致了水短缺、水污染、水生态环境破坏等众多水风险问题。2013年中国七大水系一半以上河流(包括支流)水质低于Ⅲ类地表水质量标准,35个重点湖泊中17个严重污染,超过1/3的城镇水源不符合饮用水标准,水污染问题突出。如何管理水资源,降低水风险程度已成为目前研究的热点,本次研究在结合中国水资源、水生态环境现状和水资源管理、统计习惯的基础上建立了中国区域水风险评价指标体系,旨在评价目前中国水风险现状,辨析风险的来源及其空间关联格局特征,以期对以后区域水资源评价与管理提供参考。

## 1 国内外研究进展

风险研究最早出现在经济领域,通过定性分析,将风险定义为从事某项活动的结果不确定性,这种结果包括损失、盈利、无损失也无盈利3种情况<sup>[2]</sup>。风险的本质是不利后果的动力学特征,风险分析不等同于概率分析<sup>[3]</sup>。随着风险评价理论的不断发展和完善,以及科学技术及计算机技术的逐渐成熟和应用,风险评价已广泛应用于自然灾害、农业生产、环境评价、金融等方面。20世纪70年代初,风险分析首次在水资源系统分析中取得成功,Yen

等<sup>[4-5]</sup>以雨水排水系统的设计为例,从水文风险和水流风险两方面建立了风险评价的耦合模型。在此之后,风险分析广泛应用到水资源系统评价中。国外水风险研究主要集中于水资源系统的风险管理和决策等方面。Haimes<sup>[6]</sup>将风险和不确定性集结,提出分段多目标风险分析方法和多目标多阶段影响分析法,这些都对多目标风险决策学科的发展起到了积极作用。Serageldin<sup>[7]</sup>在对水资源可持续发展问题进行研究中明确指出了地下水开发是影响水资源系统的一个风险性问题。2009欧洲水资源协会(EWRA)召开了以“气候变化下水资源管理与风险降低”为主题的会议,就水短缺、水损失、水资源综合管理等问题展开了讨论<sup>[8]</sup>。Nevidimova等<sup>[9]</sup>在结合定量统计与区域自然和社会经济空间特征的基础上,开发出了ArcGIS信息分析数据库,并对气候与水文条件影响下的水资源利用风险程度进行了区域划分。

针对我国水资源禀赋和面临的水环境问题,国内众多学者从理论与应用方面开展了大量的水风险相关研究工作,也取得了丰硕的研究成果。刘道祥<sup>[10]</sup>介绍了水资源系统风险的定义,重点论述了水资源风险管理过程与风险分析的数学模型。左其亭等<sup>[11]</sup>探讨了水资源不确定性及风险分析方法,有效地处理了水资源风险评价过程中的模糊性、灰色性和未确知性问题,为水资源系统风险规划与管理提供了参考。李九一等<sup>[12]</sup>选择水资源供给保障率、水资源保障可靠性、水资源利用率和水资源利用效率4个指标反映区域风险发生的概率以及规避风险的能力,建立了区域尺度的水资源短缺风险评估体系。鹇建强等<sup>[13]</sup>从水资源、水环境、水生态、供水保障方面入手,选择控制性指标,对我国水资源安全进行综合评价与分析。金菊良等<sup>[14]</sup>采用Monte Carlo方法模拟三角模糊数,建立了基于随机模拟与三角模糊数耦合的水环境风险评价模型(SS-TFN),提高了评价结果的合理性,用SS-TFN通过调整水环境系统的质量状态变量的控制参数,可方便地获得水环境风险管理的对策方案。孙才志等<sup>[15]</sup>运用TOPSIS模型和阻碍因子对中国农村水贫困风险评价进行了测度,为实现农村水资源的综合利用找到了突破方向。除此之外国内外学者在水生态风险<sup>[16-18]</sup>、水短缺风险<sup>[19-21]</sup>等方面做了大量研究工作。

综上所述,目前国内外对水风险的研究主要集中于水灾害、水资源短缺、水污染、水生态风险评价以及水风险管理等方面。研究内容多是从水资源某一个角度展开,对于系统的水风险研究较少。在相

关风险评价时比较注重水质、水量以及水环境承载力等物理风险的评价,对于决策者的涉水管理水平与政策执行为代表的监管风险鲜有涉及。王浩<sup>[21]</sup>采用 WWF 与 DEG 提出的水风险评估方法,将水风险分为物理风险、监管风险和声誉风险,对中国 10 个水资源一级区和 7 个水资源二级区进行总体评估,但是 WWF 水风险评估工具适合较大尺度的流域风险评估。鉴于此,笔者参考 WWF 与 DEG 提出的水风险评估方法,从短缺风险、污染风险、灾害风险、生态风险以及监管与声誉风险 5 个方面构建了水风险评价体系,以中国 31 个省(市)为研究对象,采用加权综合评价方法对 2000—2013 年各省(市)的水风险进行评估,揭示了中国水风险的空间分布特征,并运用空间自相关分析方法,对中国水风险的总体空间区域差异及时间演变趋势进行研究。

## 2 研究方法 & 数据说明

### 2.1 加权综合评价方法

加权综合评价方法是在不同量纲的指标处理后,将所有指标代表的信息综合成一个指数的方法<sup>[22]</sup>,其表达式为

$$C = \sum_{m=1}^n w_m z_m, m = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中  $\sum_{m=1}^n w_m = 1$

式中: $C$  为综合指数; $w_m$  为  $m$  指标权重; $z_m$  为指标  $m$  的评分值。参考 WWF 的指标权重分配,采用层次分析法(AHP)计算本文的各指标权重。

### 2.2 空间自相关分析

空间自相关分析是一系列空间数据分析方法和技术的集合<sup>[23]</sup>,用于定量分析事物在空间上的依赖关系,将其应用到水风险评价中,可通过可视化分布图揭示水风险的空间集聚特征,揭示其内在变化的驱动机制。空间自相关性指标包括全局指标和局部指标 2 种:全局 Moran's  $I$  指数用于验证整个区域内某一要素的空间集聚模式,而局部 Moran's  $I$  指数则表示整个区域中一个单元区域上的某一属性值与邻近单元区域同一属性值的相关程度<sup>[23]</sup>。全局空间自相关指数的计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (2)$$

其中  $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$   $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

式中: $I$  为全局空间自相关指数(Global Moran's  $I$ );

$x_i$  为第  $i$  地区的观测值; $n$  为栅格数; $W_{ij}$  为二进制的邻接空间权重矩阵,表示空间对象的邻接关系。 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ;当区域  $i$  和区域  $j$  相邻时, $W_{ij} = 1$ ;当区域  $i$  和区域  $j$  不相邻时, $W_{ij} = 0$ 。 $I$  指数在  $-1 \sim 1$  之间,小于 0 时为负相关,等于 0 为不相关,大于 0 时为正相关, $I$  的绝对值越大表示水风险指数在空间分布上的相关性越大,当值趋于 0 时,表示其空间分布呈随机性分布。

局部空间自相关是将全局 Moran's  $I$  指数分解到各个空间单元,可度量每个省(市)与周边地区之间水风险的局部空间关联和空间差异程度,其公式为<sup>[23]</sup>

$$I_i = \left( \frac{x_i - \bar{x}}{m} \right) \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

式中: $m = \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n x_j^2 \right) / (n - 1) - \bar{x}^2$ ;  $I_i$  为局部自相关指数(Local Moran's  $I_i$ ),  $I_i$  值为正时表示该单元区域周围相似值(高值或低值)的空间集聚,  $I_i$  值为负时表示非相似值之间的空间集聚。Moran's  $I$  散点图中,横轴和纵轴分别对应变量  $z$  和空间滞后向量的所有取值,每个区域观测值的空间滞后就是该区域周边地区观测值标准化的加权平均<sup>[24]</sup>。可将 Moran's  $I$  散点图分为 4 类:①HH:省(市)自身和周边地区水风险指数均较高;②HL:区域自身水风险指数较高,周边地区较低;③LL:区域自身和周边地区水风险指数均较低;④LH:区域自身水风险指数较低,周边地区较高。

### 2.3 指标选取

指标体系的选择关系到水风险评价结果的科学性和可靠性,笔者在参考 WWF 和 DEG 评价指标体系的基础上,依据指标数据的可获取性、可操作性以及系统性、全面性等原则,根据中国各省(市)水资源、水环境现状,以及中国水资源管理和统计习惯,建立了区域水风险评价指标体系,本次评价将水风险分为短缺风险、污染风险、灾害风险、生态风险以及监管与声誉风险 5 类。具体指标含义及说明见表 1。

### 2.4 数据来源与处理

选取了中国 31 个省(市)作为研究对象,对中国省际水风险进行评价和原因分析,纵向时间跨度为 14 年(2000—2014 年)。所用数据来源于《中国统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》、《中国环境统计年报》、《中国水资源公报》、各省(市)水资源公报、统计年鉴,监管与声誉风险数据参考文献[2]的评分标准和各省(市)政府水务公开信息等资料获得。

表 1 中国省际水风险评价指标体系

分类	指标	指标含义	评分标准					权重/ %
			1 分	2 分	3 分	4 分	5 分	
短缺风险	年内降水量变化系数(%)	年内最高降水月份与最低降水月份的降水量之差与年降水总量的比值	≤0.10	0.10~0.20	0.20~0.35	0.35~0.50	≥0.50	1.96
	人均可更新水资源量(m <sup>3</sup> /人)	可更新的水资源量与人口的比值	≥1500	1000~1500	500~1000	300~500	≤300	9.86
	水资源利用效率(m <sup>3</sup> /万元)	万元国内生产总值耗水量	≤50	50~100	100~150	150~200	≥200	5.58
	水资源开发程度(%)	当地取水量与水资源总量的比值	≤0.10	0.10~0.30	0.30~0.50	0.50~1.00	≥1.00	3.25
污染风险	污径比(kg/m <sup>3</sup> )	采用废污水排放量和地表水资源量	≤50	50~100	100~300	300~500	≥500	8.85
	污染物排放情况(mg/L)	COD 氨氮排放量与地表水资源量	≤0.20	0.2~0.40	0.40~0.60	0.60~0.80	≥0.80	13.03
	污水处理水平(%)	经处理的城市污水与城市污水总排放量的比重	≥90	75~90	60~75	50~60	≤50	3.29
	高风险产业经济贡献率(%)	高风险产业总产值与工业总产值	5	5~10	10~20	20~30	≥30	1.83
灾害风险	极值事件影响范围(%)	受干旱或洪涝灾害影响的范围与耕地面积的比值	≤10	10~25	25~40	40~55	≥55	5.90
	地表水控制能力	蓄水工程可蓄水量与地表水资源量的比值	≥1.00	0.70~1.00	0.45~0.70	0.20~0.40	≤0.20	6.71
生态风险	生物丰度指数(%)	森林面积、水域面积、草地面积与各权重系数的乘积之和比上区域面积	≥60	40~60	30~40	20~30	≤20	3.40
	生态环境用水比例(%)	生态环境用水占总用水量的比例	≤0.5	0.5~1.5	1.5~3	3~5	≥5	6.08
	农村卫生厕所普及率(%)	农村地区使用卫生厕所的农户数与该地区农户总户数的比率	≥90	80~90	70~80	60~70	≤60	2.02
	地下水开采程度(%)	地下水供水量占总供水量的比例	≤10	10~25	25~40	40~55	≥55	10.51
监管声誉风险	政府的水战略	主要指区域水资源综合规划、防洪抗旱规划、水污染防治规划、水土保持规划以及与水相关的法律法规建设等	制定了复杂的水战略,包括防洪和抗旱规划等	制定了包括最重要议题在内的综合水战略	制定了综合水战略,但忽略了重要议题	没有制定水战略,但仍有一些重要的用水政策	没有制定水战略	5.88
	与水相关的法律法规体系的实施	从资金投入、监管覆盖率、治理保护 3 个方面分析,统计指标包括污水处理投资、水利建设投资、城市污水处理率、区域实施监测数量	在区域内强烈执行	与环境相关的法律体系严格执行,但在区域内部分执行较弱	一些(不规则)执行	没有,但计划在 5 年内执行	没有实施执行与水相关的法律体系	6.15
	水在当地社会的地位	筛选当地与水相关的文化节日以及与水相关的在当地文化旅游的活跃程度	有与水相关的节日或旅游胜地,并在当地受到重视	有与水相关的节日或旅游胜地,但在当地影响较小	有相关的节日或旅游胜地,但在当地没有影响	政府或当地居民积极开发当地水文化	没有与水相关的节日或旅游	3.54
	信息公开透明度	政府对外公开关于水质和水量信息的程度	定期公开透明公布详细的水资源信息	公布包括重要指标在内的水资源信息	公布了水资源信息,但忽略了部分重要指标	只公布部分与水相关的信息	不公布	2.08

### 3 评价结果与分析

#### 3.1 全国水风险评价结果分析

从评价结果来看(表 2),中国的水风险等级总体处于中低水平,且呈波动下降趋势。全国整体水风险评分从 2000 年的 3.01 下降到 2013 年的 2.34,

充分说明我国水风险状况呈现出由高向低发展的良好状态。整体上可分为以下 3 个阶段:①2002—2004 年处于快速下降阶段,水风险评分从 2002 年的 3.02 下降到 2004 年的 2.63,下降幅度较大,这一时期污染风险明显降低,污染物排放指标即 COD 与氨氮排放量大幅度减少,分别从 2002 年的 1.47 下

降到2004年的0.80,风险明显下降。其他4类风险类型小幅减小,对水风险减小整体作用不明显。②2004—2010年缓慢下降阶段,5种风险类别均呈小幅下降状态,相较而言这一阶段监管与声誉作用积极,表明政府对水资源管理水平与信息公开透明度不断提高,并且水文化建设内容逐渐丰富。③2010—2013年小幅波动下降状态,波动起伏在0.03~0.11之间。这一阶段污染风险与生态风险虽有小幅上升,但贡献不大。期间地表水资源控制能力与水资源监管水平不断提高,推动了水风险级别不断降低。但2010年污染风险在这期间对总体水风险影响较前一阶段有所上升,导致总体水风险高值突出。主要在于受统计标准影响,农业污染源首次纳入统计范围内,污染物统计排放量增大,污染物排放指标呈上升状态。

表2 中国省际水风险评价结果

地区	2000年	2002年	2004年	2006年	2008年	2010年	2011年	2012年	2013年
北京	4.03	3.91	3.55	3.54	3.46	3.36	3.60	3.40	3.34
天津	3.94	3.95	3.46	3.46	3.29	3.42	3.45	3.13	3.25
河北	3.90	4.11	3.75	3.86	3.55	3.45	3.46	3.25	3.38
山西	3.86	4.03	3.59	3.55	3.31	3.43	3.34	3.28	3.19
内蒙古	3.35	3.41	2.54	2.54	2.54	2.92	2.53	2.38	2.34
辽宁	3.35	3.40	2.67	2.66	2.62	2.80	2.95	2.08	2.37
吉林	2.92	2.96	2.44	2.36	2.19	2.57	2.57	2.10	2.09
黑龙江	3.23	3.33	2.55	2.47	2.51	2.76	2.79	2.43	2.17
上海	3.79	3.34	3.46	3.45	3.24	3.28	3.17	3.24	3.20
江苏	3.44	3.44	3.25	2.74	2.69	2.99	2.47	2.67	2.87
浙江	2.53	2.50	2.23	2.16	1.74	1.96	2.10	1.92	1.77
安徽	3.21	2.58	2.35	2.43	2.13	2.27	2.03	1.99	2.23
福建	2.22	2.43	2.15	2.22	1.99	2.06	1.82	1.85	1.81
江西	2.35	2.45	2.13	2.13	2.10	2.18	1.84	1.68	1.67
山东	3.67	3.99	3.08	3.18	2.84	3.24	3.18	3.15	2.98
河南	3.63	3.56	3.03	3.18	3.06	3.26	3.17	3.48	3.63
湖北	2.98	2.49	2.06	2.10	1.86	2.07	1.74	1.74	2.36
湖南	2.40	2.59	2.02	2.17	2.12	2.38	1.99	1.80	2.05
广东	2.29	2.45	2.13	1.99	1.94	1.86	1.86	1.71	1.86
广西	2.7	2.58	2.34	2.31	2.19	2.32	1.95	1.93	1.76
海南	2.39	2.48	1.97	1.95	1.87	1.98	1.86	1.56	1.69
重庆	2.53	2.86	2.10	2.36	2.15	2.20	1.89	1.81	1.81
四川	2.21	2.45	2.18	2.28	1.92	2.12	1.91	1.87	1.88
贵州	2.29	2.39	2.05	2.17	1.90	2.08	1.91	1.65	1.68
云南	2.14	2.25	2.01	2.08	2.02	2.10	1.79	1.74	1.59
西藏	2.38	2.26	2.21	2.33	2.06	2.08	1.98	2.05	1.96
陕西	3.44	3.37	2.66	2.69	2.42	2.58	2.28	2.23	2.27
甘肃	3.22	3.26	2.48	2.73	2.58	2.87	2.26	2.12	2.19
青海	2.56	2.73	2.35	2.48	2.26	2.21	2.01	1.88	1.91
宁夏	3.45	3.45	3.49	3.44	3.52	3.16	2.76	3.11	3.04
新疆	2.66	2.85	2.45	2.57	2.57	2.52	2.32	2.10	2.20
平均值	3.01	3.02	2.63	2.63	2.47	2.59	2.41	2.30	2.34

注:受篇幅限制,只列出部分年份结果。

从全国范围内进行静态比较来看,2000—2013年中国水风险整体水平虽然不高,但区域空间差异较大,各地风险水平不均,风险类别不同。

### 3.2 全国水风险评价结果聚类分析

根据表1中的评价价值,采用模糊迭代自组织聚类算法<sup>[25]</sup>(Fuzzy ISODOTA聚类方法),可以将中国31个省(市)水风险评分值归为3类(表3)。

表3 2000年与2013年水风险聚类中心值比较

年份	2000	2013
第一类	3.70	3.20
第二类	3.19	2.19
第三类	2.40	1.83

2000年第一类风险区包括北京、天津、河北、山西、辽宁、上海、江苏、山东、河南、宁夏等地区,该类地区属水风险高值区(图1),风险均值在3.70左右。其中,北京、天津、河南、上海、宁夏等地属水短缺风险高值区,河北、山西、江苏等地属水污染高值区,该区域灾害风险、监管风险对水风险作用不明显。第二类风险区包括内蒙古、吉林、黑龙江、安徽、陕西、湖北、甘肃等地区,属水风险中值区(图1)。该范围内5类子系统风险值不高,各类风险不突出,但安徽、湖北等地水污染风险相对高于该范围内其他地区。第三类风险区主要包括浙江、福建、江西、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、西藏、青海、新疆等地区,属于水风险低值区(图1),该范围内区域水短缺、水污染、水灾害与生态风险程度低,但监管风险对整体水风险影响较大。

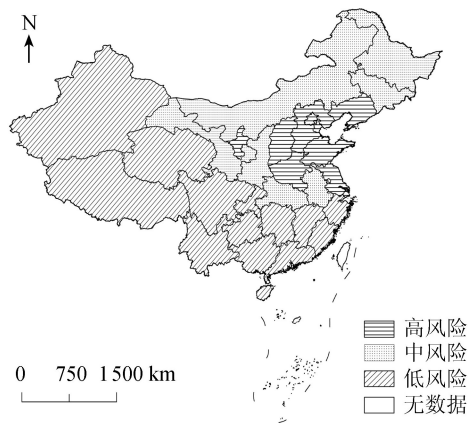


图1 2000年全国水风险评估结果聚类示意图

2013年第一类包括北京、天津、河北、山西、上海、江苏、山东、河南、宁夏等地区,属水风险高风险区(图2);对比2000年结果来看,一类风险值降低且数量减少,辽宁省由高风险区过渡到中风险区。第二类包括内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、安徽、陕西、甘肃、青海、新疆等地区,属水风险中值区(图2)。其中,青海和新疆地区受生态风险影响由低风险区过渡到中风险区。第三类包括浙江、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、西藏等地区,为水风险低值区(图2),与2000年相

比,湖北地区水风险监管水平及灾害应对能力上升,由中风险区过渡到低风险区。

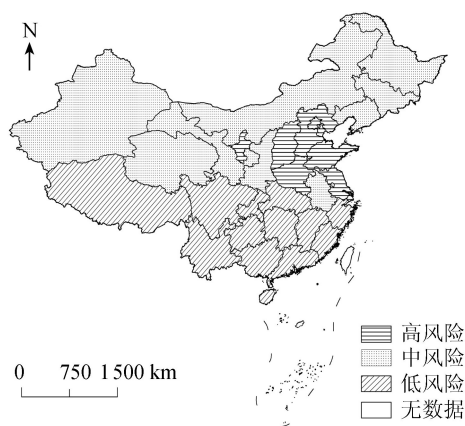


图2 2013年全国水风险评估结果聚类示意图

### 3.3 水风险子系统分析

#### 3.3.1 水短缺风险

比较2000—2013年各地水短缺风险评分值与水风险综合评分值(表4),水短缺风险层次划分明显,地区间短缺水平差异性大。其中,宁夏、河北、上海、天津、北京、山西、山东、江苏、河南、甘肃、辽宁、

安徽、陕西等地评分值处于0.57~0.97之间,短缺风险高于全国平均水平;具体体现在北京、河北、山东、河南等地受年内降水变化系数影响较大,年内降水时间分布不均,季节性干旱影响较大,且这些地区水资源开发程度都较高,适应水短缺的能力相对较弱。上海虽水资源总量丰富,但人口数量大,人均可更新水资源量较少,因此也处于水短缺高风险区。山东、陕西、辽宁等地水资源利用效率较低,对水短缺风险的贡献也较大。内蒙古、黑龙江、吉林、新疆、湖北、广西、江西、浙江、广东等地水短缺风险相对较低,评分结果在0.51~0.56之间,西藏、云南、四川、青海等地水短缺风险属于低水平,分值在0.35~0.36之间。

#### 3.3.2 水污染风险

综合2000—2013年污染风险评分来看,云南、广东、福建、海南、贵州、四川、新疆等地区对中国整体水风险的降低起积极作用,此类区域工业类型以轻工业为主,高风险产业比重较小,污染风险评分值处于0.34~0.39之间,污染风险较小。辽宁、河南、

表4 中国水风险各子系统风险评估结果

地区	短缺风险			污染风险			灾害风险			生态风险			监管与声誉风险		
	2003年	2007年	2013年	2003年	2007年	2013年	2003年	2007年	2013年	2003年	2007年	2013年	2003年	2007年	2013年
北京	0.98	0.86	0.88	1.25	1.23	1.16	0.36	0.19	0.13	0.95	1.01	0.95	0.49	0.28	0.22
天津	0.93	0.84	0.86	1.27	1.28	1.21	0.36	0.19	0.13	0.83	0.71	0.70	0.55	0.38	0.34
河北	0.99	0.91	0.84	1.17	1.31	1.19	0.30	0.24	0.13	0.82	0.88	0.95	0.61	0.38	0.28
山西	0.84	0.77	0.74	1.17	0.97	0.92	0.36	0.37	0.31	0.95	0.88	0.96	0.55	0.37	0.25
内蒙古	0.49	0.64	0.33	1.00	0.42	0.35	0.50	0.37	0.45	0.72	0.90	0.96	0.65	0.47	0.23
辽宁	0.64	0.68	0.40	1.14	0.64	0.55	0.36	0.36	0.19	0.72	0.84	0.88	0.49	0.44	0.34
吉林	0.47	0.52	0.32	0.90	0.41	0.35	0.36	0.30	0.26	0.58	0.68	0.78	0.61	0.50	0.38
黑龙江	0.49	0.62	0.43	0.86	0.36	0.35	0.51	0.56	0.39	0.68	0.68	0.77	0.69	0.51	0.23
上海	0.99	0.88	0.86	1.28	1.25	1.23	0.39	0.39	0.39	0.44	0.38	0.38	0.67	0.38	0.34
江苏	0.90	0.76	0.80	1.14	0.69	0.94	0.44	0.32	0.39	0.44	0.54	0.42	0.53	0.38	0.32
浙江	0.41	0.35	0.28	0.96	0.41	0.39	0.33	0.33	0.50	0.28	0.48	0.28	0.55	0.40	0.32
安徽	0.63	0.51	0.62	0.96	0.37	0.42	0.56	0.45	0.38	0.51	0.46	0.61	0.55	0.44	0.20
福建	0.41	0.43	0.32	0.51	0.37	0.35	0.45	0.45	0.45	0.30	0.34	0.34	0.55	0.52	0.34
江西	0.43	0.41	0.37	0.57	0.41	0.35	0.51	0.50	0.45	0.30	0.34	0.24	0.53	0.44	0.26
山东	0.98	0.74	0.75	1.11	0.69	1.07	0.30	0.25	0.19	0.72	0.74	0.72	0.57	0.41	0.26
河南	0.90	0.74	0.92	0.93	0.62	1.12	0.37	0.19	0.19	0.86	0.96	1.00	0.57	0.46	0.40
湖北	0.53	0.41	0.47	0.93	0.41	0.94	0.50	0.37	0.30	0.34	0.31	0.33	0.69	0.42	0.32
湖南	0.39	0.41	0.33	0.67	0.44	0.35	0.45	0.50	0.56	0.30	0.36	0.40	0.59	0.48	0.40
广东	0.41	0.37	0.32	0.73	0.32	0.27	0.33	0.39	0.57	0.28	0.32	0.34	0.54	0.48	0.36
广西	0.41	0.43	0.38	0.77	0.41	0.35	0.51	0.45	0.39	0.30	0.42	0.32	0.71	0.53	0.32
海南	0.38	0.41	0.31	0.51	0.37	0.37	0.50	0.39	0.39	0.30	0.30	0.26	0.71	0.44	0.36
重庆	0.38	0.36	0.30	0.67	0.37	0.34	0.51	0.51	0.39	0.34	0.40	0.41	0.65	0.49	0.38
四川	0.40	0.38	0.30	0.51	0.42	0.35	0.51	0.51	0.45	0.34	0.40	0.39	0.47	0.45	0.38
贵州	0.38	0.38	0.28	0.41	0.44	0.34	0.45	0.39	0.38	0.30	0.36	0.36	0.75	0.48	0.32
云南	0.36	0.38	0.29	0.41	0.37	0.34	0.39	0.45	0.39	0.30	0.36	0.34	0.69	0.49	0.24
西藏	0.38	0.34	0.32	0.52	0.43	0.52	0.39	0.39	0.39	0.32	0.40	0.51	0.77	0.39	0.21
陕西	0.63	0.49	0.50	0.90	0.36	0.35	0.57	0.45	0.39	0.72	0.78	0.74	0.63	0.39	0.29
甘肃	0.64	0.69	0.55	0.93	0.39	0.35	0.44	0.45	0.39	0.54	0.66	0.64	0.67	0.41	0.25
青海	0.38	0.38	0.34	0.44	0.44	0.42	0.50	0.26	0.32	0.60	0.60	0.58	0.65	0.42	0.24
宁夏	0.99	1.03	0.96	1.11	1.19	1.16	0.30	0.24	0.19	0.44	0.50	0.54	0.61	0.37	0.20
新疆	0.54	0.54	0.47	0.54	0.37	0.47	0.39	0.39	0.13	0.54	0.72	0.79	0.65	0.52	0.35

江苏、山东、山西、宁夏、北京、河北、天津、上海等地污染风险对中国水风险贡献影响较大,污染风险分值处于0.69~1.12之间。此类区域是中国重化工产业的密集分布区,其中高风险产业产值在河北省经济总量中占有较大比例,因此对污染风险贡献较大。北京、天津、上海等地高风险产业比重虽然不大,但是由于人口密集,COD和氨氮排放量中生活污水比重较大,污水处理量虽多,但处理率不足。

### 3.3.3 水灾害风险

与全国水风险评估结果相比,2000—2013年之间水灾害风险一直处于较低水平,但受自然条件因素与气候条件的影响,表现出随机性特征。相对而言,全国水灾害风险较大的地区是安徽、云南、陕西、福建、湖南、黑龙江、江西、四川、重庆等地,分值贡献在0.42~0.52之间。主要原因是区域对地表水的控制能力较弱,受洪涝和干旱影响范围较大。纵向来看,全国水灾害风险贡献率波动减小,主要得益于当地政府对水利设施的大量投资,使得当地地表水的控制能力显著提高。

### 3.3.4 水生态风险

从2000—2013年水生态风险评估结果看,水生态风险对全国水风险贡献比相对较小,但所占比重却逐年增加,这表明全国总体的生态环境状况呈现出一定的恶化趋势。从区域内部看,黑龙江、陕西、山东、天津、内蒙古、山西、河北、河南等地水生态风险较高,评分值在0.73~0.97之间;山西、天津、河南等地生态风险较大的主要原因在于当地的生态环境需水量高;北京、河北、山东等地地下水开采程度较高,大水漫灌的农业生产方式产生了土壤盐渍化、地下水水质下降等一系列环境问题。

### 3.3.5 水监管与声誉风险

从2000—2013年风险评估结果来看,中国水监管与声誉风险整体处于低水平,且呈现出逐步降低的趋势,评分值普遍在0.39~0.60之间,说明我国关于水资源的管理水平不断提高。其中,北京、天津、浙江、江苏等地风险水平较低,评估结果在0.40~0.43之间;西藏、青海、广西、贵州等地监管与声誉风险水平相对较高。从风险体系内部来看,水监管风险虽不高,但仍有不足。与水相关的战略以及水在当地社会中的地位对监管与声誉风险影响最小,整体水平分别在0.02~0.05和0.05~0.06之间,说明政府与当地居民对水资源问题重视程度较高。但是与水相关的法律体系实施和信息公开透明度对监管与声誉风险影响相对较大,评分值在0.06~0.18和0.03~0.11之间。四川、西藏及重庆地区与水相关的政策执行程度在0.18左右,信息公开

公开程度在0.06~0.10之间,对与水相关的政策执行能力不足,政府信息公开透明度不高,有待进一步完善。

## 4 中国水风险空间关联格局分析

利用全局空间自相关模型,计算出中国31个省区2000—2013年水风险全局Moran指数I的估计值(表5)。数据显示全局Moran指数I的估计值研究期间虽有波动,但均大于0,且正态统计z-score均大于正态分布函数在0.05水平下的临界值(1.96),通过了显著性检验。可见,中国31个省(市)之间的水风险空间分布上存在显著的空间集聚特征,表现出相似值之间的空间集聚,即水风险较高的省(市)相对趋于靠近,水风险中较低的省(市)相对趋于相邻。

表5 中国2000—2013年水风险的Moran指数I检验

年份	Moran 值	Z 值	年份	Moran 值	Z 值
2000	0.7438	6.3071	2007	0.6543	5.5826
2001	0.7409	6.2835	2008	0.5556	4.7812
2002	0.7099	6.0326	2009	0.6406	5.4707
2003	0.7292	6.1893	2010	0.6497	5.5433
2004	0.6190	5.2957	2011	0.7007	5.9581
2005	0.5695	4.8954	2012	0.5866	5.0320
2006	0.6183	5.2906	2013	0.6220	5.3198

通过以上分析可知,水风险受水资源总量、人均可更新水资源量、降水年内变化系数和气候变化等自然因素影响,因此必然导致在自然条件相似的区域产生空间集聚。同时,水资源系统受人类活动影响日益强烈,因此水风险在人口、社会条件及产业结构等经济发展条件水平同等或类似的地区出现集聚。但随着区域间经济发展水平的差异逐渐变大,中国省际水风险空间集聚趋势减弱。

为了更清晰地显示中国省际水风险具体地区的空间集聚特征,采用Matlab软件计算局部Moran's I值,并作出初始年(2000年)与最终年(2013年)中国水风险指数的LISA集聚图(图3、图4)。可以发

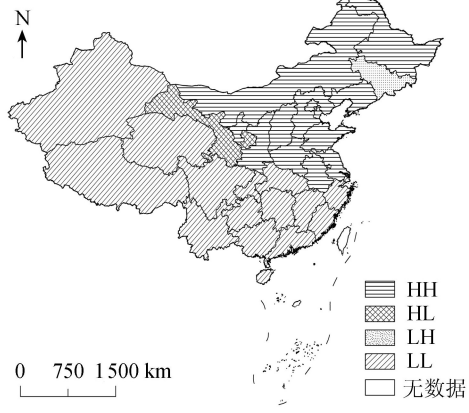


图3 2000年水风险局部自相关集聚示意图

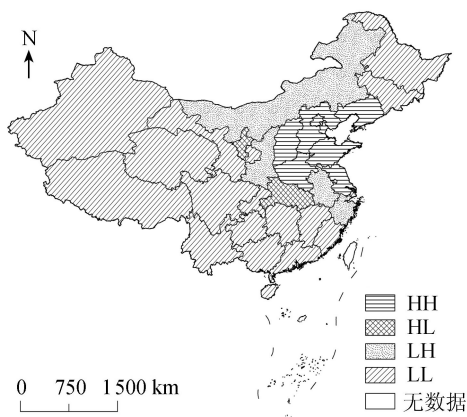


图4 2013年水风险局部自相关聚集示意图

现,总体而言中国 HH 地区和 LL 地区个数较多,HL 地区和 LH 地区个数较少,说明中国省际水风险存在空间聚集特征。但是,2013 年的 HH 地区与 LL 地区个数较 2000 年减少,说明中国省际水风险的空间聚集逐渐减弱。

HH 主要稳定在环渤海地区,由于该区域年内降水变化系数相对较大,且人均可更新水资源量较少,高风险产业在此区域集聚,污染物排放量较大,因此该地区呈现 HH 集聚。LL 地区主要稳定集中在南方、青藏地区。该区域水资源总量丰富,且年内降水分布平均,生态环境良好且监管水平较高,因此该区域呈现 LL 集聚。HL 地区和 LH 地区变动较大,具体来说,辽宁、安徽、山西从 HH 地区落入 LH 地区,吉林从 LH 地区落入 LL 地区。只有上海地区稳定在 HL 集聚区,主要因为上海周边地区水风险较低但经济发达,人口密度大导致人均可更新水资源量较低,因此上海稳定在 HL 地区。辽宁、安徽、陕西、甘肃等地是受区域内部影响,水资源管理水平及污染排放物降低,因此从 HH 地区落入到 LH 地区。吉林、黑龙江、和宁夏地区主要位于进阶地区,受周边地区水风险程度影响较大。其中吉林、黑龙江、宁夏地区周边风险降低,因此从 HH 地区落入 LH 地区。

## 5 结论

a. 2000—2013 年中国水风险的等级总体处于中低水平,且风险水平呈现出由高向低发展的良好状态,水风险评价平均值由 3.01 下降到 2.34。2002—2004 年为快速下降阶段,2004—2010 年为缓慢下降阶段,2010—2013 为小幅波动下降阶段。

b. 中国各省(市)水风险大小差异明显,各地风险水平不均。南方地区水风险普遍低于北方地区,其中北京、天津、河南、河北、山东、山西、宁夏等地区水风险最为突出。

c. 在构建的水风险评价子系统中,短缺风险与

污染风险对各省(市)水风险影响较大,但影响率随时间减弱;生态风险表现出逐年上升的趋势;灾害风险受自然条件影响,变率较大,表现出随机性与不确定性特征。

d. 水风险空间上存在显著的集聚特征,表现出相似值之间的空间集聚状态,但 2013 年较 2000 年集聚省(市)个数减少,说明中国水风险的空间集聚特征减弱。

研究结果对于丰富水风险的系统研究具有一定的理论意义与参考价值,可为区域水资源管理与可持续发展提供部分借鉴。但是水风险系统评价的指标仍需丰富,同时需要结合区域特征做进一步研究;各项指标的评分标准与权重赋值对于评价结果影响较大,需依据评价区域的大小做进一步探讨。

## 参考文献:

- [1] 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):116-120. (ZHANG Liping, XIA Jun, HU Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in china [J]. Resources And Environment in The YANGTZE Basin,2009,18(2):116-120. (in Chinese))
- [2] 王浩. 中国水风险评估报告(2013)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2013.
- [3] 黄崇福. 自然灾害风险与评价理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [4] YEN B C, ANG A H S. Risk analysis in design of hydraulic projects [D]. Commonwealth of Pennsylvania: University of Pittsburg,1971.
- [5] YEN B C, ASCE A C. Risks in hydrologic design of engineering projects [J]. Journal of the Hydraulics Division,1970,96(4):959-966.
- [6] HAIMES Y Y. Rick-benefit analysis in multi-objective framework[M]. New York:McGraw-Hill,1985.
- [7] SERAGELDIN I. Towards sustainable management of water resources [M]. Washington DC: World Bank, 1995.
- [8] SYMEON E C. Water resources conservancy and risk reduction under climatic instability[J]. Water Resources Management,2011,25(4):1059-1062.
- [9] NEVIDIMOVA O G, YANKOVICH P E, YANKOVICH K S. Functional-analytical capabilities of GIS technology in the study of water use risks[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2015, 24(1):12-20.
- [10] 刘道祥. 水资源系统风险管理研究综述[J]. 西北水电, 2003(1):5-8. (LIU Daoxiang. Summary for risk management of water resources system [J]. Northwest Water Power,2003(1):5-8. (in Chinese))
- [11] 左其亭,吴泽宁,赵伟,等. 水资源系统中的不确定性及

- 风险分析方法[J]. 干旱区地理, 2003, 26(2): 116-121. (ZUO Qiting, WU Zening, ZHAO wei, et al. Uncertainties in water resources system and risk analysis method[J]. Arid Land Geography, 2003, 26(2): 116-121. (in Chinese))
- [12] 李九一, 李丽娟, 柳玉梅, 等. 区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系: 以京津唐地区为例[J]. 地理科学进展, 2010, 29(9): 1041-1048. (LI Jiuyi, LI Lijuan, LIU Yumei, et al. Framework for water scarcity assessment and solution at regional scales: a case study in Beijing-Tianjin-Tangshan region [J]. Progress in Geography, 2010, 29(9): 1041-1048. (in Chinese))
- [13] 郗建强, 王建生, 颜勇, 等. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利, 2011(23): 42-51. (LI Jianqiang, WANG Jiansheng, YAN Yong, et al. Current situation of water security and analysis of major problem in China[J]. China Water Resources, 2011(23): 42-51. (in Chinese))
- [14] 金菊良, 吴开亚, 李如忠, 等. 水环境风险评价的随机模拟与三角模糊数耦合模型[J]. 水利学报, 2008, 39(11): 1257-1261. (JIN Juliang, WU Kaiya, LI Ruzhong, et al. Coupling method of stochastic simulation with triangular fuzzy numbers for water environment risk assessment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(11): 1257-1261. (in Chinese))
- [15] 孙才志, 董璐, 郑德凤, 等. 中国农村水贫困风险评价、障碍因子及阻力类型分析[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 895-905. (SUN Caizhi, DONG Lu, ZHENG Defeng, et al. Rural water poverty risk evaluation, obstacle indicators and resistance paradigms in China [J]. Resources Science, 2014, 36(5): 895-905. (in Chinese))
- [16] 孙才志, 朱静. 下辽河平原浅层地下水环境风险评价及空间关联特征[J]. 地理科学进展, 2014, 33(2): 270-279. (SUN Caizhi, ZHU Jing. Environmental risk evaluation of shallow groundwater and its spatial auto-correlation in lower reach of Liaohe River Plain [J]. Progress in Geography, 2014, 33(2): 270-279. (in Chinese))
- [17] 李然然. 查干湖湿地水环境演变及生态风险评估[D]. 长春: 中国科学院研究生院东北地理与农业生态研究所, 2014.
- [18] 丁慧敏, 唐德善, 李奥典, 等. 基于突变级数的太湖流域水生态风险评价[J]. 水电能源科学, 2015(6): 39-42. (DING Huimin, TANG Deshan, LI Aodian, et al. Water ecological risk assessment of Taihu basin based on catastrophe progression[J]. Water Resources and Power, 2015(6): 39-42. (in Chinese))
- [19] 王红娜, 何江涛, 马文洁, 等. 两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例[J]. 环境科学, 2015(1): 186-193. (WANG Hongna, HE Jiangtao, MA Wenjie, et al. Comparative analysis of two different methods for risk assessment of groundwater pollution: a case study in Beijing plain [J]. Environmental Science, 2015(1): 186-193. (in Chinese))
- [20] 沈园, 谭立波, 单鹏, 等. 松花江流域沿江重点监控企业水环境潜在污染风险分析[J]. 生态学报, 2016(9): 1-8. (SHEN Yuan, TAN Libo, SHAN Peng, et al. Analysis of potential contamination risk of riverside key monitored enterprises on the aquatic environment of the Songhua River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016(9): 1-8. (in Chinese))
- [21] 刘建昌, 严岩, 刘峰, 等. 基于多因子指数集成的流域面源污染风险研究[J]. 环境科学, 2008(3): 599-606. (LIU Jianchang, YAN Feng, LIU Feng, et al. Risk assessment and a safety evaluation using system normative indexes integration method for non-point source pollution on watershed scale [J]. Environmental Science, 2008(3): 599-606. (in Chinese))
- [22] 潘丹, 应瑞瑶. 中国水资源与农业经济增长关系研究: 基于面板 VAR 模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(1): 161-166. (PAN Dan, YING Ruiyao. Relationship between water resource and agricultural economic growth in China: research based on panel VAR [J]. China Population Resources and Environment, 2012, 22(1): 161-166. (in Chinese))
- [23] 张燕, 徐建华, 曾刚. 中国区域发展潜力与资源环境承载力的空间关系分析[J]. 资源科学, 2009, 31(8): 1328-1334. (ZHANG Yan, XU Jianhua, ZENG Gang. The spatial relationship between regional development potential and resource & environment carrying capacity [J]. Resources Science, 2009, 31(8): 1328-1334. (in Chinese))
- [24] 孙才志, 陈丽新, 刘玉玉. 中国农作物绿水占用指数估算及时空差异分析[J]. 水科学进展, 2010(5): 637-643. (SUN Caizhi, CHEN Lixin, LIU Yuyu. Spatial and temporal variation of crops green water occupancy index in China [J]. Advances In Water Science, 2010(5): 637-643. (in Chinese))
- [25] 孙才志, 林学钰. 模糊划分有效性函数的构建与应用[J]. 系统工程理论与实践, 2004, 24(2): 106-110. (SUN Caizhi, LIN Xueyu. Construction and application of validity function for fuzzy division [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2004, 24(2): 106-110. (in Chinese))

(收稿日期: 2015-10-01 编辑: 方宇彤)