

陕西省水资源生态风险评价及驱动因素分析

刘引鸽, 傅志军

(宝鸡文理学院 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室 地理科学与环境工程系, 陕西 宝鸡 721013)

摘要: 利用陕西省水资源和社会经济环境资料, 结合 GIS 技术, 依据区域生态风险评价的方法理论, 采用层次分析法和综合指数法, 建立了水资源压力—状态—响应的生态风险指标体系, 分析了水资源经济和人口承载力, 并对陕西省水资源生态风险的时空演化进行了综合评价。评价结果表明, 水资源承载的经济和人口规模呈增加趋势, 水资源压力不断增大, 水资源综合风险也呈增加趋势。水资源区域风险表现为关中地区风险最大, 其次为陕北地区, 陕南地区水资源风险相对较小。水资源综合风险中, 以状态风险最大, 其次是压力风险, 响应风险相对较小。不同地区水资源综合风险大小顺序依次为: 西安地区 > 咸阳地区 > 榆林地区 > 渭南地区 > 宝鸡地区 > 延安地区 > 汉中地区 > 铜川地区 > 安康地区 > 商洛地区。水资源时空分布不均, 开发利用程度大, 经济快速发展, 水生态失衡及污染源治理和环境保护措施力度等方面不能满足遏制水生态环境恶化等自然环境本底脆弱性的要求, 经济系统不稳定性已成为陕西省水资源风险的主要驱动因素。

关键词: 水资源; 生态风险; 综合评价; 驱动因素; 陕西省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0273-06

中图分类号: X826

Ecological Risk Assessment and Driving Forces for Water Resources in Shaanxi Province

LIU Yin-ge, FU Zhi-jun

(*Geography & Environmental Engineering Department, Key Lab. of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating in Shaanxi Province, Baoji College of Arts and Science, Baoji, Shaanxi 721013, China*)

Abstract: Based on the water resource inventory and the socio-economic environmental data collected in Shaanxi Province, we developed a water ecological risk index system according to the concept of Pressure—State—Response (PSR) and the regional ecological risk assessment theory. Combined with GIS technology and the AHP and the composite index methods, we analyzed the economic and demographic carrying capacity, and assessed the temporal and spatial changes of the ecological risks of the water resources. The results show that the water resource pressure and integrated risks increased rapidly as the economy and the population grew. Overall, the state risk was the highest, pressure risk moderate, and the response risk the smallest. Central, northern and southern parts of Shaanxi Province exhibited ecological risks in a descending order from high to low, respectively; specifically, Xi'an area > Xianyang area > Yulin area > Weinan area > Baoji area > Yan'an area > Hanzhong area > Tongchuan area > Ankang area > Shangluo area. The vulnerabilities of local natural environments, such as uneven spatiotemporal distribution of water resources, fast societal development, rapid economic growth, unbalance water ecology, water environmental degradation, and unstable economic system were the main driving forces causing water resource risks in Shaanxi Province.

Keywords: water resource; ecological risk; integrated assessment; driving factor; Shaanxi Province

受全球气候变化和社会经济快速发展的影响, 水生态环境问题日趋严重, 阻碍社会经济发展, 生态风险评价成为当今国际社会以及学术界普遍关注的热

点问题^[1-6]。区域生态风险评价就是对生态系统的资源生产能力以及服务价值下降、生态环境污染和退化给社会和生产造成的短期和长期不利影响(损失)和

收稿日期: 2011-10-12

修回日期: 2012-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“西北地区生态风险综合评估及安全保障研究”(08BZZ031); 陕西省重点实验室项目“陕西省生态脆弱性及风险综合研究”(09JS072); 宝鸡文理学院重点项目“渭河中下游气候灾害生态风险评价”(ZK11159)

作者简介: 刘引鸽(1965—), 女(汉族), 陕西省兴平市人, 教授, 主要从事资源管理、气候生态方面的研究。E-mail: yingeliu@163.com。

不确定性评价^[7-9]。水资源生态风险指在特定的时空环境条件下,水资源系统中潜在的非期望事件发生概率及其干扰和污染物进入水环境之后产生的危害的可能性及程度^[10-12]。目前,国内外对水资源生态风险研究主要表现为对水环境生态风险评价程序以及单个生态风险的评价方法初步分析研究^[13-14],区域水环境中各种污染物的毒性污染指数、河口沉积物污染的潜在生态风险初步评价研究^[15],以及联合国环境规划署(UNEP)和 OECD(联合国经济合作开发署)等部门发展的反映可持续发展机理的压力—状态—响应(PSR, pressure—state—response)概念框架用于生态安全可持续发展评价研究^[16]。而采用此框架模型进行水资源生态风险评价还是空白,对水资源生态风险的综合评价研究较少。生态风险指标选择和标准因评价的目的和方法不同而异,没有统一的标准。因此,采用合适的区域风险评价方法和建立风险评价指标成为目前生态风险评价的趋势。

陕西省属于典型的大陆性季风气候,自然生态环境脆弱,年平均降水量 340~1 240 mm,年平均蒸发量 1 608 mm,降水分布极不均匀,降水变率大,旱涝灾害频繁。工业发展,人口增长,城市化进程加快,水资源的需求量不断增加,水污染严重,河流、湖泊萎缩,水资源生态风险增加,对陕西省社会经济发展构成巨大威胁。因此,本研究根据区域生态风险评价的基本理论和方法体系,通过对陕西省水资源生态风险综合评价,探讨水资源生态风险的驱动因素,为水资源可持续利用以及政府部门管理和决策提供依据。

1 数据来源及研究方法

1.1 数据来源

社会经济环境数据来源于《陕西省统计年鉴(2002—2008年)》,《陕西省环境公报(2002—2008年)》。水资源数据来源于《陕西省水资源公报(2002—2008年)》和相关调查数据。

1.2 研究方法

1.2.1 水资源综合评价指标体系 目前,生态风险评价指标和方法还处于探索与实践阶段,本研究借鉴已有的研究方法,参考 OECD 国家对 PSR 的指标^[16],建立了陕西省水资源风险评价指标体系。

水资源生态风险指标体系建立的目的在于寻求一系列具有代表意义,而且能够定量表达水资源脆弱性以及经济发展影响的特征指标。水资源生态系统本身存在着可变性、不确定性、随机性等资源属性,是一个复杂系统,涉及的风险源、暴露体和终点比较多。因此,在进行指标选择时,遵循科学性、指标的相对稳

定性、独立性、易操作性和可比性原则。从陕西省自然环境状况、社会经济环境压力以及采取的措施出发,采用层次分析法构建指标体系。通过对陕西省实际调查构建 3 个层次指标,分别为目标层,因子层和指标层。目标层为水资源综合生态风险,因子层包括自然状况(脆弱性)生态风险、水资源压力(威胁性)生态风险和响应(预防能力)生态风险,指标层选择 20 个指标(表 1)。因子层的状态风险表示自然、社会和水环境状态对人类造成的威胁性和可能发生危害的概率。压力风险表示人类活动对自然和社会环境造成的可能危害程度。响应风险表示人类采取预防生态危害性措施的力度,采取的措施力度越大,响应风险越小。

表 1 水资源生态风险评价指标体系和权重

目标层	因子层	指标层	权重
水资源生态综合风险	状态生态风险	水资源总量 $C_1/(10^8 \text{ m}^3)$	0.109 783
		年平均降水量 C_2/mm	0.110 279
		洪涝灾害发生频率 $C_3/\%$	0.076 473
		人均用水量 $C_4/(\text{m}^3/\text{人})$	0.009 375
		干旱发生率 $C_5/\%$	0.059 665
		径流量 $C_6/(\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1})$	0.059 042
		水资源开发利用程度 $C_7/\%$	0.086 276
		总人口 $C_8/\text{人}$	0.090 068
		废水排放量 $C_9/10^4 \text{ t}$	0.037 109
		水质污染率 $C_{10}/\%$	0.050 283
	压力生态风险	城市化率 $C_{11}/\%$	0.054 089
		水资源承载力 $C_{12}/(\text{元} \cdot \text{m}^{-3})$	0.058 961
		农业用水 $C_{13}/(10^8 \text{ m}^3)$	0.007 131
		工业用水 $C_{14}/(10^8 \text{ m}^3)$	0.025 267
		人均日生活用水 $C_{15}/(10^8 \text{ m}^3)$	0.011 780
		生态用水 $C_{16}/(10^8 \text{ m}^3)$	0.024 420
		废水治理投资 $C_{17}/(10^4 \text{ 元})$	0.044 037
		废水处理率 $C_{18}/\%$	0.042 472
		工业用水重复利用率 $C_{19}/\%$	0.005 421
		城市污水处理率 $C_{20}/\%$	0.008 673

1.2.2 水资源承载力指数 水资源承载力是一个度量区域社会经济发展受水资源制约的阈值,反映在一定的水资源开发利用阶段和生态环境保护目标下,一个流域的可利用的水资源量能够支撑的社会经济系统发展最大规模。通常用可利用水量与社会经济可持续发展有限目标需求水量的供需平衡退化到临界状态所对应的单位水资源量的人口规模和经济规模等指标表达^[17]。主要计算在不同的发展时期单位可利用水资源量所承受的经济规模以及人口数量规模,用于反映水资源压力状况。水资源承载力和平衡指数计算方法为:

$$C = G / W_s \quad (1)$$

$$I = 1 - \frac{W_d}{W_s} \quad (2)$$

式中: C ——水资源承载力指数,数值越大,表示水资源压力越大; G ——国民生产总值或总人口; W_s ——可用水资源量; W_d ——水资源需求量; I ——水资源平衡指数,当 $I < 0$ 时,表示区域可供水资源量不具备对这种规模的社会经济系统的支撑能力;当 $I > 0$ 时,即水资源丰富时,表示区域水资源对应的人口及经济规模是可承载的,供需状态良好。

1.2.3 综合评价方法 综合指数法是目前常用来估算生态风险大小的方法。此方法能够体现生态系统整体性、综合性和层次性。因此,选择此方法计算陕西省水资源风险。综合指数法计算公式为:

$$I_{ER} = \sum_{i=1}^n C_i \times W_i \quad (3)$$

式中: I_{ER} ——生态风险综合指数,用于表示生态风险程度,其值越大,则生态风险程度越大; n ——指标个数; W_i ——生态风险评价指标权重,表示各指标对形成生态风险的相对重要性; C_i ——各生态风险指标标准化值,采用效应函数对所有原始数据进行标准化处理。

设某区域 n 年的生态风险评价指标体系包括 n 个指标,原始指标数据矩阵为 $X = \{x_{ij}\}_{m \times n}$,效应指标标准化方法为:

对于数值越大风险越大的效应型指标:

$$C = \begin{cases} 1 & (X_{ij} \geq X_{\max}) \\ \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & (X_{\max} \geq X_{ij} \geq X_{\min}) \\ 0 & (X_{ij} \leq X_{\min}) \end{cases} \quad (4)$$

对于数值越大风险越小的效应指标:

$$C = \begin{cases} 0 & (X_{ij} \geq X_{\max}) \\ 1 - \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} & (X_{\max} \geq X_{ij} \geq X_{\min}) \\ 1 & (X_{ij} \leq X_{\min}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: X_{ij} ——指标的现状值; X_{\max} ——该项指标参考值的最大值; X_{\min} ——该项指标参考值的最小值。

1.2.4 指标权重确定 生态风险评价中,权重的确定是很重要的。权重体现了风险源对承载体的贡献率(影响度)。目前确定权重的方法可归纳为,特尔菲法(Delphi)(专家打分)、主成分分析、熵值法以及变异函数法。为了避免人为主观性,采用熵值法计算指标权重。计算方法为:

$$W_j = \frac{(1 - S_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - S_j)} \quad (6)$$

$$S_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n \frac{X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \ln \left(\frac{X_j}{\sum_{j=1}^n X_j} \right) \quad (7)$$

式中: W_j ——第 j 个指标的权重; S_j ——第 j 个指标的熵值; X_j ——标准化指标值; n ——指标个数。

2 结果分析

2.1 水资源承载能力分析评价

采用 2004—2008 年陕西省可供水量、GDP 和人口数据计算出水资源承载力和平衡指数(表 2)。由表 2 可以看出,陕西省人口在不断增加,人均水资源总量波动变化,但各年人均水资源量低于 1 000 m³/人,表现为慢性水资源短缺^[10]。而水资源经济承载力在增加,2008 年水资源经济承载力比 2004 增加了 51.45%,水资源平衡性较差,平衡指数有轻微增加。随着陕西省经济发展和人口增加,水资源压力会增大。

由表 3 可以看出,陕北水资源经济承载力最大为 1 010.12 元/m³,人均供水量最小为 24.88 m³/人,关中地区水资源经济承载力最小为 227.1 元/m³,人均供水、降水量以陕北地区最少,陕南地区最大,关中地区人均日生活用水量最大,这就使得陕北地区水资源承载力较大,压力增大,关中地区次之,陕南地区水资源压力较小。

表 2 陕西省水环境状况

年份	人均水资源量 (m ³ /人)	水资源经济 承载力/ (元·m ⁻³)	总人口/ 10 ⁴ 人	平衡 指数
2004 年	828.61	569.17	3 705	-0.69
2006 年	716.51	714.85	3 735	-0.78
2008 年	807.97	862.02	3 762	-0.72

表 3 陕西省不同区域水资源量

地区	水资源经济 承载力/ (元·m ⁻³)	人均供水 量/m ³	日生活用 水量/L	年平均降 水量/mm
关中	227.11	25.58	144.83	523.52
陕北	1 010.12	24.88	117.02	439.60
陕南	393.23	28.31	116.45	858.87

2.2 水资源生态风险趋势评价

应用 2002—2008 年自然环境、社会经济及水资源数据,采用公式(4)~(5)进行数据标准化处理,采用公式(3),(6)~(7)计算出陕西省状态、压力和响应风险指标指数(表 4),其中综合风险为状态风险与压力风险及响应风险之和。由表 4 可以看出,水资源总量、径流量、旱涝灾害等状态指标风险指数比较大,而

且呈增加趋势。水资源开发利用程度、人口、水资源承载力、污水排放、农业用水、生态用水等压力指标风险指数也比较大,而且呈增加趋势。响应风险指标较小,呈减小趋势。从陕西省水资源生态风险时间变化(图 1)可以看出,陕西省水资源综合生态风险、状态风险、压力风险呈增加趋势,而响应风险呈减少趋势,而且 2006 年以后水资源状态、压力以及综合风险增加较大,响应风险减少较多。生态风险的这种变化与陕西省水环境变化状况、经济发展以及人口增加相关。由于陕西省经济快速发展,人口不断增加,水资源开发利用程度增大,水资源承载的经济和人口规模增加,使水资源压力增大。如 2008 年陕西省水资源总量平均减少了 13.48%,而工农业用水量却增加了约 2%,这就使水资源的状态和压力风险增加。2008 年陕西省废水排放量达 1.04×10^9 t 比 2002 年增加

了 22.43%,虽然政府采取了环境污染治理措施,如 2008 年水污染处理率比 2002 年增长了 15%,水资源重复利用率也在增加,使水资源响应风险指数减小,但水资源状态和压力风险的增大占主导趋势,使陕西省水资源综合生态风险表现出增大趋势。

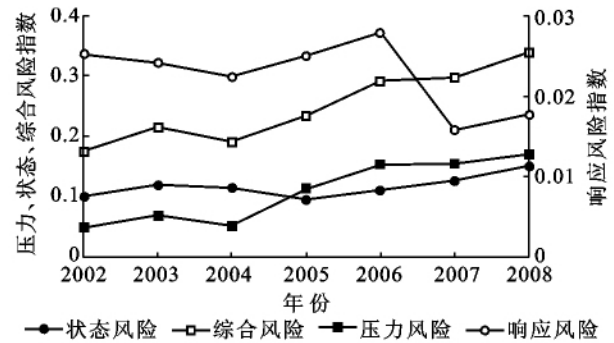


图 1 陕西省水资源生态风险的时间变化

表 4 各种指标风险指数

项目	指标	2004 年	2006 年	2008 年	指标	2004 年	2006 年	2008 年
状态风险	C ₁	0.069 311	0.000 003	0.045 855	C ₄	0.006 050	0.000 003	0.009 374
	C ₂	0.110 278	0.087 627	0.000 003	C ₅	0.000 002	0.033 010	0.059 653
	C ₃	0.000 002	0.020 240	0.092 080	C ₆	0.000 002	0.000 003	0.047 163
压力风险	C ₇	0.000 003	0.086 274	0.020 550	C ₁₂	0.027 732	0.000 003	0.088 959
	C ₈	0.000 002	0.038 744	0.089 894	C ₁₃	0.003 394	0.000 003	0.008 227
	C ₉	0.000 002	0.026 662	0.037 108	C ₁₄	0.021 266	0.000 003	0.029 817
	C ₁₀	0.050 273	0.034 250	0.000 003	C ₁₅	0.000 002	0.002 637	0.011 779
	C ₁₁	0.048 442	0.000 002	0.006 800	C ₁₆	0.000 002	0.000 003	0.024 420
响应风险	C ₁₇	0.000 002	0.044 010	0.003 774	C ₁₉	0.005 421	0.002 085	0.000 003
	C ₁₈	0.042 472	0.000 880	0.000 003	C ₂₀	0.007 339	0.008 060	0.000 003

2.3 水资源生态风险区域评价

以市区为单元计算出水资源压力、状态以及响应生态风险指数,采用 GIS 将这些指数进行叠加给出水资源综合生态风险空间分布(图 2)。由图 2 可以看出,陕西省水环境生态风险空间分布差异较大。西安地区水资源状态生态风险指数最大为 0.195 3,渭南地区最小为 0.097 6,不同地区水资源状态生态风险大小顺序为:西安地区>铜川地区>榆林地区>延安地区>商洛地区>安康地区>咸阳地区>汉中地区>宝鸡地区>渭南地区。水资源压力风险表现为西安地区最大为 0.233 8,铜川地区最小,不同地区水资源压力风险大小顺序为:西安地区>渭南地区>咸阳地区>宝鸡地区>榆林地区>延安地区>安康地区>商洛地区>铜川地区。水资源响应生态风险表现为安康地区风险最大为 0.029 6,西安地区生态风险最小为 0.004 8,不同地区水资源响应风险指数大小顺序为:安康地区>商洛地区>铜川地区>榆林地区>延安地区>汉中地区>渭南地区>宝鸡地区>西

安地区。水资源综合风险以西安地区最大为 0.433 8,商洛地区最小为 0.211 0,不同市区水资源风险综合指数大小顺序为:西安地区>咸阳地区>榆林地区>渭南地区>宝鸡地区>延安地区>汉中地区>铜川地区>安康地区>商洛地区。

根据陕西省自然地理环境特点分为陕北、关中、陕南 3 个区域,计算出水资源生态风险指数(表 5)。由表 5 可以看出,陕南地区响应生态风险最大,其次是陕北地区,关中地区较小;压力风险是关中地区最大,其次是陕北地区,陕南地区较小;陕北地区状态风险最大,其次是关中地区,陕南地区较小。综合作用结果是关中地区水资源综合风险最大,其次是陕北地区,陕南地区较小。

水资源生态风险这种空间分布与陕西省自然气候、水文环境、经济发展不平衡和水自然环境状况分布密切相关。

陕北处于经济相对不发达地区,自然环境较差,年降水量较少,平均为 439.6 mm,干旱严重,水资源

量短缺,而且人口增加较快,人均供水量最少,水资源经济承载力和人口承载力最大;关中地区经济发展,工农业用水量大,而且人口压力较大,人均用水量最大为 144.832 L/人,水资源经济承载力和人口承载力也比较大;陕南地区降水量虽然多,但山地暴雨洪灾严重,经济欠发达,水资源状态、响应风险较大;陕北、

关中、陕南 3 个区域的工业废水排放量比较大分别达 3.47×10^7 t, 3.95×10^7 t 和 5.21×10^6 t, 河流水质污染比较严重,陕北地区污水处理和重复利用率较低,关中地区次之,这些因素共同作用结果形成了关中地区水资源综合风险最大,陕北地区次之,陕南地区相对较小的空间分布。

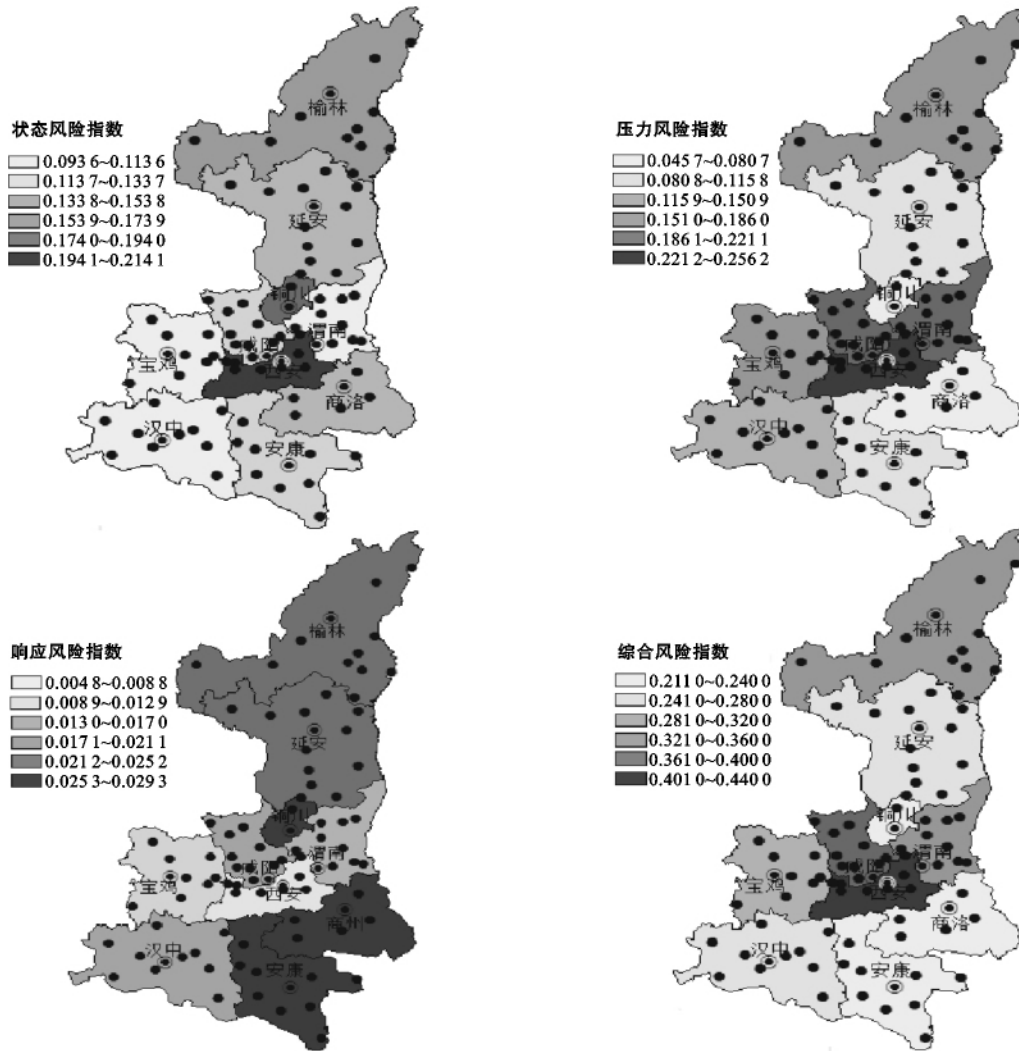


图 2 陕西省水资源生态风险指数空间分布

表 5 不同区域水资源生态风险指数

地区	状态风险	压力风险	响应风险	综合风险
陕北	0.149 771	0.110 147	0.025 274	0.285 193
关中	0.134 322	0.163 735	0.018 070	0.316 068
陕南	0.121 514	0.072 382	0.026 197	0.245 448

3 水资源生态风险驱动因素分析

水资源脆弱性可归纳为水资源的数量、质量以及净化污染物等抗干扰能力以及社会开发利用方式和污水处理能力等自然因素和社会因素。通过实际调查以及陕西省水资源状态、压力以及响应生态风险评价

分析,对陕西省水资源生态风险驱动因素进行了研究。

(1) 陕西省水资源时空分布不均,降水量和来水量少,水资源总量减少,洪涝干旱灾害严重是水资源生态风险的主要驱动因素。陕西省水资源时空分布与经济布局和要求不匹配。陕西省降水主要集中在 7—8 月,暴雨易形成洪涝灾害严重,而春冬季降水少,造成干旱严重。陕西省黄河流域面积占该省 60% 以上,耕地面积占该省 80.5%,而地表水资源仅占该省 25%,使处于黄河流域的关中经济发展地区和陕北地区存在潜在水资源压力生态风险。由于缺

水,陕西省水浇地比例较少只占 4.2%,旱地面积较大占 14.5%,再加上气候变化,湖泊、河流萎缩,人口增加加剧了水资源量短缺风险。由于人类活动加剧,植被的破坏与减少加剧了陆地蓄水量和径流量减少。以上因素构成了陕西省水资源风险的潜在自然风险源。

(2) 经济发展,水资源开发利用程度增大导致地下水水位下降,地下水危机严重,加大了陕西省水环境状态风险。陕西省许多城市地下水大量超采,造成区域地下水水位下降、地下水资源枯竭、地下水水质恶化、地面沉降、地面裂缝和地面塌陷等水环境问题。近年来地下水下降还有增加趋势。如西安市和宝鸡市由于地下水量开采逐年增加,导致地下水埋深下降。这些因素影响加大了水资源环境状态生态风险。

(3) 水生态失衡。近年来,由于气候变化,降水减少,干旱严重,地下水减少,出现不少河流断流,湖泊萎缩,湿地和水陆交错带破坏严重、功能退化、土壤沙化、森林草原退化、土地荒漠化等一系列主要由水引起的生态失衡问题,促使了水资源自然生态风险的增大。

(4) 由于陕西省经济的快速发展,废水排放量增加,广施化肥、农药、除草剂,使用塑料地膜,使地表水和地下水资源有毒、有害污染物污染严重。河流水质中的总磷、总氮、化学需氧量和高锰酸盐指数等超标,水质变坏,水环境遭到破坏成为陕西省水资源压力生态风险的另一主要驱动因素。

(5) 污染源治理和环境保护措施的实施力度不能满足遏制生态污染和退化的要求。虽然政府部门已经采取一系列措施,加大污水处理、水资源重复利用、重点污染源治理项目、环境保护措施和资金投入,但人类社会活动和经济发展对水资源产生的生态风险依然严重。

总之,陕西省水资源自然生态基础本底脆弱性和社会经济系统不稳定性成为水资源风险的主要驱动因素。

4 结论

陕西省水资源生态风险有增大趋势,而且关中地区水资源综合风险最大,陕北地区次之,陕南地区相对较小。陕北地区以水资源状态以及响应生态风险比较大,关中地区以水资源压力风险较大,响应风险较小,陕南地区以响应风险最大。水资源量短缺,降水时空分布不均,降水变率大,旱涝灾害等自然资源的脆弱性,以及社会经济发展,水资源开发利用程度增大,水污染严重致使水环境恶化等因素成为陕西省

水资源生态风险的主要驱动原因。因此,加强水资源管理,节约用水,合理利用资源是减缓水资源生态风险的主要途径。

[参 考 文 献]

- [1] 唐国平,李秀彬,刘燕华. 全球气候变化下水资源脆弱性及其评估方法[J]. 地球科学进展,2000,15(3):313-317.
- [2] Jason R E, Shepard, Cirino N M, et al. Water Suppliers [M]. UK: Handbook of Biosurveillance, 2006:143-159.
- [3] Zandbergen P A. Urbab watershed ecological risk assessment using GIS: A case study of Brunette River watershed in British Columbia, Canada[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998,61(1/3):163-173
- [4] 刘引鸽. 基于土地利用的陕西省生态风险分析[J]. 水土保持通报,2011,31(3):180-184.
- [5] Liu Yinge, Wen Yanjun. Assessment of the water environment and ecology status in Shaanxi section of Weihe River basin[C]// 2011 International Conference on Ecological Protection of Lakes-wetlands Watershed and Application of 3S Technology Workshop. International Industrial Electronics Publisher(Center), 2011.
- [6] 林联盛,刘木生,何文莉,等. 潘阳湖水生态安全检测现状与分析[J]. 水土保持通报,2011,31(3):99-102.
- [7] Kaman C C, Reerink H G. Dynamic assessment of the ecological risk of the discharge of produced water from oil and gas producing platforms[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998,61(1/3):43-51.
- [8] 付在毅,许学工. 区域生态风险评估[J]. 地球科学进展,2001,16(2):267-271.
- [9] 蒙吉军,赵春红. 区域生态风险评估指标体系[J]. 应用生态学报,2009,20(4):983-990.
- [10] 贾绍凤,张军岩,张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系[J]. 地理科学进展,2002,21(6):538-545.
- [11] 殷浩文. 水环境生态风险评估程序[J]. 上海环境科学,1995,14(11):11-14.
- [12] 左其亭,吴泽宁,赵伟. 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.
- [13] 罗军刚,解建仓,阮本清. 基于熵权的水资源短缺风险模糊综合评价模型及应用[J]. 水利学报,2008,39(9):1092-1097.
- [14] 孙立强,田卫,俞穆清,等. 石头口门水库饮用水源地生态风险评估[J]. 水土保持通报 2011,31(1):211-214.
- [15] 马德毅,王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评估[J]. 中国环境科学,2003,23(5):521-525.
- [16] 王韩民,郭玮,程漱兰,等. 国家生态安全:概念、评价及对策[J]. 管理世界,2001(2):149-151.
- [17] 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.