

An Assessment of Water Resources Shortage Risk in Beijing Based on PSR Framework*

Qiang Liao^{1,2}, Shifeng Zhang¹, Junxu Chen^{1,2}

¹Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: leostrong69@gmail.com

Received: Mar. 27th, 2013; revised: Apr. 21st, 2013; accepted: May 2nd, 2013

Copyright © 2013 Qiang Liao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Water resources shortage risk index system based on the “Pressure-State-Response” (PSR) framework is established and applied to assess water resources shortage risk level during 1986-2011 in Beijing city with the assistance of principal component analysis method. The research shows that Beijing has experienced a ten-year low flow period with high integrated value of risk since 1999; however, such situation became alleviative since 2008. Utilization ratio of water resources and urban sewage treatment capacity are considered to be two of 14 indicators which have greater impact on water shortage risk. Even though the water resources risk in Beijing reduced a little in these recent years, Beijing still faces risks of water shortages in the future as the population increased. Curb of population growth, rational use of various kinds of water and upgrade of industrial structure are effective ways to alleviate water shortage risk.

Keywords: Beijing City; Water Resources Shortage Risk; PSR Framework; Principal Component Analysis

基于 PSR 模型的北京市水资源短缺风险评价*

廖强^{1,2}, 张士锋¹, 陈俊旭^{1,2}

¹中国科学院地理科学与资源研究所, 北京

²中国科学院大学, 北京

Email: leostrong69@gmail.com

收稿日期: 2013 年 3 月 27 日; 修回日期: 2013 年 4 月 21 日; 录用日期: 2013 年 5 月 2 日

摘要: 本文将“压力-状态-响应”(PSR)框架模型引入到水资源短缺风险评价指标体系中, 采用主成分分析方法对评价指标进行赋权, 对北京市 1986~2011 年年度水资源短缺风险水平进行了评价。结果表明, 近年来北京综合风险值一直处于较高水平, 1999 年~2008 年尤为严重, 从 2008 年起得到一定的缓和。水资源利用率与污水处理能力这两项指标对水资源风险的产生有较大的影响。随着人口增长, 未来北京仍然面临较高水资源短缺的风险。控制人口过度增长, 合理使用各种水源, 加快产业结构优化升级是缓解水资源短缺风险的有效途径。

关键词: 北京市; 水资源短缺风险; PSR 框架模型; 主成分分析法

*基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41171032); 国家重点基础研究发展计划(编号: 2012CB955304)。
作者简介: 廖强, 男, 广东梅州市人, 硕士生, 主要研究方向为水资源风险评价。

1. 引言

水资源短缺是描述水资源需求量与可利用量之间矛盾的概念。当前水资源短缺问题日益尖锐, 水资源危机已经成为全球性的问题^[1-4]。

北京市人均水资源占有量不足 200 m³, 仅为全国人均的 1/10, 世界人均的 1/40, 属重度缺水地区。自上世纪 50 年代以来, 北京市发生多次严重的水危机。1999 年以来连续多年干旱, 降雨量长年在 500 mm 以下。北京市水资源短缺已经成为影响和制约社会和经济发展的的重要因素。随着人口增长、经济发展和城市化进程, 区域用水需求仍将旺盛。上游地区用水量增加导致北京入境水量的减少, 以及流域的下垫面的变化显著减少了产流量, 北京水资源面临严重短缺风险。因此, 建立科学的评价体系, 客观评价水资源短缺风险水平, 对有效规避风险及其危害, 改进相关水资源规划、区域发展规划等政策和决策, 促进可持续发展具有十分重要的意义。

国外鲜见对水资源各类评价建立专门的评价指标体系。其评价指标体系里面虽然设计了有关水资源评价的内容, 但是指标数量较少, 并且都是比较宏观的评价指标。比较有代表性的有 Hashimoto 在 1982 年提出可靠性、恢复性和易损性 3 个指标, 分别作为描述水资源系统的风险指标。随后在可靠性的基础上衍生了风险率, 在恢复性的基础上又发展了稳定性等指标^[5]。

中国关于水资源各类评价指标体系的研究始于上世纪 90 年代末, 水利部水利水电规划研究院第一次运用水资源开发利用综合评价指标体系对全国水资源状况及其开发利用进行分析^[6]。此后, 贾绍凤等(2002)在区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系中, 从水资源总体安全、社会安全、经济安全、生态安全四个方面, 选取了 22 个评价指标建立了水资源安全评价指标体系^[7]。韩宇平等(2003)在对水安全概念充分理解的基础上, 选取 5 个方面共 22 类指标构建了一个具有层次结构的区域水安全评价的指标体系, 并利用半结构化的决策理论与模糊优选方法对区域水资源持续利用方案进行评价^[8,9]。李九一等(2010)构建了由水资源供给保障率、水资源保障可靠性、水资源利用率和水资源利用效率 4 项指标构成的区域尺度水资源短缺风险评估与决策体系, 并在京津

唐地区进行了实例研究^[10]。张士锋等(2010)在综合考虑系统属性、风险过程后, 基于致险、承险因子及损害程度构建了由 4 层次共 20 个指标构成的水资源系统风险的评价指标体系及模型, 评价了北京市面临的水资源系统风险^[11]。高媛媛等(2012)从水资源自身条件、水资源社会安全、水资源经济安全、水资源生态安全 4 个评价角度, 构建了 9 个指标的评价体系, 对泉州市的水资源安全进行了评价^[12]。

目前为止, 国内学者建立了不少评价指标体系, 无论是采用综合指标还是分类指标都没有形成成熟统一的评价方法。这些指标体系虽然力求涵盖了自然、社会经济、生态的各个方面, 但是指标之间缺乏较严密的逻辑关系, 指标的选取有较大的随意性。而且, 在确定评价指标权重时, 多采用主观确定权重的方法, 如层次分析法(AHP)等^[12-15]。其优点是思路简单、层次清晰, 但很可能由于人的主观因素而形成偏差。

因此, 本文尝试用“压力-状态-响应”(PSR)框架构建水资源短缺风险评价指标体系, 采用主成分分析法对各个指标权重赋值, 对北京市 1986~2011 年共计 26 年的水资源短缺风险水平进行测算比较, 并基于关乎水资源短缺的 14 个指标的权重情况, 探讨影响水资源短缺的主要因素。本文数据来源于《北京市统计年鉴 2012》、历年的《北京市水资源公报》。

2. 模型的构建与计算

2.1. 评价指标体系构建

“压力-状态-响应”(PSR)框架最早由经济合作组织(OECD)提出并应用于世界环境状况研究, 其基本理念是将人类活动给自然环境造成的压力(Pressure), 环境质量和资源数量状态(State), 以及社会经济和环境等方面的因应政策和管理措施响应(Response)作为一个整体系统进行考虑, 探讨影响人地系统协调稳定因素及其作用下的结果。PSR 模型提出后, 被推广应用到有关生态安全评价和资源可持续利用的广泛研究领域^[16,17]。

PSR 框架模型能够较好地反映水资源短缺风险的内涵。首先人口增长、经济发展和自然环境变化等导致了生活、生产和生态各个方面的用水“压力”。“压力”越大, 水资源短缺风险就越高, 主要表现为水量的短缺和水质的恶化两个“状态”。为缓解水资源危

机, 管理者需要应用工程技术和手段进行“响应”, 一方面提高用水效率, 一方面提高污水处理能力, 从而使水资源短缺风险降低。可见, 基于 PSR 框架模型的评价指标体系有助于从影响水资源短缺的各个因素之间的相互作用和关系出发, 更有效地制定相关对策。

本文依据 PSR 框架模型, 遵循科学性和简便性的原则^[7], 综合考虑北京市水资源状况的特点, 从压力、状态、响应 3 个方面选取能够切实反映北京市水资源短缺状况的指标。所构建的指标体系可归纳为: 1) 目标层: 以水资源短缺风险评价作为总目标; 2) 准则层: 包括社会压力、水资源状态和承险响应三个方面; 3) 子准则层: 包括生活、生产、生态、水量、水质、工程技术、政策管理 7 个具体层面; 4) 指标层: 由可直接度量的具体指标构成。由于不同指标对水资源短缺风险起到促进或抑制作用, 因此将指标分为正向和反向两类。正向指标可增加水资源短缺风险, 反向指标可降低水资源短缺风险。具体指标及所代表的涵义见表 1 所示。

2.2. 指标数据标准化

消除不同指标间的量纲差异, 本文采用标准差标

准化法对指标进行标准化处理, 其计算公式为:

$$P_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\sigma_j} \text{ 或 } P_{ij} = \frac{\bar{x}_j - x_{ij}}{\sigma_j} \quad (1)$$

式中: x_{ij} 和 P_{ij} 分别表示第 i 个年份和第 j 个指标原值及其标准化后的数值; \bar{x}_j 表示第 j 个指标的平均值; σ_j 表示第 j 个指标的样本标准差。当 x_{ij} 为正向指标时, 采用第一个公式; 当 x_{ij} 为负向指标时, 采用第二个公式。经标准化后的数据消除了量纲的影响。

2.3. 主成分分析方法赋权

主成分分析是把原来多个变量划分为少数几个综合指标的一种统计分析方法, 这几个综合指标既能尽量多地反映原来较多变量指标所反映的信息, 同时他们之间又是彼此独立的, 是一种降维处理方法。其基本思想是将实测的多个指标, 用少数几个潜在的相互独立的主成分指标的线性组合来表示, 构成的线性组合可以反映原多个实测指标的主要信息^[19-21]。

本文以北京市的 26 年序列为样本, 以各项指标的标准化数据为变量构建矩阵, 采用 SPSS16.0 统计分析软件进行数据处理, 得出数据的特征根和响应的方差贡献率, 选择主成分并得到因子提取结果和因子

Table 1. Evaluation indices system of water resources shortage risk
表 1. 水资源短缺风险评价指标体系

准则层	子准则层	指标层	指标性质	指标涵义
社会压力	生活	居民生活用水量 (x_1)	正向	居民生活用水量包括城镇生活用水和农村生活用水
		城镇生活污水排放量 (x_2)	正向	指城镇居民每年排放的生活污水, 用人均系数法测算
	生产	万元 GDP 用水量 (x_3)	正向	指区域内每形成一万元国内生产总值(GDP)所用的平均水量
		工业废水排放量 (x_4)	正向	指经过企业厂区所有排放口排到企业外部的工业废水量
水资源状态	生态	地下水水位下降深度 (x_5)	正向	指当年年末地下水位与上年年末比较下降深度
		城市绿化覆盖率 (x_6)	反向	指当年年末区域内绿化覆盖面积与区域面积的比率
	水量	水资源利用率 (x_7)	正向	指地表水和地下水总供水量占总水资源量的比值 ^[18]
		人均水资源量 (x_8)	反向	水资源总量与常住人口的比值
承险响应	水质	地表水水质达标率 (x_9)	反向	达到三类水水质及以上的水体河长占地表水水质监测总河长的比例
		地下水水质达标率 (x_{10})	反向	达到三类水水质及以上的监测井数量占所有监测井数量的比例
	工程技术	污水管网长度 (x_{11})	反向	指所有排水总管、干管、支管、检查井及连接井进出口等长度之和
		污水处理能力 (x_{12})	反向	指污水处理厂(或处理装置)每昼夜处理污水量的设计能力
政策管理	第三产业比重 (x_{13})	反向	指第三产业国内生产总值(GDP)占区域内 GDP 的比重	
	万元 GDP 用水量下降率 (x_{14})	反向	指当年万元地区生产总值水耗与去年相比下降的比例	

回归系数。因为主成分是原始变量的线性组合, 因此包含了绝大部分原始变量的信息, 所以可以根据因子回归系数计算出每个样本年份的各个因子权重。公式如下:

$$W_j' = \sum_{q=1}^m |g_q \alpha_{qj}| \quad (2)$$

式中: W_j' 为第 j 个指标未进行归一化处理时的权重; g_q 为第 q 个主成分对总体方差的贡献率; α_{qj} 为第 j 个指标在第 q 个主成分中的系数; m 为主成分的个数。本文按照累计贡献率达到 85% 选取主成分的个数。归一化处理后即可得到各个评价因子的权重 W_j 。

2.4. 综合风险值计算

分别计算各个年份的初始综合得分, 公式如下:

$$A_i = \sum_{j=1}^n W_j P_{ij} \quad (3)$$

式中: A_i 表示第 i 个年份的初始综合得分; n 为评价指标的个数。为了更加直观地显示各年份风险水平的差异, 本文将初始综合得分转换成百分制, 公式如下:

$$F_i = \frac{A_i}{A_{\max} - A_{\min}} \times 40 + 60 \quad (4)$$

式中: F_i 表示第 i 个年份的综合风险值; A_{\max} 和 A_{\min} 分别表示初始综合得分的最大值和最小值。

3. 北京市水资源短缺风险评价结果

3.1. 根据方差累计贡献率选择主成分

以北京市 26 年的统计数据为样本, 采用 SPSS 软件进行数据处理。本次 KMO 值为 0.742, 大于 0.7, Bartlett's 球形检验的 P 值检验 $\text{Sig} < 0.5$, 因此该数据适合做因子分析。

根据计算结果, 得出矩阵的特征根和相应的方差贡献率, 如表 2 所示。

3.2. 因子回归与权重计算

按照特征根大于 1 的原则, 可以选取前 3 个特征根为主成分, 累计方差贡献率为 86.552%, 表明三个主成分即可以反映 14 个原始指标的 86.552% 的信息。

考察得到的因子提取结果, 由于其还不能明显的反映主成分所包含的指标信息, 所以将其进行正交方

Table 2. Total variance decomposition
表 2. 总方差分解

排序	特征根	方差贡献率%	累计方差贡献率%
1	8.731	62.366	62.366
2	2.099	14.994	77.360
3	1.287	9.192	86.552
4	0.940	6.717	93.268
5	0.342	2.442	95.710
6	0.273	1.950	97.660
7	0.151	1.080	98.740
8	0.078	0.558	99.298
9	0.043	0.306	99.604
10	0.025	0.180	99.784
11	0.019	0.136	99.920
12	0.006	0.040	99.960
13	0.004	0.027	99.987
14	0.002	0.013	100

差最大旋转, 得到旋转后的因子提取结果和因子回归系数, 并通过公式(2)计算各个评价指标的权重, 结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出, 第一主成分对居民生活用水量(X_1)、城市绿化覆盖率(X_6)、地下水水质达标率(X_{10})、污水管网长度(X_{11})、污水处理能力(X_{12})、第三产业比重(X_{13})等指标有绝对值较大的负荷数, 这些指标主要反映了生活生态用水的集约利用程度; 第二主成分对地下水水位下降深度(X_5)、水资源利用率(X_7)有绝对值较大的负荷数, 这些指标主要反映了水资源(尤其是地下水资源)的利用程度; 第三主成分对万元 GDP 用水量下降率(X_{14})有较大的负荷数, 主要反映了水资源利用的经济产出水平。

3.3. 求各年份的综合风险值

根据因子回归系数计算出每个样本年份的各个主成分因子得分, 然后以每个主成分的方差贡献率为权重, 得到各个年份的初始综合得分, 并将结果进行百分制处理, 得到北京市每个年份的水资源短缺综合风险值。综合风险值越高, 表明当年的水资源短缺风险越严峻。计算结果如表 4 所示。

Table 3. Rotated component matrix and component score coefficient matrix
表 3. 旋转后因子载荷矩阵与因子得分系数矩阵

评价指标	因子提取结果			因子回归系数			权重
	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第一主成分	第二主成分	第三主成分	
X ₁	-0.955	0.137	-0.064	-0.136	-0.043	0.035	0.072
X ₂	-0.871	0.297	-0.193	-0.094	0.033	-0.066	0.053
X ₃	0.848	-0.179	0.391	0.086	0.022	0.223	0.059
X ₄	-0.015	0.264	-0.529	0.070	0.101	-0.396	0.072
X ₅	-0.274	0.908	0.107	0.043	0.373	0.129	0.072
X ₆	0.967	-0.168	0.133	0.128	0.033	0.016	0.065
X ₇	0.012	0.959	-0.163	0.118	0.419	-0.101	0.110
X ₈	-0.627	0.736	-0.011	-0.023	0.257	0.064	0.044
X ₉	-0.719	0.354	-0.343	-0.050	0.070	-0.192	0.045
X ₁₀	-0.920	0.166	-0.016	-0.131	-0.025	0.070	0.070
X ₁₁	0.963	-0.03	-0.070	0.160	0.088	-0.136	0.095
X ₁₂	0.963	0.010	-0.190	0.174	0.102	-0.227	0.110
X ₁₃	0.948	-0.185	0.162	0.121	0.024	0.039	0.063
X ₁₄	0.127	0.244	0.841	-0.024	0.143	0.639	0.072

Table 4. Evaluation of water resources shortage risk in Beijing during 1986-2011
表 4. 北京市 1986~2011 年水资源短缺风险评价结果

年份	社会压力	水资源状态	承险响应	综合风险值	排名
1986	67.37	49.90	80.16	72.18	4
1987	50.38	36.57	68.11	47.37	25
1988	49.25	41.04	81.67	60.51	12
1989	59.25	69.46	54.48	61.52	10
1990	44.98	45.03	71.09	53.12	19
1991	46.73	40.95	70.53	50.70	21
1992	63.72	65.87	57.01	62.92	8
1993	68.20	70.93	58.88	69.44	7
1994	39.93	64.91	50.52	47.88	24
1995	59.86	60.77	44.52	48.26	23
1996	39.55	44.47	61.27	42.89	26
1997	61.77	71.23	51.61	61.40	11
1998	57.63	60.23	46.80	48.83	22
1999	79.55	76.57	65.66	82.89	1
2000	66.20	70.93	67.67	75.58	3
2001	72.42	65.69	74.18	79.73	2
2002	72.78	62.30	65.01	70.44	6
2003	59.88	59.04	76.05	71.96	5
2004	58.38	59.28	63.40	61.57	9
2005	47.94	49.35	66.60	53.55	18
2006	64.06	49.68	64.69	58.56	14
2007	52.79	68.54	49.84	54.74	17
2008	64.31	67.16	42.38	52.48	20
2009	70.27	72.85	44.45	60.14	13
2010	72.10	69.20	41.67	56.29	15
2011	70.70	68.06	41.75	55.07	16

4. 评价结果分析

在所有的正向指标中, 权重最大的是水资源利用率, 达到了 0.11, 说明该指标对水资源风险有很高的“贡献”。总体上看, 北京地区有限的水资源已经得到充分利用。北京市 1986~2011 年的多年平均总供水量为 38.9 亿 m^3 , 多年平均水资源总量为 27.3 亿 m^3 , 多年平均水资源利用率达到了 158%。其中, 水资源利用率最低的年份为 1987 年, 该年为丰水年, 当年降雨量为 663 mm, 总供水量为 30.95 亿 m^3 , 水资源总量为 38.66 亿 m^3 , 水资源利用率为 80%; 水资源利用率最高的年份为 1999 年, 该年为极端枯水年, 当年降雨量仅为 385 mm, 总供水量为 41.71 亿 m^3 , 水资源总量为 14.22 亿 m^3 , 水资源利用率高达惊人的 293%。需要说明的是, 水资源总量一般统计的是本地水资源量, 不包括过境水资源量和再生水利用, 所以在华北缺水地区, 总供水量往往超过本地水资源总量。尽管如此, 北京市近年来的水资源利用率一直处于如此高的水平, 应引起足够的重视。根据对用水紧张程度的分类^[14], 认为水资源利用率超过 40% 时属于用水高度紧张的地区, 区域内将出现严重的水荒。从前文分析可以看出, 北京市的水资源利用率已经大大超过了 40%, 说明水资源利用程度已经达到了高度紧张的阶段, 水资源短缺风险已经很高。

在所有反向指标中, 权重最大的是污水处理能力, 为 0.11, 说明污水处理能力的提高能够较大幅度地降低水资源风险。26 年来, 北京市的污水处理建设取得了非常大的发展, 日污水处理能力从 1986 年的 26 万 m^3 增长到 2011 年的 369 万 m^3 , 尤其是 2002 年之后迅速增长。这主要是由于北京市政府为了落实“十五”规划和履行 2008 年北京奥运会环保承诺, 加快了城市污水处理厂的新建和改扩建的进度, 从而加大了污水处理的力度。2012 年, 北京市水务部门进一步加快城区污水处理厂升级改造, 清河再生水厂扩建工程, 北小河、吴家村再生水厂二期工程完工并投入运行, 新增生产能力 23 万 m^3 /日; 开工建设丰台河西再生水厂; 推进高碑店、小红门和酒仙桥污水处理厂升级改造工程建设; 新建改造污水管网 20 km。可见, 为了解决水的问题, 北京在处理污水和再生水利用方面走在了全国前面。

从北京市近 26 年来水资源短缺风险评价结果来

看(表 4), 综合风险值最高的年份是 1999 年。当年的降雨量为 385 mm, 仅仅是多年平均降雨量的 65.8%。总供水量为 41.71 亿 m^3 , 水资源总量为 14.22 亿 m^3 , 人均水资源量仅为 113.1 万 m^3 , 1999 年年末与上年年末的地下水水位相比下降了 2.33 m, 为历年来最高值。此后一直到 2004 年, 综合风险值依然很高, 六年间的综合风险值均排在前十位。一直到 2008 年, 这一状况才稍微缓和。当年的降雨量为 639 mm, 为近 1999 年以来的最高值。

根据《北京市水资源综合规划》^[22], 到 2020 年, 即使考虑采取一定节水措施后, 北京市的用水需求仍将达到 51 亿 m^3 (平水年)。而现状供水条件下, 2020 年水平年地表水和地下水可供水量仅为 35 亿 m^3 (平水年), 缺水 16 亿 m^3 , 枯水年缺口更大。虽然 2014 年南水北调水进京后, 在一定程度上将大大缓解水资源紧张局面, 但是从长远来看, 随着北京市人口的持续增加、经济的发展和国际化大都市的建设, 有限的水资源供给与用水需求的不断增长仍将是北京市长期面临的问题。

5. 结论与建议

本文用“压力-状态-响应”(PSR)框架模型构建水资源短缺风险评价指标体系, 采用主成分分析法对各个指标进行权重赋值, 测算北京市 1986~2011 年年度水资源短缺风险, 基于 14 个水资源短缺风险影响因子的探讨辨识了主要的影响因素。结果表明, 北京综合风险值一直处于较高水平, 1999 年~2008 年尤为严重, 从 2008 年起得到一定的缓和; 水资源利用率与污水处理能力这两项指标对水资源风险的产生有较大的影响, 北京水资源利用率高度紧张导致风险增大, 虽近年来北京的污水处理能力较快发展一定程度上消减了这一趋势。但是随着人口增长, 未来北京仍然面临较高水资源短缺的风险。

建议: 1) 控制北京人口的过度增长。近年来, 北京市农业用水量和工业用水量逐年减少, 生态环境用水量虽然有增加, 但是增加幅度不大。生活用水量无论是绝对值和相对量, 都在明显上升, 为各种用水类型的第一位。在人均生活用水量维持现状的条件下, 控制人口数量, 使总用水量维持在相对稳定的水平。

2) 合理使用各种水源。北京是一个多水源结构的

城市。2014 年南水北调水进京后, 从水资源可持续利用和水环境改善来考虑, 首先应尽可能利用再生利用水满足生态环境需水, 改善河道水环境; 充分利用南水北调水和适当利用水库蓄水满足生产生活用水; 尽量减少地下水开采, 并通过人工和自然回灌, 促进地下水储量的恢复。

3) 加快产业结构优化升级。20 世纪 90 年代以来, 北京市限制高耗水产业的发展, 不断提高三次产业结构水平和优化制造业内部结构, 城市生产用水量大幅度减少, 水资源利用效率不断提高, 实现了城市用水总量负增长, 近几年相对稳定在了较低的水平上^[23,24]。北京市产业结构与城市用水的变化过程表明, 产业结构优化升级与降低城市生产用水量密切相关, 对保障快速城市化背景下的城市生活用水需求增长至关重要。加大产业结构调整力度, 控制生产用水量至零增长或负增长, 是水资源短缺城市实现水资源可持续利用的有效途径。

参考文献 (References)

[1] JIANG, Y. China's water scarcity. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(11): 3185-3196.

[2] Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. *Human Development Report*, New York: Palgrave Macmillan, 2006.

[3] VAIRAVAMOORTHY, K., GORANTIWAR, S. D. and PATHIRANA, A. Managing urban water supplies in developing countries—Climate change and water scarcity scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2008, 33(5): 330-339.

[4] MURRAY, S. J., FOSTER, P. N. and PRENTICE, I. C. Future global water resources with respect to climate change and water withdrawals as estimated by a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology*, 2012, 448-449: 14-29.

[5] HASHIMOTO, T., STEDINGER, J. R. and LOUCKS, D. P. Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 1982, 18(1):14-20.

[6] 黄初龙, 章新光, 杨建峰. 中国水资源可持续利用评价指标体系研究进展[J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 33-40.
HUANG Chulong, ZHANG Guanxin and YANG Jianfeng. Indicators system for sustainability assessment of water resources use in China. *Resources Science*, 2006, 28(2): 33-40. (in Chinese)

[7] 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.
JIA Shaofeng, ZHANG Junyan and ZHANG Shifeng. Regional water resources stress and water resources security appraisal indicators. *Progress in Geography*, 2002, 21(6): 538-545. (in Chinese)

[8] 韩宇平, 阮本清. 区域水安全评价指标体系初步研究[J]. *环境科学学报*, 2003, 23(2): 267-272.
HAN Yuping, RUAN Benqing. Research on evaluation index system of water safety. *Acta scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(2): 267-272. (in Chinese)

[9] 韩宇平, 阮本清. 多层次多目标模糊优选模型在水安全评价

中的应用[J]. *资源科学*, 2003, 25(4): 37-33.
HAN Yuping, RUAN Benqing. Multi-objective and multilevel fuzzy optimization model and its application in water security evaluation. *Resources Research*, 2003, 25(4): 37-33. (in Chinese)

[10] 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. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1041-1048. (in Chinese)

[11] 张士锋, 陈俊旭, 华东, 等. 水资源系统风险构成及其评价——以北京市为例[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1855-1860.
ZHANG Shifeng, CHEN Junxu, HUA Dong, et al. Research on the assessment of water resources system risk—A case study of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1855-1860. (in Chinese)

[12] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 等. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 204-214.
GAO Yuanyuan, WANG Hongrui, XU Xinyi, et al. Assessment of water resources security—Case of Quanzhou City in Fujian Province. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(2): 204-214. (in Chinese)

[13] 杨丽英, 许新宜, 贾香香. 水资源效率评价指标体系探讨[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 45(5-6): 634-646.
Yang Liying, XU Xinyi and JIA Xiangxiang. Water use efficiency evaluating index system. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2009, 45(5-6): 634-646. (in Chinese)

[14] 高媛媛, 许新宜, 王红瑞, 等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(3): 776-784.
GAO Yuanyuan, XU Xinyi, WANG Hongrui, et al. New model for water use efficiency evaluation of China and its application. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2013, 33(3): 776-784. (in Chinese)

[15] 洛正清, 杨善林. 层次分析法中几种标度的比较[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(9): 51-60.
LUO Zhengqing, YANG Shanlin. Comparative study on several scales in AHP. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(9): 51-60. (in Chinese)

[16] WALZ, R. Development of environmental indicator systems: Experiences from Germany. *Environmental Management*, 2000, 25(6): 613-623.

[17] HUANG, H. F., KUO, J. and LO, S.-L. Review of PSR framework and development of a DPSIR model to assess greenhouse effect in Taiwan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1-4): 623-635.

[18] 左其亭. 净水资源利用率的计算及阈值的讨论[J]. *水力学报*, 2011, 42(11): 1372-1379.
ZUO Qiting. Discussion on the calculation method and threshold of the net-utilization ratio of the water resources. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(11): 1372-1379. (in Chinese)

[19] WESTRA, S., BROWN, C., LALL, U., et al. Modeling multi-variable hydrological series: Principal component analysis or independent component analysis. *Water Resources Research*, 2007, 43(6): W06429.

[20] 凌子燕, 刘锐. 基于主成分分析的广东省区域水资源紧缺风险评价[J]. *资源科学*, 2010, 32(12): 2324-2328.
LING Ziyang, LIU Rui. Risk assessment on regional water scarcity in Guangdong Province based on principal component analysis. *Resources Science*, 2010, 32(12): 2324-2328. (in Chinese)

[21] 孙刘平, 钱吴永. 基于主成分分析法的综合评价方法的改进[J]. *数学的实践与认识*, 2009, 18(3): 256-264.
SUN Liuping, QIAN Wuyong. An improved method based on principal component analysis for the comprehensive evaluation. *Mathematics in Practice and Theory*, 2009, 18(3): 256-264. (in

- Chinese)
- [22] 北京市发展和改革委员会. 北京市水资源综合规划专题[M]. 北京: 北京市水务局, 2005.
Beijing Development and Reform Committee. Integrated water resources planning project of Beijing. Beijing: Beijing Water-Affair Authority, 2005. (in Chinese)
- [23] 张晓军, 侯汉坡, 吴雁军. 基于水资源利用的北京市第三产业结构优化研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2010, 9(1): 20-24.
ZHANG Xiaojun, HOU Hanpo and WU Yanjun. Study on optimization of Beijing tertiary industrial structure based on water resources utilization. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2010, 9(1): 20-24. (in Chinese)
- [24] 吴佩林, 谈明洪. 产业结构升级与城市水资源可持续利用——以北京市为例[J]. 资源开发与市场, 2009, 25(3): 1102-1105.
WU Peilin, TAN Minghong. Industrial structure upgrade and sustainable urban water consumption—A case study in Beijing city. Resource Development and Market, 2009, 25(3): 1102-1105. (in Chinese)