

综合研究

基于 MIV-BP 型的喀斯特地区 水资源安全影响因素分析

刘丽颖^{1,2}, 官冬杰³, 杨清伟¹, 苏维词^{4,5}

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆工商大学 数学与统计学院, 重庆 400067; 3. 重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 4. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 400047; 5. 贵州科学院 山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 分析喀斯特地区水资源安全的影响因素及其影响趋势, 提出促进喀斯特地区水资源安全的措施与建议。[方法] 采用贵州省近 10 a 的数据, 建立 BP 型网络模型计算平均影响值 (mean impact value, MIV), 对其影响因素进行实证分析。[结果] 地下水供水比例、工业用水率、水资源利用率、人均粮食产量以及产水模数是水资源安全的阻碍因素。其中产水模数的影响程度呈现波动中逐年递减趋势, 其余 4 个阻碍因素影响程度均显示逐年增强; 工业固废综合利用率、工业废水排放达标率、中度以上石漠化面积比、单位 GDP 需水量以及地下水开发利用程度共同构成了水资源安全的驱动因素。从时间顺序来看, 单位 GDP 需水量和地下水开发利用程度的影响趋于稳定, 中度以上石漠化面积比因子对水资源安全影响越来越显著。工业废水排放达标率的影响逐年减弱, 而工业固废综合利用率的影响情况波动比较大。[结论] 模型计算表明, MIV-BP 模型在喀斯特地区水资源安全影响因素研究方面具有一定的现实可行性。

关键词: 喀斯特地区; 水资源安全; MIV; BP 神经网络; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)05-0128-07

中图分类号: P933

文献参数: 刘丽颖, 官冬杰, 杨清伟, 等. [J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 128-134. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.022; Liu Liying, Guan Dongjie, Yang Qingwei, et al. Influence factors of water resource security in Karst area based on MIV-BP model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(5): 128-134. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.05.022

Influence Factors of Water Resource Security in Karst Area Based on MIV-BP Model

LIU Liying^{1,2}, GUAN Dongjie³, YANG Qingwei¹, SU Weici^{4,5}

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. College of Mathematics and Statistics, Chongqing Technology and Business

University, Chongqing 400067, China; 3. College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 4. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 5. Institute of Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] This paper illustrated the influencing factors of water resource security and its evolution trend aimed to put forward some suggestions about the water resource security in Karst area. [Methods] Based on the data of Guizhou Province in the past ten years, this paper established a BP network model and applied the mean impact value (MIV) algorithm method to analyze the influencing factors of the water resource security in Karst area. [Results] The groundwater supply ratio, the industrial water use proportion, water use efficiency, per capital grain yield and water yield modulus were the obstacles to the development of water resources system. The influencing degree of water yield modulus was decreasing year by year, while the other four factors showed increasing trends. Comprehensive utilization rate of industrial solid waste, the attainment

收稿日期: 2017-02-08

修回日期: 2017-03-12

资助项目: 国家科技计划项目“喀斯特地下水赋存条件及监测技术研究”(2014BAB03B01); 国家社科基金后期资助项目(16FJY010); 贵州喀斯特山区水资源环境系统服务功能创新科技人才团队”(黔科合人才团队[2014]4014); 重庆工商大学 2015 年校级科研项目(670101577)

第一作者: 刘丽颖(1982—), 女(汉族), 辽宁省辽阳市人, 博士研究生, 讲师, 主要从事水资源与可持续发展研究。E-mail: lly@ctbu.edu.cn.

通讯作者: 官冬杰(1980—), 女(汉族), 黑龙江省富锦市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事城市空间格局演化、土地利用预测、生态模拟与环境评价、“3S”技术应用等方面的研究工作。E-mail: guandongjie_2000@163.com.

rate of the industrial waste water, the ratio of moderate rocky desertification area, water requirement per-unit GDP and exploitation degree of groundwater were the driving factors. In chronological order, the influence of water requirement of per-unit GDP and exploitation degree of groundwater were stable, while the ratio of moderate rocky desertification area was more and more pronounced. The impact of the attainment rate of the industrial waste water decreased year by year, while comprehensive utilization rate of industrial solid waste fluctuated greatly. [Conclusion] The MIV-BP model is feasible in studying influencing factors of water resource security in karst area.

Keywords: karst area; water resource security; MIV; BP neural network; influence factors

水资源安全问题在国内国外已有一些初步的研究成果,但尚属于起步阶段。目前国内外对水资源安全没有明确的、系统的、有影响力的定义^[1-2]。就其本质来讲,水资源安全是指一个国家或者区域的水资源,在一定的历史阶段下,能够满足社会与经济发展对水的 5 个层次(饮水保障、防洪安全、粮食供给、经济发展和生态环境)上的需求。这里强调了保障的概念,即水资源安全主要是指在保持生态环境良性循环的前提下,水资源对经济发展和人民生活的保障程度,保障程度越高就越安全,同时也包含了水资源安全可包容性、可控制性和可预测性。

水资源安全影响因素的综合分析是水资源安全评价指标体系构建的必要基础和首要难题。目前,国内外学者对水资源安全影响因素的研究主要集中在水资源、社会经济、生态环境 3 个方面。现有的研究方法主要是借鉴了水资源可持续发展的研究思路,有压力—状态—响应模型^[3]、水足迹法^[4]、专家系统法^[5]、多层次结构分析法^[6]、归纳总结法^[7]、“社会—经济—环境”复合系统法^[8]等。研究角度不同,水资源安全评价指标体系的建立有所差异。综合看来,水资源安全的评价指标体系研究取得了丰富的理论成果,但也存在着一些问题:①指标选择主观化。影响水资源安全的因素错综复杂,一些主观性的评价指标定性分析不能够科学反映水资源安全的客观现实性。②指标选择的全面性、代表性和简练性的兼顾问题。③水资源安全影响因素众多,影响程度和变化趋势并不确定,指标权重依赖专家经验,难以客观反映水资源系统的不确定性和非线性。

由于喀斯特地区有着复杂的水文地质、地貌和生态环境条件、多种水资源赋存类型以及由此导致的“工程性”缺水等问题,使其流域空间结构、水系发育规律、水文动态等方面表现出与常态流域的巨大差异。因此,本研究拟以典型喀斯特地区——贵州省为研究对象,选取 2005—2014 年的数据,采取 MIV (mean impact value) 算法对 BP (back-propagation neural network) 神经网络模型进行变量筛选的网络优化,构建 MIV-BP 模型,实证分析各影响因素对喀

斯特地区水资源安全的影响程度和变化趋势,为促进喀斯特地区水资源安全利用和生态环境建设提供对策与建议。

1 研究区概况

贵州省位于中国西南的东南部,介于东经 $103^{\circ}36'$ — $109^{\circ}35'$ 、北纬 $24^{\circ}37'$ — $29^{\circ}13'$,全省总面积 $1.761 \times 10^5 \text{ km}^2$,平均海拔在 1 100 m 左右,位于副热带东亚大陆的季风区内,气候类型属中国亚热带高原季风湿润气候。贵州是一个以山地为主的省份,据统计全省山地面积约占 75.1%。丘陵面积约占 23.6%。全省河长大于 10 km、流域面积大于 20 km^2 的河流有 984 条,全省江、河、湖、库水域面积 1 845 km^2 ,约占全省面积的 1%。全省水资源总量丰富,多年平均降水量 1 100~1 300 mm,地表水资源量超过 $1.20 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。由于岩溶发育强烈,水资源渗漏严重,人均占有量目前略高于全国平均水平,但可利用量低于全国平均水平。

2 研究方法

2.1 变量选择

水资源安全是一个开放的、相互关联的生态安全系统。因此,须将水资源安全看成是一个有机整体,从系统的角度对其进行研究。通过对水资源安全内涵的分析,我们将水资源安全系统分为 5 个子系统:水环境子系统、社会子系统、经济子系统、生态子系统和人文(水资源管理与政策调控)子系统。这 5 个子系统的共同联动,交互作用、互相影响构成了处于动态变化中的水资源安全系统。为实现水资源总体安全,每一个子系统应该达到各自的安全状态,同时必须通过各系统间的良性互动,最终实现最高层次的水资源安全。

结合喀斯特地区实际情况,以人均用水量因变量衡量水资源安全的状态,以 5 个子系统联合反映喀斯特地区水资源安全的整体属性,建立一个较全面的、有层次性的候选指标库(表 1)。

表 1 喀斯特地区水资源安全评价指标库

指标层	指标	指标含义
水环境子系统	C ₁ 水资源利用率/%	表示水资源开发量大小
	C ₂ 人均水资源量(m ³ /人)	表示水资源人均状态
	C ₃ 地下水开发利用程度/%	衡量供水能力的重要指标
	C ₄ 地表水开发利用程度/%	反映水资源可持续利用状况
	C ₅ 单位面积地下水资源量/(10 ⁴ m ³ · km ⁻²)	表示地下水资源丰富程度
	C ₆ 年平均降雨量/mm	反映区域的水资源条件
	C ₇ 地下水供水比例/%	表示水资源供给结构
	C ₈ 产水模数/(m ³ · km ⁻²)	反映流域内水资源量相对量
社会子系统	C ₉ 城镇化率/%	表示区域发展对水生态的压力
	C ₁₀ 城市污水处理率/%	表示水资源质量的响应
	C ₁₁ 人口密度(人 · km ⁻²)	表示人口压力程度
	C ₁₂ 河流水质达标率/%	表示河流水质状况
	C ₁₃ 人均粮食产量/kg	反映农业生产比重
	C ₁₄ 水功能区达标率/%	反映水资源管理的有效性
	C ₁₅ 废水排放总量/10 ⁸ t	反映水资源管理的有效性
经济子系统	C ₁₆ 单位 GDP 需水量(m ³ /万元)	表示经济发展对水生态的压力
	C ₁₇ 工业废水排放达标率/%	表示水资源的污染处理能力
	C ₁₈ 农业用水率/%	表示农业生产水资源损耗程度
	C ₁₉ 工业固废综合利用率/%	表示水资源的污染处理能力
	C ₂₀ 农业灌溉单位面积用水量/(m ³ · hm ⁻²)	表示农业生产水资源损耗程度
	C ₂₁ 工业用水率/%	表示工业生产水资源损耗程度
生态子系统	C ₂₂ 输沙模数/(t · km ⁻²)	表示对水土流失的状况
	C ₂₃ 植被覆盖率/%	表示对地表蓄水能力的影响
	C ₂₄ 中度以上石漠化面积比/%	反映地表蓄和水土流失状况
	C ₂₅ 生态用水率/%	表示水资源承载力状况
	C ₂₆ 水土流失面积比率/%	表示对水土流失的状况
	C ₂₇ 岩溶灾害发生次数/次	反映水资源与生态环境耦合负面效应程度
人文子系统	C ₂₈ 环境保护资金投入/亿元	表示水资源管理资金的充足性
	C ₂₉ 水利科技人员拥有率/%	反映水利政策及管理在社会中的普及率
	C ₃₀ 水污染事故/次	反映水资源管理的有效性

2.2 数据来源及处理

研究数据主要来源于 2005—2014 年《贵州省水资源公报》《贵州省环境状况公报》《贵州省统计年鉴》以及《贵州省国民经济和社会发展统计公报》。首先对数据进行归一化处理以消除数据量纲。本文采用最大最小法对数据进行归一化处理,计算公式为:

$$x_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

式中: X_{\max} 和 X_{\min} ——数据序列最大值和最小值;
 X_{ij} ——指标的实际观察值。

2.3 模型原理

2.3.1 BP 神经网络模型原理 误差反向传播网络(BP)是一种非线性映射人工神经网络。该网络的主要特点是信号前向传递,误差反向传播。在前向传递中,输入信号从输入层经隐含层逐层处理,直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态。

如果输出层得不到期望输出,则输入反向传播,根据预测误差调整网络权值和阈值,从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出。

人工神经网络具有广泛的自适应性和泛化能力,在理论上可以逼近任何非线性关系。它通过对有代表性的样本自学习、自适应,能够掌握事物的本质特征,能有效解决水资源系统中的非线性模糊问题,从而避开其他方法寻求水资源与社会经济系统之间耦合关系的困难,对水资源安全易于做出客观正确的评价。目前,人工神经网络已在水环境质量评价^[9]、水质评价^[10]、土地生态安全评价^[11]、水环境承载力评价^[12]等方面得到了广泛应用,但将其应用于水资源安全评价研究和喀斯特地区的甚少。

在水资源可持续利用方面,杨秀英等^[13-14]构建 BP 神经网络对贵阳市以及陕西关中地区进行了水资源承载力的评价。宋松柏等^[15]提出了区域水资源可

持续利用评价的人工神经网络模型,并进行了实例研究,得到了较好效果。张先起等^[16]结合云南省水资源的实际状况,建立了有针对性的水资源可持续利用程度评价指标体系,利用自组织神经网络自组织、自适应的聚类功能,对云南省及各地区水资源可持续利用程度进行了聚类分析。所以探讨人工神经网络理论在水资源系统中的应用有着一定的理论意义,采用人工神经网络方法对喀斯特地区水资源安全问题进行研究有较强的可行性。

2.3.2 MIV-BP 模型原理 对水资源安全的评价,需要尽可能从指标库中选出代表性最强的指标,并归为要求的指标体系中,将作用效果不显著的指标排除在外。平均影响值 MIV 被认为是在神经网络中评价各指标之间相关性的最好算法之一^[17]。因此,本研究应用 BP 神经网络模型和 MIV 算法,找到对水资源安全有较大影响的输入项,继而分析各指标影响度的变化趋势。

首先对 BP 神经网络进行网络训练,仿真输出,训练完成后,将训练样本 P 中每一个自变量分别在其原值的基础上分别加和减 10% 构成 2 个新的训练样本 P_1 和 P_2 ,将 P_1 和 P_2 分别作为仿真样本利用已建成的网络进行仿真,得到 2 个仿真结果 A_1 和 A_2 ,计算 A_1, A_2 的差值,即为变动该自变量后对输出因变量产生的影响变化值(impact value, IV)。将 IV 按观测例数平均得出该自变量对于因变量预测输出的平均影响值(MIV),按照上述步骤依次算出各个自变量的 MIV 值,最后根据 MIV 绝对值的大小对各变量进行排序,从而判断出输入参数对于网络输出变量的影响程度。

2.4 MIV-BP 网络训练

网络的输入神经元个数为 30,输出神经元个数为 1,经过训练对比得出隐含层神经元个数为 7 时网络误差最小,因此神经网络结构设定为 3 层神经网络。最大训练次数设定为 5 000,学习速率设定 0.05,目标误差设为 0.000 1。

创建网络: $net = newff(\minmax(p), [7, 1], \{ 'tansig', 'purelin' \}, 'traingdm')$; 网络的目标输出为:IV 值。对输入输出数据进行归一处理后,BP 神经网络只经过 2 583 次训练,神经网络均方差的值都非常接近 1,误差已经达到目标误差 0.000 1,误差结果满足训练要求。因此该神经网络对于训练数据有非常好的拟合度,经过训练后的网络对训练数据的预测效果较好。根据训练好的 BP 神经网络仿真预测数据的输出结果,计算 MIV 值。

3 结果与分析

3.1 不同指标对水资源安全的影响程度分析

各指标对喀斯特地区水资源安全的影响重要程度依其绝对值大小进行排序(如表 2 所示)。

表 2 喀斯特地区水资源安全影响因素 MIV 值及排序

变量	MIV 值	排序
C_7 地下水供水比例	0.043 6	1
C_{19} 工业固废综合利用率	-0.032 8	2
C_{17} 工业废水排放达标率	-0.027 7	3
C_{21} 工业用水率	0.022 0	4
C_{24} 中度以上石漠化面积比	-0.021 4	5
C_{16} 单位 GDP 需水量	-0.019 4	6
C_1 水资源利用率	0.018 9	7
C_{13} 人均粮食产量	0.018 5	8
C_3 地下水开发利用程度	-0.016 2	9
C_8 产水模数	0.015 0	10
C_6 年平均降雨量	0.014 8	11
C_{26} 水土流失面积比率	-0.014 6	12
C_{10} 城市污水处理率	-0.014 4	13
C_4 地表水开发利用程度	0.014 0	14
C_9 城镇化率	-0.013 7	15
C_{20} 农业灌溉单位面积用水量	0.011 3	16
C_{28} 环境保护资金投入	-0.010 5	17
C_{15} 废水排放总量	0.010 0	18
C_{23} 植被覆盖率	-0.009 1	19
C_{29} 水利科技人员拥有率	-0.008 6	20
C_2 人均水资源量	-0.007 7	21
C_{30} 水污染事故	0.006 6	22
C_{22} 输沙模数	-0.006 5	23
C_{11} 人口密度	0.004 3	24
C_{12} 河流水质达标率	-0.004 2	25
C_5 单位面积地下水资源量	-0.003 3	26
C_{18} 农业用水率	0.002 1	27
C_{25} 生态用水率	0.000 6	28
C_{27} 岩溶灾害发生次数	-0.000 4	29
C_{14} 水功能区达标率	-0.000 1	30

注:指标 MIV 值为“+”表明对水资源安全偏离度增加有正向效应;反之,为负向效应。

(1) 喀斯特地区水资源系统安全的主要影响因素。在影响喀斯特地区水资源安全的诸多因素中,占有重要地位(MIV 绝对值大于 0.01)的指标分别为水环境子系统:地下水供水比例、水资源利用率、地下水开发利用程度、地表水开发利用程度、产水模数、年平均降雨量;社会子系统:城镇化率、城市污水处理率、人均粮食产量、废水排放总量;经济子系统:单位 GDP 需水量、工业废水排放达标率、工业固废综合利

用率、农业灌溉单位面积用水量、工业用水率;生态子系统:中度以上石漠化面积比、水土流失面积比率;人文子系统:环保投入占 GDP 比重。由于 MIV 绝对值越大,则该影响因素对喀斯特地区水资源安全的作用程度越大,反之越小。因此,由 MIV 值绝对值大小排序后的指标所在子系统可以看出:水环境子系统和经济子系统的影响远大于生态子系统和人文子系统对喀斯特地区水资源安全的影响,而社会子系统介于两者之间。

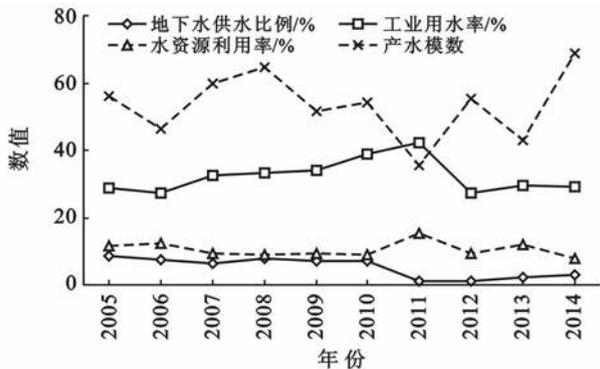
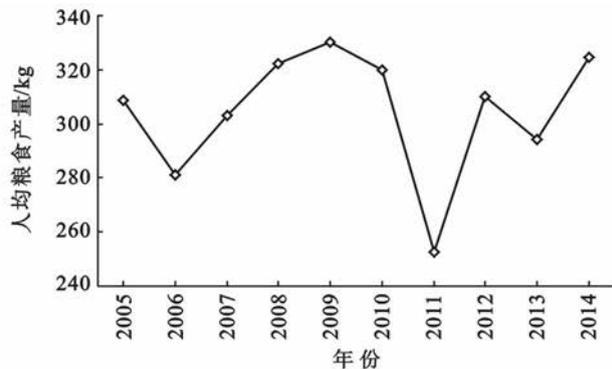


图 1 喀斯特地区水资源安全的障碍因素



结合图 1 可以看出这 5 项指标数据在波动中呈现向不利于水资源安全的趋势。

(3) 喀斯特地区水资源安全的驱动因素。如图 2 所示,2005—2014 年,贵州省工业固废综合利用率从 34.1% 上升至 56.9%,工业废水排放达标率从 67.7% 上升至 89.5%,中度以上石漠化面积比从 20.39% 下降至 17.16%,单位 GDP 需水量从 509

$\text{m}^3/\text{万元}$ 下降至 $103 \text{ m}^3/\text{万元}$,地下水开发利用程度从 3.18% 下降至 0.95%。工业固废综合利用率、工业废水排放达标率、中度以上石漠化面积比、单位 GDP 需水量和地下水开发利用程度共同构成了水资源系统安全的驱动因素。其每降低或增加 0.1 个标准差单位,对降低偏离度的贡献依次为 0.032 8, 0.027 7, 0.021 4, 0.019 4 及 0.016 2。

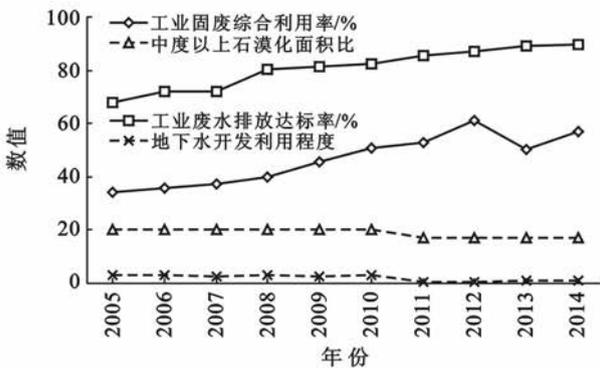
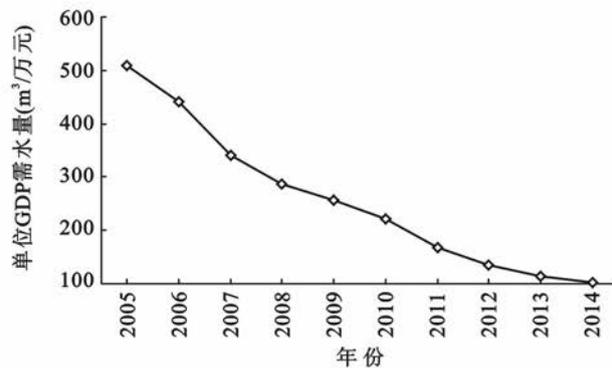


图 2 喀斯特地区水资源安全的驱动因素



3.2 喀斯特地区水资源安全影响因素动态变化分析

按照时间顺序,汇总计算喀斯特地区水资源安全影响因素各年份 MIV 值(表 3),观察各因素影响程度的变化趋势。喀斯特地区水资源安全影响阻碍因素和驱动因素的年度 MIV 值的绝对值变化如图 3 所示。

阻碍因素中,产水模数的影响程度呈现波动中逐

年递减趋势,其余 4 个阻碍因素影响程度不断增强;驱动因素中,单位 GDP 需水量和地下水开发利用程度的影响程度趋于稳定,中度以上石漠化面积比因子对水资源安全影响程度越来越显著。工业废水排放达标率的影响逐年减弱,而工业固废综合利用率的影响情况波动比较大。

表 3 喀斯特地区水资源安全影响因素年度 MIV 值

指标	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
地下水供水比例	0.000 0	0.013 6	0.025 0	0.016 0	0.028 9	0.038 9	0.058 3	0.059 8	0.042 9	0.085 0
工业固废综合利用率	-0.077 0	-0.020 4	-0.029 0	-0.052 2	-0.043 2	0.000 0	-0.071 2	-0.083 6	-0.042 8	-0.075 5
工业废水排放达标率	-0.044 5	-0.015 6	-0.009 7	-0.015 6	-0.011 9	-0.012 6	-0.014 2	-0.007 5	-0.001 4	0.000 0
工业用水率	0.000 0	0.000 4	0.003 3	0.006 5	0.013 3	0.027 0	0.020 0	0.023 7	0.011 1	0.027 0
中度以上石漠化面积比	0.003 6	0.004 4	-0.013 8	0.005 6	-0.005 6	0.002 4	0.000 0	0.052 8	0.011 2	0.077 6
单位 GDP 需水量	0.000 0	0.000 2	0.004 3	0.005 6	-0.008 2	-0.012 8	-0.006 8	-0.009 0	-0.003 1	-0.008 8
水资源利用率	0.000 4	0.000 1	0.000 0	0.000 8	0.004 7	0.036 4	0.043 2	0.070 6	0.036 0	0.095 3
人均粮食产量	0.000 0	0.000 5	0.000 2	0.004 1	0.011 1	0.027 0	0.030 3	0.048 4	0.014 3	0.038 0
地下水开发利用程度	0.000 0	0.000 2	0.002 3	0.006 8	0.008 4	-0.007 4	0.000 6	-0.008 4	-0.004 4	-0.009 7
产水模数	0.017 6	0.014 8	0.002 6	0.018 3	0.019 3	0.075 4	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

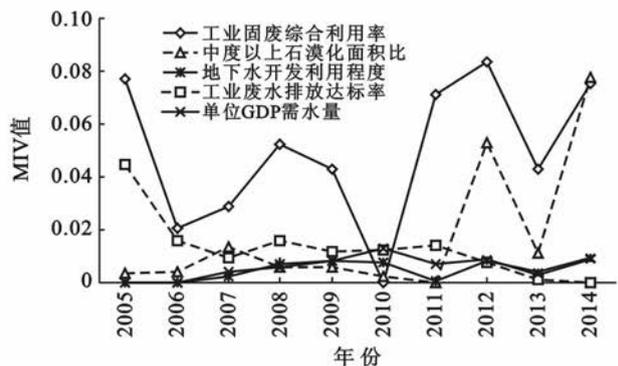
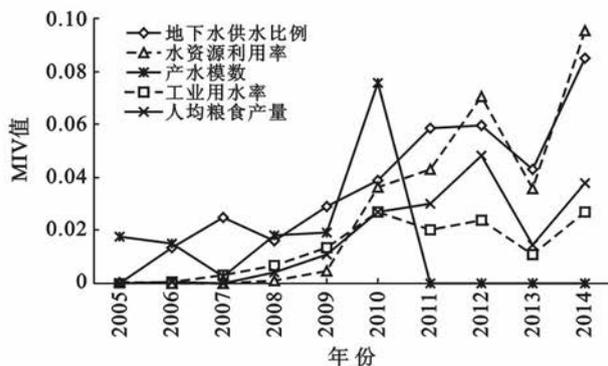


图 3 喀斯特地区水资源安全影响主要因素的年度 MIV 值的绝对值变化趋势

4 讨论与建议

水资源开发利用模式是喀斯特地区水资源安全的主要影响因素之一。对喀斯特地区水资源安全的影响较大的因素有地下水供水比例、地下水开发利用程度、水资源利用率以及产水模数。这是由于喀斯特地区特殊的地形条件,天然水资源总量大,但可利用量严重不足。山区控制性水利工程建设滞后,工程性缺水问题严重。地表水资源调控能力弱,地表水开发利用不足,开发利用方式单一。

经济的迅速发展对喀斯特地区水资源安全影响显著。从 MIV-BP 模型结果可以得到,工业用水率、工业固废综合利用率、工业废水排放达标率、和单位 GDP 需水量这 4 个因子对喀斯特地区水资源安全影响较大。分析其原因,现阶段贵州省主导工业多是资源环境消耗较大的资源型工业,主要以劳动密集型产业、传统产业为主,而高新产业和轻工业比重较小。工业生产的迅速发展,使排污量增加,工业用水量日益增加,从而对水资源安全产生消极影响。

根据结果分析,本研究对喀斯特典型区域贵州省水资源安全有如下建议:

(1) 综合利用各种水资源,实现喀斯特地区水资源的综合开发。合理并有效的开发喀斯特地区地下

水是确保该地区水资源安全的重点。喀斯特地区地下水稳定性差、开发利用成本高,而且地下水分布和需水区域不协调,可开发量小,同时地下水开采也关系到水生态环境问题。针对这些问题,保护贵州省岩溶山区地下水资源,确保地下水有序开发、合理开发,加强地下水水质管理,从而提高喀斯特地区地下水资源开发的成功率和利用率,减小地下水资源开发的消极影响。此外,今后应突破单一开发利用喀斯特地下水资源的思路,充分利用该地区丰富的降水资源,促进水资源的综合利用。

(2) 调整产业结构和经济结构,提高水资源利用效率。从以上的分析可以看出,喀斯特地区水资源安全伴随着经济,特别是工业的迅速发展而呈现较大压力。在今后的发展中,调整贵州产业结构,选择合适的主导工业,并明确工业发展方向,有利于实现水资源的最优配置与最小消耗。同时扶持企业提高水循环利用效率,强化企业的节水意识,积极推进资源节约型企业建设,促进水资源与经济社会的协调发展。

(3) 减少石漠化面积,提高表层岩溶带的调水和蓄水功能。近年来贵州省中度以上石漠化面积比重逐年下降,水土流失面积不断减少,这些都对水资源安全利用产生了积极的作用。继续加强喀斯特地区水土流失的治理,恢复植被,减少石漠化面积,重建良

性的生态环境,是解决喀斯特地区水资源短缺的一条重要途径。

5 结论

(1) 在影响喀斯特地区水资源安全的诸多因素中,地下水供水比例、工业固废综合利用率、工业废水排放达标率、工业用水率、中度以上石漠化面积比、单位 GDP 需水量、水资源利用率、人均粮食产量、地下水开发利用程度以及产水模数对喀斯特地区水资源安全的影响程度较大。从指标分类来看,水环境子系统和经济子系统的影响远大于生态子系统和人文子系统,而社会子系统介于两者之间。因此,喀斯特地区的水资源的整体状态和经济发展水平是影响水资源安全的主要因素。

(2) 地下水供水比例、工业用水率、水资源利用率、人均粮食产量以及产水模数是水资源安全的阻碍因素。其中产水模数影响程度呈现波动中逐年递减的趋势,其余 4 个阻碍因素均显示其影响程度逐年增强。

(3) 工业固废综合利用率、工业废水排放达标率、中度以上石漠化面积比、单位 GDP 需水量以及地下水开发利用程度共同构成了水资源安全的驱动因素。从时间顺序来看,单位 GDP 需水量和地下水开发利用程度得影响程度趋于稳定,中度以上石漠化面积比因子对水资源安全影响程度越来越显著。工业废水排放达标率的影响逐年减弱,而工业固废综合利用率的影响情况波动比较大。

(4) 由于 MIV-BP 神经网络本身的缺点是参数比较多,灵活性较大,所以需要经过多次训练才能得到较好的预测模型。此外,MIV-BP 神经网络模型得出的结果只说明了各影响因素对喀斯特地区水资源安全影响程度的相对大小,对于各影响因素如何影响喀斯特地区水资源安全,与喀斯特地区水资源安全的正负相关性还需要通过进一步分析得出。

[参 考 文 献]

[1] 张翔,夏军,贾绍凤. 水安全定义及其评价指数的应用[J]. 资源科学,2005,27(3):145-149.

- [2] 邱德华. 区域水安全战略的研究进展[J]. 水科学进展,2005,16(2):305-312.
- [3] 张翔,夏军,王富永. 基于压力—状态—响应概念框架的可持续水资源管理指标体系研究[J]. 城市环境与城市生态,1999,12(5):23-25.
- [4] 张斌,黄显峰,方国华,等. 基于水足迹理论的连云港市水资源安全评价[J]. 中国农村水利水电,2012(6):61-64.
- [5] 吴开亚,金菊良,魏一鸣,等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型[J]. 中山大学学报:自然科学版,2008,47(4):105-113.
- [6] 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.
- [7] 王在高,梁虹. 岩溶地区水资源承载力指标体系及其理论模型初探[J]. 中国岩溶,2001,20(2):144-148.
- [8] 夏军. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战(2)[J]. 海河水利,2002,17(3):3-7.
- [9] 杨芳,原松. 基于 BP 神经网络的水环境质量评价模型的研建[J]. 人民长江,2008,39(23):46-48.
- [10] 倪深海,白玉慧. BP 神经网络模型在地下水水质评价中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2000,20(8):124-127.
- [11] 李明月,赖笑娟. 基于 BP 神经网络方法的都市土地生态安全评价:以广州市为例[J]. 经济地理,2011,31(2):289-293.
- [12] 杨丽花,佟连军. 基于 BP 神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J]. 干旱区资源与环境,2013,27(9):135-140.
- [13] 杨秀英,梁虹. 基于人工神经网络模型的喀斯特地区枯水资源承载力评价:以贵阳市为例[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版,2006,24(4):37-41.
- [14] 杨秀英,韩晨. 基于 BP 神经网络模型的区域水资源承载力评价:以陕西省关中地区为例[C]//Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing(ICRS 2010) Volume 4. 2010.
- [15] 宋松柏,蔡焕杰. 区域水资源可持续利用评价的人工神经网络模型[J]. 农业工程学报,2004,20(6):89-92.
- [16] 张先起,刘慧卿,梁川. 云南水资源可持续利用程度评价的自组织神经网络模型[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(4):456-460.
- [17] 王小川. MATLAB 神经网络 43 个案例分析[M]. 北京:航空航天大学出版社,2013.