

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0155

黄垒,张礼中,朱吉祥,等.基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价[J].南水北调与水利科技,2018,16(6):68-73.  
HUANG L,ZHANG L Z,ZHU J X, et al.Evaluation of vulnerability of surface water resources in Baoding based on comprehensive index method[J].South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(6):68-73.(in Chinese)

# 基于综合指数法的保定市地表水资源脆弱性评价

黄垒,张礼中,朱吉祥,霍志彬,蔡子昭

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄 050061)

**摘要:**根据地表水资源脆弱性内涵及保定市地表水资源的特点,从自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性三个方面选取10项评价指标。利用层次分析法确定各指标权重,基于综合指数法结合GIS/RS技术对保定市地表水资源脆弱性进行了定量评价。结果表明,保定市地表水资源总体上呈现出较为脆弱的态势,其中以保定市西北部、西部、中部偏东及东南部地区表现得最为明显。根据脆弱性结构,将这些地区分成自然脆弱性主导型地区、人为脆弱性主导型地区和承载脆弱性主导型地区三类。针对自然和人为脆弱性主导型地区,提出加快水利设施建设、扩大绿化面积等对策;针对承载脆弱性主导型地区,提出控制用水总量和人口增长、淘汰落后产能、发展节水技术、宣传节水知识等对策。

**关键词:**保定市;地表水资源;层次分析法;综合指数法;GIS;RS;脆弱性

中图分类号: P331;TV211.1 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Evaluation of vulnerability of surface water resources in Baoding based on comprehensive index method

HUANG Lei, ZHANG Lizhong, ZHU Jixiang, HUO Zhibin, CAI Zizhao

(Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** According to the connotation of surface water resources vulnerability and the characteristics of surface water resources in Baoding, 10 evaluation indexes are selected from three aspects: natural vulnerability, human vulnerability and burden vulnerability. The weight of each index is calculated by AHP, and the vulnerability of surface water resources is quantitatively evaluated by comprehensive index method and GIS/RS technology. The results show that the surface water resources in Baoding are generally vulnerable, and the most vulnerable areas are the northwestern, western, east central, and southeastern parts of Baoding. According to the vulnerability structure, these areas are divided into three categories: natural vulnerability dominant areas, human vulnerability dominant areas and burden vulnerability dominant areas. For the natural vulnerability dominant and human vulnerability dominant areas, some countermeasures are put forward such as construction of water conservancy facilities and expansion of afforestation area; for the burden vulnerability dominant areas, this paper proposes controlling water consumption and population growth, eliminating backward production capacity, developing water saving technologies and promoting water saving knowledge.

**Key words:** Baoding; surface water resources; AHP; comprehensive index method; GIS; RS; vulnerability

收稿日期: 2018-01-29 修回日期: 2018-09-19 网络出版时间: 2018-10-16  
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181011.1122.002.html>  
基金项目: 国家自然科学基金项目(41672241); 中国地质调查项目(DD20179375)

**Funds:** National Natural Science Foundation of China (41672241); China Geological Survey Project (DD20179375)

**作者简介:** 黄垒(1995-),男,河南罗山人,主要从事水文地质环境地质调查评价信息化研究。E-mail: huanglei\_9509@163.com

**通讯作者:** 张礼中(1969-),男,四川大竹人,研究员,博士,主要从事水环信息技术和水文地质环境地质相关地质调查及科研工作。  
E-mail: zhanglizhong1015@126.com

水资源是人类生存的根本保证,对其合理的开发与利用,不仅关系到社会和经济的可持续发展,更加关系到人类自身的可持续发展<sup>[1,2]</sup>。我国水资源问题十分突出,人均淡水资源占有量仅为世界平均水平四分之一<sup>[3,4]</sup>。尤其是广大北方地区年降水量较少、季节分布不均、地表径流少且人口稠密,水资源问题显得尤为严峻<sup>[2,4,6]</sup>。因此,水资源脆弱性评价对于我国,尤其是我国北方地区而言,已成为一个不容忽视的重要课题。国内外学者对其展开了多方面研究<sup>[7,15]</sup>,例如, Farley 等<sup>[13]</sup>耦合人类环境系统,探讨了气候变化对美国俄勒冈山脉地区水资源脆弱性的影响; Babel 等<sup>[14]</sup>总结了八个水资源脆弱性参数应用于尼泊尔巴格马蒂河流域的水资源脆弱性评价; 邹君等<sup>[9,11,15]</sup>以衡阳盆地为例对南方地区地表水资源脆弱性和农业水资源脆弱性的概念、内涵和评价方法做了详尽研究。就评价方法而言,综合指数法综合考虑了影响水资源脆弱性的各种自然与人为因素,评价结果具有一定的代表性和可比性,同时评价过程较为简单,因此得到了广泛的应用<sup>[16]</sup>。保定市域是典型的资源型缺水地区,随着经济的快速增长和用水需求的持续提高,水资源已成为制约地区可持续发展的重要因素之一<sup>[17]</sup>。在国家提出建立河北雄安新区,打造北京非首都功能疏散集中承载地的背景下,开展保定市水资源脆弱性定量评价对当地水资源的可持续利用与管理具有非常重要的现实意义。本文以保定市地表水资源脆弱性为研究对象,从自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性三个方面提取 10 项评价指标,构建其评价模型,采用综合指数法,结合 GIS/RS 技术,对保定市地表水资源脆弱性进行定量评价。

## 1 研究区概况

保定市位于河北省中西部(38°10′ - 40°00′ N, 113°40′ - 116°20′ E),地处太行山北部东麓、冀中平原西部。境内地势由西北向东南倾斜,地貌主要包括山地和平原两类,且二者面积基本相同。河流主要属海河流域大清河水系,分为南北两支,部分河流汇入华北平原最大的淡水湖泊—白洋淀。保定市多年平均降水量为 566.9 mm,其中山区为 607.8 mm,平原为 526.6 mm,7月、8月份平均降水量达到全年降水量的一半,时空分布极为不均。2016年,保定市地下水资源量 21.87 亿 m<sup>3</sup>,地表水资源量 10.37 亿 m<sup>3</sup>,扣除地表水和地下水的重复计算量,全市水资源总量 24.81 亿 m<sup>3</sup>,人均水资源量仅为 238 m<sup>3</sup>,远低于人均 500 m<sup>3</sup> 的国际水资源紧缺

标准,属于极度缺水地区。据保定市 2016 年统计年鉴显示,全市地区生产总值 3 110.4 亿元,人均生产总值 29 945 元。年末常住人口数 1 042.5 万人,其中城镇人口 511.2 万人,城镇化率为 49.03%。

## 2 指标体系的构建与数据来源

### 2.1 指标体系的构建

地表水资源系统是一个复杂的巨型系统,只有建立一个能反映其脆弱性内涵及研究区域特征的评价指标体系才能对其脆弱性进行恰当的评价。对于地表水资源系统而言,脆弱性具有以下几层含义:(1)脆弱性是地表水资源系统自身的一种客观属性,其内部结构是决定脆弱性的根本因素;(2)脆弱性容易受水旱灾害、水质污染、水资源开发利用等外在因素的影响,并以一定的形式表现出来;(3)脆弱性具有使地表水资源系统从各种不良影响中实现自我修复的能力。在充分理解上述地表水资源脆弱性内涵的基础上,将影响保定市地表水资源系统脆弱性的因素划分为自然脆弱性、人为脆弱性和承载脆弱性三类。结合保定市地表水资源系统的特点,立足于科学性、可操作性以及简便性等原则,参考前人的研究成果<sup>[8,15,16]</sup>,从三类脆弱性中选取 10 项评价指标,构建保定市地表水资源脆弱性评价的指标体系,见图 1。

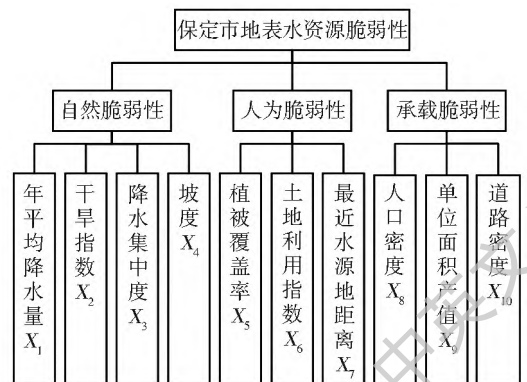


图 1 保定市地表水资源脆弱性评价指标体系  
Fig. 1 Evaluation index system for vulnerability of surface water resources in Baoding

(1) 自然脆弱性。指由人类活动难以改变的地表水资源系统内部固有自然要素所形成的维持其在水质和水量上符合人类各种利用要求的适用性或敏感性。降水量、蒸散量等气候因子和坡度、高程等地貌因子是影响自然脆弱性的主要因素。选取年平均降水量( $X_1$ )、干旱指数( $X_2$ )、降水集中度( $X_3$ )和坡度( $X_4$ )四项指标,其中  $X_2$  等于保定市年平均蒸发量除以年平均降水量,它与  $X_1$  分别代表地表水资源的排泄和补给强度,反映了保定市地表水资源的丰富程度; $X_3$  等于保定市 7 月、8 月

降水量除以年平均降水量,反映了保定市降水时间分布的不均匀性; $X_4$ 代表下垫面对水资源的持蓄能力,坡度较大往往不利于雨水在土壤中充分下渗和储存。

(2)人为脆弱性。指由于人类活动改变了地表水资源系统的结构而形成的维持其在水质和水量上符合人类各种利用要求的适用性或敏感性。通过人工绿化、退耕还林、还草等措施提高植被覆盖率从而改善下垫面对水资源的持蓄能力以及通过建设各种提水、引水的水利设施来改善地表水资源在空间上分布不均的问题都是人为脆弱性的体现。选取植被覆盖率( $X_5$ )、土地利用指数( $X_6$ )以及最近水源地距离( $X_7$ )三项指标,其中 $X_5$ 反映了人类活动对下垫面的改造程度; $X_6$ 由专家根据各种土地利用类型对地表水资源脆弱性影响程度的大小打分得到,用于定量描述不同土地利用类型对地表水资源的依赖性; $X_7$ 表示地面某点距离最近河流、湖泊、水库等水源地的远近,反映了地面点获取地表水资源的能力以及各类水利设施的分布情况。

(3)承载脆弱性。指地表水资源系统应对外部负荷或人类对其不合理开发利用所形成的其在水质和水量上符合人类各种利用要求的适用性或敏感性。不同于自然脆弱性和人为脆弱性,承载脆弱性主要与系统所受的外部负荷有关,而与系统内部结构无关,且这种外部负荷多是指人类活动。一方面,由于保定市人口的增长和经济的高速发展,人类自身的生活活动、农业灌溉活动以及工业生产活动都会产生极大的用水需求,给区域地表水资源系统以巨大的压力;另一方面,在水资源开发利用过程中的不合理行为,如农药化肥的施放、生活污水及工业废水的排放等也给地表水资源系统带来了非常恶劣的影响。选取人口密度( $X_8$ )、单位面积产值( $X_9$ )以及道路密度( $X_{10}$ )三项指标。三者分别反映了保定市人类生活活动强度、生产活动强度和交通活动强度。

## 2.2 数据来源

在考虑可获得性的前提下,尽可能地选取同期数据,如 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 指标中涉及的Landsat 8遥感影像和 $X_8$ 、 $X_9$ 中涉及的经济、人口统计数据均取自于2015年。而对于降水量、蒸发量等气象数据,由于其年变化较大,故选用多年平均值代替,二者分别取自于1981—2010年和1971—2000年。遥感影像和DEM数据来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),统计

数据来源于保定市统计年鉴。

## 3 评价方法

地表水资源脆弱性定量评价主要可分为函数法和指标法两类。函数法具有系统性,易于在地区间比较且物理机制清晰,但指标选择困难、因素难以考虑全面、不够灵活且难以对结果进行解释;而指标法体系清晰、指标构建灵活、考虑全面且结果更易于解释<sup>[19]</sup>。综合指数法是典型的指标法之一,该方法通过判断各指标对地表水资源脆弱性的影响程度来确定权重,并将其赋给对应的指标数值后求和,从而得到地表水资源脆弱性得分。本文采用综合指数法,结合GIS/RS技术,以指标图层为参数对保定市地表水资源脆弱性进行评价分析,其技术路线见图2。

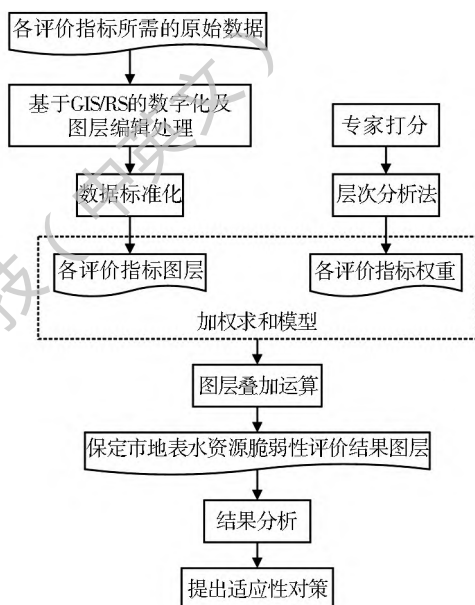


图2 保定市地表水资源脆弱性评价技术路线

Fig. 2 Technical route for evaluating surface water resources vulnerability in Baoding

## 4 保定市地表水资源脆弱性评价

### 4.1 指标图层的生成

基于空间分析、栅格计算及遥感分类技术等对原始数据进行数字化和图层编辑处理,生成保定市地表水资源脆弱性评价各指标图层见图3。为了排除量纲和数据趋向的影响,对上述10个指标图层进行极值标准化处理,将其属性值控制在0~1的范围之内。其中 $X_1$ 和 $X_5$ 为负向指标,其余为正向指标。

### 4.2 指标权重的计算

权重的确定是整个评价过程的一个重要环节和研究难点,主要可采用主观赋权法和客观赋权法<sup>[20]</sup>。客观赋权法往往过分依赖于数学或统计方

法,容易忽略系统的规律和主观特性,而主观赋权法主要依赖于专家的经验判断,适用于解决那些对评价结果难以直接准确定量的场合。层次分析法是一种常用的主观赋权方法,它利用评价者的经验来判断各衡量指标之间的相对重要程度,由此合理地计

算出每个指标的权重。该方法使复杂的评价问题层次化,仅利用少量的定量信息将评价的思维过程数学化,尤其适用于指标体系较为复杂的地表水资源脆弱性评价。因此,本文选用层次分析法来确定各评价指标的权重。

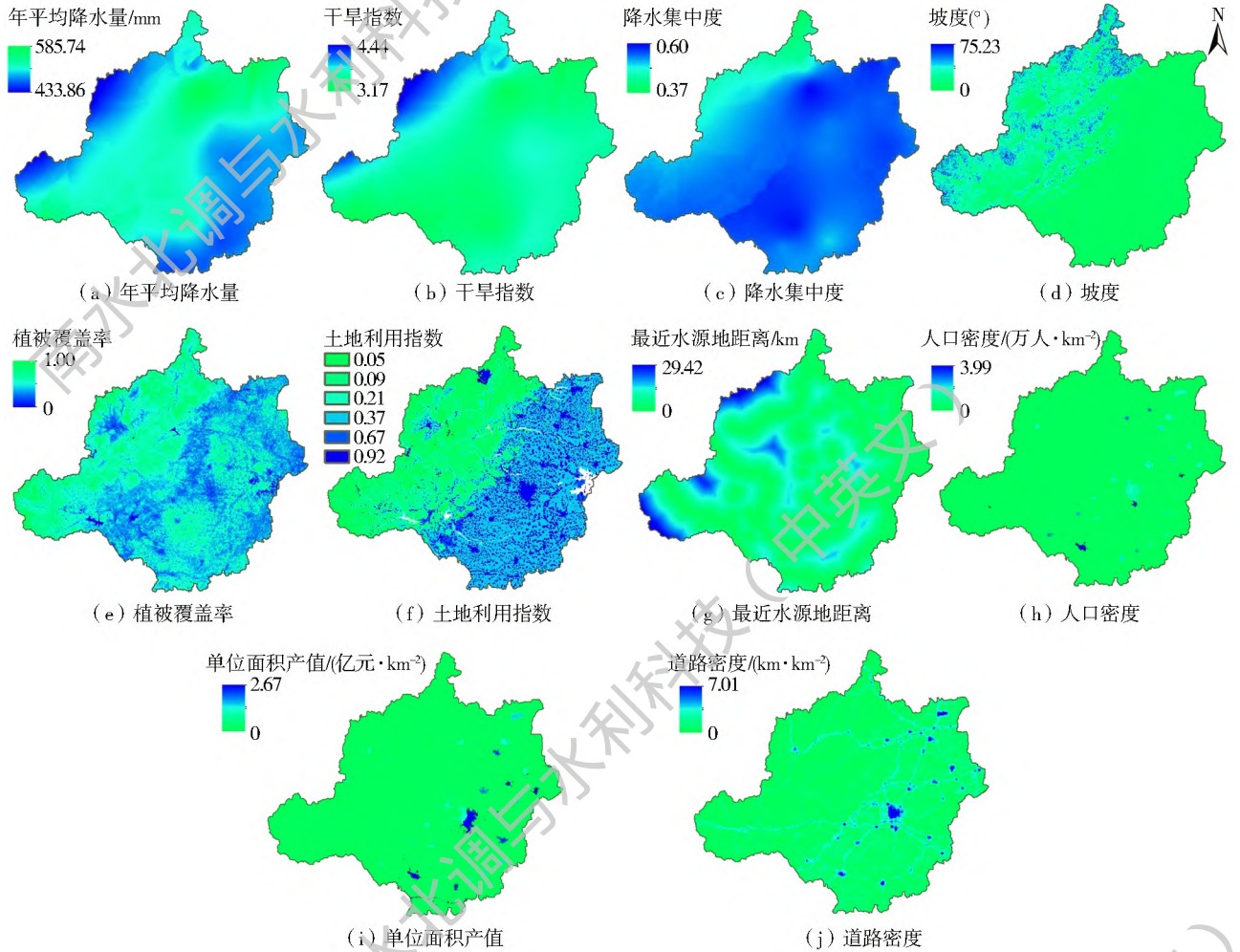


图 3 保定市地表水资源脆弱性评价指标空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of evaluation indexes of surface water resources vulnerability in Baoding

邀请专家用 1-9 标度法对层次指标进行两两比较构造判断矩阵,并据此计算层次单排序和总排序,通过一致性检验后,得到各评价指标在保定市地表水资源脆弱度计算中的权重,见表 1。

### 4.3 评价结果与分析

将各指标的权重赋给其对应的图层进行栅格叠加运算,以表 2 为评价标准,得到保定市地表水资源脆弱性评价结果,见图 4。

总的来看,保定市地表水资源脆弱性问题表现得非常突出:全市 80% 以上的地区脆弱度等级为中脆弱及其以上,接近一半的地区为强脆弱及其以上。

具体来说,保定市地表水资源脆弱性呈现出比较明显的空间分布差异现象:西北部、西部、中部偏东及东南部地区脆弱度大,东北部及西南部地区脆

表 1 保定市地表水资源脆弱性评价指标权重

Tab. 1 Weights of evaluation indexes of surface water resources vulnerability in Baoding

指标名称	指标权重
年平均降水量 $X_1$ /mm	0.20
干旱指数 $X_2$	0.15
降水集中度 $X_3$	0.03
坡度 $X_4$ (°)	0.11
植被覆盖率 $X_5$	0.03
土地利用指数 $X_6$	0.10
最近水源地距离 $X_7$ /km	0.18
人口密度 $X_8$ /(万人·km <sup>2</sup> )	0.05
单位面积产值 $X_9$ /(亿元·km <sup>2</sup> )	0.11
道路密度 $X_{10}$ /(km·km <sup>2</sup> )	0.04



表 2 地表水资源脆弱度等级划分

Tab. 2 Ratings of surface water resources vulnerability

地表水资源脆弱度 $V$	等级
$0 < V \leq 0.15$	不脆弱
$0.15 < V \leq 0.20$	弱脆弱
$0.20 < V \leq 0.25$	中脆弱
$0.25 < V \leq 0.30$	强脆弱
$0.30 < V \leq 1.00$	极脆弱

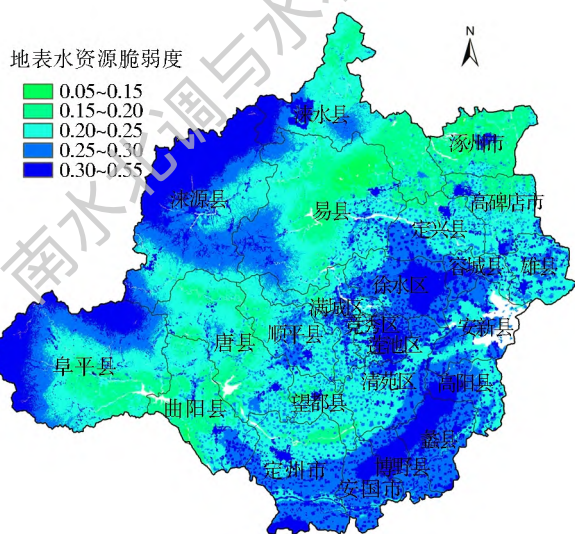


图 4 保定市地表水资源脆弱性评价结果

Fig. 4 Evaluation results of surface water resources vulnerability in Baoding

弱度小。为了进一步分析这种差异形成的原因,根据脆弱性结构将它们分为以下三类,并做分别探讨。

(1) 自然脆弱性主导型地区。分析评价结果可以发现,全市 90% 以上的地区的自然脆弱度得分能占总脆弱度得分的一半,总脆弱性较高的地区基本都分布在年平均降水量小、干旱指数大的区域,这说明自然要素是影响保定市地表水资源脆弱性最主要的控制因素。总脆弱性较高的地区中,涞源县西部和阜平县西部偏北地区是典型的自然脆弱性主导型。这些地区年平均降水量普遍在 500 mm 以下,干旱指数达到 4 以上,地表水资源极度匮乏,加上它们基本都是高程在 1 000 m 以上的山地、陡坡,无疑更加重了当地的地表水资源脆弱性。

(2) 人为脆弱性主导型地区。以最近水源地距离指标为主的人为脆弱性是导致保定市部分地区脆弱性突出的又一重要原因。这一类型主要分布在阜平县东北部、西部偏南、涞源县北部、涞水县西南部、保定市东南部及中部偏东地区等。这些地区均距河流、湖泊等天然水源地较远,对水库等水利设施建设的投入不足,缺乏提水、引水的能力,地表水资源可获得性较差。其中,涞水县西南部、保定市东南部及中

部偏东地区由于城镇建设和农业生产对原有下垫面持水能力的破坏,地表水资源脆弱性得到进一步提高。

(3) 承载脆弱性主导型地区。此类多是指发展程度相对较高的保定市各县(区)城镇区域。经济的高速发展和人口的迅速膨胀是造成这类地区地表水资源脆弱性较高的因素。一方面,城镇地区的人口密度远高于其它区域,过量的人口引发了严重的生活用水问题;另一方面,大量的工厂、企业多分布在城镇地区,其所需的工业用水使得区域地表水资源的供需矛盾更加突出,脆弱性更为显著。

#### 4.4 适应性对策

地表水资源脆弱性评价的目的在于根据评价结果找出区域地表水资源系统存在的问题,从而有针对性地制定对策,降低地表水资源系统的脆弱性,实现区域地表水资源的可持续利用。根据以上地表水资源脆弱性评价结果,本研究提出以下适应性对策。

(1) 针对自然与人为脆弱性主导型地区,亟需解决的问题是地表水资源的获取与持蓄。<sup>1</sup> 保护河流、湖泊等天然水系,加快水利基础设施建设,构建覆盖保定全境的水系网络,提高获取地表水资源的能力。<sup>2</sup> 加大生态系统和环境保护力度,因地制宜地植树造林,扩大森林、绿地面积,以涵养水源、防治水土流失。

(2) 针对承载脆弱性主导型地区,则要对现有地表水资源制定科学合理的利用方案,缓解供需矛盾。

<sup>1</sup> 严格控制用水总量,建立科学的水资源有偿使用机制,防止地表水资源过度使用。<sup>2</sup> 控制区域人口数量,尤其是要限制城市人口增长,降低城市人口密度。<sup>3</sup> 工业上限制高污染、高消耗的产品和设备,推动企业加快生产工艺的升级换代,促进产业绿色发展。<sup>4</sup> 农业上加强农民节水意识,大力发展节水灌溉技术,实现地表水资源的最大化利用。<sup>5</sup> 社会上宣传节水知识,树立人水和谐的节水理念,引导居民节约用水,建设节水型社会。

## 5 结语

保定市域是典型的资源型缺水地区,当前经济高速增长、人口剧烈膨胀、用水需求持续提高,水资源已成为制约地区可持续发展的主要因素。基于综合指数法,构建了一套评价指标体系,结合层次分析法及 GIS/RS 技术,对保定市地表水资源脆弱性进行定量评价。评价结果显示,保定市总体地表水资源脆弱性问题较为突出,且主要集中在保定市西北部、西部、中部偏东及东南部地区。根据脆弱性结构,将这些地区分成自然脆弱性主导型地区、人为脆弱性主导型地区和承载脆弱性主导型地区三类,不

同的脆弱性主导类型宜采取相应的适应性对策,以降低其水资源脆弱性。研究结果可供保定市制定科学合理的用水规划与政策参考,同时对于北方其它地区的水资源脆弱性分析与评价,也具有一定的借鉴意义。

#### 参考文献(References):

- [1] ZHANG J Y, WANG L C. Assessment of water resource security in Chongqing City of China: What has been done and what remains to be done? [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2751-2772. DOI: 10.1007/s11069-014-1460-5.
- [2] 谢家泽, 陈志恺. 中国水资源[J]. *地理学报*, 1990, 45(2): 210-219. (XIE J Z, CHEN Z K. Water resources in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(2): 210-219. (in Chinese))
- [3] 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 L P, XIA J, HU Z F. Situation and problem analysis of water resources security in China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [4] 王道波, 张广录, 周晓果. 华北水资源利用现状及其宏观调控对策研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2005, 19(2): 46-51. (WANG D B, ZHANG G L, ZHOU X G. Study on situation of water resources utilization in North China and its macroscopical countermeasures[J]. *Journal of Land Resources and Environment*, 2005, 19(2): 46-51. (in Chinese))
- [5] 林奇胜, 刘红萍, 张安录. 论我国西北干旱地区水资源持续利用[J]. *地理与地理信息科学*, 2003, 19(3): 54-58. (LIN Q S, LIU H P, ZHANG A L. Sustainable exploitation of water resources in China's northwest drought district[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2003, 19(3): 54-58. (in Chinese))
- [6] 王晓青. 中国水资源短缺地域差异研究[J]. *自然资源学报*, 2001, 16(6): 516-520. (WANG X Q. A study on regional difference of fresh water resources shortage in China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(6): 516-520. (in Chinese))
- [7] SASTRY G S, RAJ K G, PAUL M A, et al. Desertification vulnerability assessment model for a resource rich region: A case study of Bellary district, Karnataka, India[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 45(5): 1-13. DOI: 10.1007/s12524-016-0641-y.
- [8] 刘倩倩, 陈岩. 基于熵权法的流域水资源脆弱性评价——以淮河流域为例[J]. *长江科学院院报*, 2016, 33(9): 10-17. (LIU Q Q, CHEN Y. Assessing the vulnerability of basin water resources based on entropy weight method: A case study of Haihe River Basin[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2016, 33(9): 10-17. (in Chinese)) DOI: 10.11988/ckyyb.20150591.
- [9] 邹君, 杨琴. 基于GIS/RS的衡阳盆地农村水资源系统脆弱性动态演变研究[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(12): 1597-1604. (ZOU J, YANG Q. Evaluation of the vulnerability of rural water resources system in Hengyang Basin based on GIS and RS[J]. *Chinese Journal of Eco Agriculture*, 2015, 23(12): 1597-1604. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150606.
- [10] GROSBOS D D, PLUMMER R. Problematizing water vulnerability indices at a local level: A critical review and proposed solution[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(14): 5015-5035. DOI: 10.1007/s11269-015-1101-0.
- [11] 邹君, 郑文武, 杨玉蓉. 基于GIS/RS的南方丘陵区农村水资源系统脆弱性评价——以衡阳盆地为例[J]. *地理科学*, 2014, 34(8): 1010-1017. (ZOU J, ZHANG W W, YANG Y R. Evaluation of water resources system vulnerability in southern hilly rural region based on the GIS/RS-Take Hengyang Basin as an example[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8): 1010-1017. (in Chinese)) DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.08.004.
- [12] 宁理科, 刘海隆, 包安明. 塔里木河流域水资源系统脆弱性定量评价研究[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(5): 266-270. (NING L K, LIU H L, BAO A M. Quantitative study of water resources system vulnerability in Tarim River Basin[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 266-270. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2013.05.012.
- [13] FARLEY K A, TAGUE C, GRANT G E. Vulnerability of water supply from the Oregon Cascades to changing climate: Linking science to users and policy[J]. *Global Environmental Change*, 2011, 21(1): 110-122.
- [14] BABEL M S, PANDEY V P, RIVAS A A, et al. Indicator based approach for assessing the vulnerability of freshwater resources in the Bagmati River basin, Nepal[J]. *Environmental Management*, 2011, 48(5): 1044-1059.
- [15] 邹君, 刘兰芳, 田亚平, 等. 地表水资源的脆弱性及其评价初探[J]. *资源科学*, 2007, 29(1): 92-98. (ZOU J, LIU L F, TIAN Y P, XIE X L. Concept and quantitative assessment of vulnerability of surface water resource[J]. *Resources Science*, 2007, 29(1): 92-98. (in Chinese))
- [16] 陈仁杰, 钱海雷, 袁东, 等. 改良综合指数法及其在上海市水源水质评价中的应用[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(2): 431-437. (CHEN R J, QIAN H L, YUAN D, et al. Improved comprehensive index method and its application to evaluation of source water quality in Shanghai[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(2): 431-437. (in Chinese))
- [17] 张强. 保定市水资源现状分析及发展对策探析[J]. *地下水*, 2016, 38(4): 178-179. (ZHANG Q. Analysis of current situation and development countermeasures of water resources in Baoding City[J]. *Ground Water*, 2016, 38(4): 178-179. (in Chinese))
- [18] 吕彩霞, 仇亚琴, 贾仰文, 等. 海河流域水资源脆弱性及其评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(1): 55-59. (LV C X, QIU Y Q, JIA Y W, et al. Water resources vulnerability and its assessment of Haihe River Basin[J]. *South to North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2012, 10(1): 55-59. (in Chinese))
- [19] 夏军, 翁建武, 陈俊旭, 等. 多尺度水资源脆弱性评价研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2012, 20(s1): 1-14. (XIA J, WENG J W, CHEN J X, et al. Multi-scale water vulnerability assessment research[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(s1): 1-14. (in Chinese))
- [20] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 211-218. (LIU Y J, LIU J G, ZHAO X, et al. Assessment of vulnerability of water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 211-218. (in Chinese)) DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.036.