

# 云南省滇中地区水资源脆弱性评价

冯少辉<sup>1</sup>,李靖<sup>1,2</sup>,朱振峰<sup>1</sup>,仲远见<sup>1</sup>,雷兴刚<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学水资源与节水灌溉重点实验室,云南 昆明 650201;2. 云南农业大学建筑工程学院,云南 昆明 650204)

**摘要** 阐明水资源脆弱性的概念和内涵,提出水资源脆弱性评价指标的构建原则。以云南滇中为例,构建滇中地区在水循环、社会经济和生态环境领域内的水资源脆弱性评价指标体系,运用相对偏差距离最小法对滇中地区的水资源脆弱度进行分析评价。研究结果表明:滇中地区的水资源脆弱度普遍偏高,除丽江外,其他地区水资源介于中度脆弱与重度脆弱之间。

**关键词** 水资源评价 脆弱性 指标体系 滇中地区 云南省

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1004-693X(2010)01-0013-04

## Study on water resources vulnerability assessment in Central Yunnan

FENG Shao-hui<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1,2</sup>, ZHU Zhen-feng<sup>1</sup>, ZHONG Yuan-jian<sup>1</sup>, LEI Xing-gang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Water Resources and Water-Saving Irrigation, Yunnan Agriculture University, Kunming 650201, China;2. College of Architectural Engineering, Yunnan Agriculture University, Kunming 650204, China)

**Abstract**: Based on analysis of the research results of water resources vulnerability both at home and abroad, the concept and implications of water resources vulnerability were further examined and construction principles of assessment indexes of water resources vulnerability are proposed. On this basis, Central Yunnan was used as an example to establish an index system of water resources vulnerability assessment in terms of the water cycle, socio-economic status, and ecological environment. With the minimum relative deviation distance method, the water resources vulnerability of Central Yunnan was analyzed and assessed. The results showed that the water resources of Central Yunnan were generally highly vulnerable. The water resources of regions other than Lijiang showed statuses ranging from moderate vulnerability and severe vulnerability.

**Key words**: water resources assessment; vulnerability; index system; Central Yunnan; Yunnan Province

近年来,由于全球气候变化及人类活动的加剧,区域水资源呈现出易于遭受影响和破坏并缺乏恢复能力的性质,水资源研究领域的学者们将这种性质称之为水资源脆弱性。国内外对水资源脆弱性的评估刚刚起步,亟待进一步深入开展研究。

水资源总量相对丰富的云南省,同样面临着水资源开发利用与经济不平衡的问题。尤其是在人口集中、经济发达的滇中地区,由于水资源短缺和水环境恶化等问题日益突出,水资源的脆弱程度极其显著,区域水资源的安全面临着严峻挑战,已威胁到区

域社会、资源与经济的可持续发展,因此重点开展该区域水资源的脆弱性研究具有重要的现实意义和理论价值。

### 1 水资源脆弱性概念及内涵

#### 1.1 水资源脆弱性概念

水资源脆弱性是水资源特性中一个独特性质,脆弱性是水资源可持续开发利用的障碍,脆弱度越大,越不利于可持续发展<sup>[1]</sup>。在参考国内外水资源脆弱性研究的基础上,笔者认为水资源脆弱性是指

基金项目:云南省干热地区水资源特性研究课题(YSZY-2003-02);联合国人居署亚洲城市水资源计划项目(UN-WCDM07A05);云南省高校学术带头人基金项目(07YN0012)

作者简介:冯少辉(1980—),女,河北邢台人,硕士研究生,研究方向为区域水资源可持续开发利用。E-mail: fshui815@163.com

通讯作者:李靖,教授。E-mail: lijing69@mail.com

在一定社会历史和科学技术发展阶段,某一地区的水资源在服务于社会经济领域和生态环境领域中易于受到人类活动、自然灾害影响和破坏的性质和状态,受损后缺乏恢复到初始状态的能力的性质<sup>[2-10]</sup>。

## 1.2 水资源脆弱性内涵

水资源脆弱性是系统在特定的情况下表现出的一种变化趋势,当区域水资源承受的负荷超出了现有社会经济和科技水平条件下水资源系统的自我调节能力时,水资源就表现出一种易于遭受危险和损失的脆弱性,而水资源系统脆弱性一旦突破其承载阈值,就很难恢复到初始状态,无法满足区域社会经济对资源的需求。

水资源系统的脆弱性是由其自身特性决定的,一是因为水资源系统自身具有不稳定性,二是外界干扰对水资源系统的影响,据此可以将水资源脆弱性按成因分为自然脆弱性和扰动脆弱性。在参考水资源相关研究<sup>[11-17]</sup>的基础上,结合水资源脆弱性的定义和分类,笔者将水资源脆弱性的研究领域分为水循环领域、社会经济领域和生态环境领域。

**自然脆弱性:**自然脆弱性是水资源系统内部固有的、外界干扰难以使水资源系统发生改变的性质<sup>[4]</sup>。自然脆弱性突出反映在水循环领域内水量和水质上,将水质和水量作为水循环领域的表征指标,结合水文要素和自然地理条件建立指标体系。

**扰动脆弱性:**扰动脆弱性是水资源系统外部环境扰动对系统造成的不利影响。扰动脆弱性主要体现在社会经济领域和生态环境领域。在社会经济领域内,水资源脆弱性直接体现在用水水平上;人均用水量是表征用水水平的一个宏观指标。具体来讲,社会经济领域的脆弱性还可以从社会经济状况、用水定额和用水效率等方面来描述。水资源脆弱性在生态环境领域的突出表现在水体污染上,生态环境现状和资源的利用程度也影响着水资源的脆弱性。

## 2 实例分析

### 2.1 研究区概况

滇中地区即云南省的中心腹地,滇中主要指昆明市(除东川区外)、玉溪市(除峨山县、新平县、元江县外)、楚雄州(除双柏县、永仁县外)、曲靖市(除宣威市、会泽县、罗平县、师宗县、富源县外)、大理白族自治州(除云龙县、永平县外)、红河州(除河口县、红河县、屏边县、元阳县、金平县、绿春县外)以及丽江地区的永胜县等49个县(市、区)。

滇中作为云南省的人口聚集区和经济核心区,经济发展处于云南省领先水平。2000年滇中地区的人均GDP为7745元,分别是全省、全国水平的

1.7、1.1倍,但人均水资源量仅为全省平均水平的31%<sup>[18]</sup>。随着经济的进一步发展,滇中地区工农业用水需求量增大以及生活、工业废水的未达标排放,水资源短缺和水环境恶化等问题日益突出。

### 2.2 评价指标体系的构建

评价指标的建立是水资源脆弱性评价的关键步骤。确定水资源系统脆弱性的评价指标,要遵循以下指标体系构建原则:①科学性原则:指标体系应建立在科学基础之上,能够较客观、真实地反映系统的内涵,较好地度量水资源脆弱性的基本特征。②完备性原则:指标体系要覆盖面广,不应遗漏任何一项重要的指标,能够全面、毫无遗漏地反映水资源系统的脆弱性。③主导性原则:建立指标时应尽量选择对水资源脆弱性起主导作用的指标,用以反映水资源脆弱性最主要的特点。④相互独立性原则:在同一层次的各项指标必须不存在任何包含与被包含的关系,相互不重叠。⑤可操作性和可比性原则:计算所需数据应该易于从各种渠道获得,在统计和计算上具有一致性才能确保最终结果的可比性。⑥区域性原则:脆弱性的评价是针对某一特定区域而言的,在建立水资源脆弱性评价指标时应该充分考虑该区域水资源系统特点及自然环境和社会经济发展状况。

要建立滇中地区水资源脆弱性评价指标体系,应先对水资源系统进行研究。水资源总量为地表水资源量和地下水资源量之和扣减相互转换的重复水量。云南省位于青藏高原东南侧,地势高耸,山高谷深,地形分布以山地为主,山地占全省土地面积的84%。山丘区水资源总量为已还原的河川径流量(地表水资源量)与地下水总排泄量(地下水资源量)之和扣减河川基流量;山丘区若对河川径流进行地下水开采净消耗的还原,其还原水量是地表水和地下水间的重复计算量;云南省地下水主要以河川基流形式排泄,其他排泄量很小,可以将河川径流量(地表水资源量)近似作为水资源总量<sup>[19]</sup>。结合云南省水资源特征和滇中区域特点,从水循环领域、社会经济领域和生态环境领域建立水资源脆弱性评价指标体系(见图1)。在所建立的指标体系中, $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_6$ 、 $C_{11}$ 、 $C_{13}$ 、 $C_{16}$ 为负向指标,其值越大,脆弱性越小;其余指标为正向指标。

### 2.3 脆弱度评价方法

目前,针对多层次、多目标、大系统的指标评价方法有很多,它们都可以用来进行水资源脆弱性的评价。笔者采用相对偏差距离最小法对滇中地区水资源进行脆弱度计算。

设矩阵  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  是  $n$  个评价因素集合,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$  是待评价的  $m$  个方案集合,

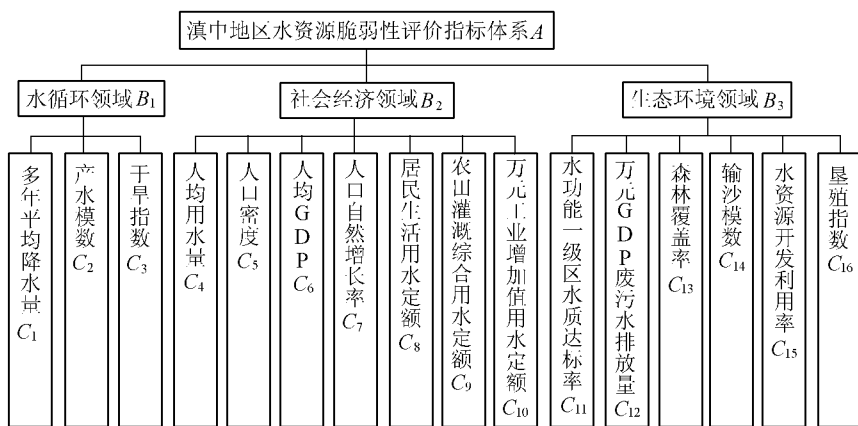


图 1 滇中地区水资源脆弱性评价指标体系

将  $U$  中的每个因素进行衡量得到一个观测值矩阵。

#### a. 建立理想方案

$$u = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0)$$

其中

$$u_i^0 = \begin{cases} \max\{a_{ij}\} & \text{当 } a_{ij} \text{ 为效益型指标} \\ \min\{a_{ij}\} & \text{当 } a_{ij} \text{ 为成本型指标} \end{cases} \quad (1)$$

#### b. 建立相对偏差模糊矩阵 $R$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix}$$

其中

$$r_{ij} = \frac{|a_{ij} - u_i^0|}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}} \quad (2)$$

确定各评价指标权重

各指标权重的确定采用层次分析法,限于篇幅,

其具体计算方法见文献 [20], 指标权重的确定采用 Satty 9 级标度法评分标准,经咨询专家确定两两指标的相对重要性,其权重计算结果见表 1。

#### c. 综合评价模型建立计算

$$F_j = \sum_{i=1}^n \omega_i r_{ij} \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (3)$$

水资源脆弱度

$$V_j = 1 - F_j \quad (j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

### 2.4 脆弱度计算

本文结合现状水平年 2000 年滇中地区情况,得到滇中地区水资源脆弱性各评价指标的数值,如表 1 所示。其中,指标  $C_{13}$ 、 $C_{16}$  数据来源于《云南统计年鉴(2001)》,其余数据源自文献 [18]。将滇中地区水资源脆弱性各指标值代入上述计算模型,即可分析得到各地区的水资源脆弱度。具体计算结果见表 1。

### 2.5 脆弱度结果分析

根据上述评价结果,结合滇中地区的水资源状

表 1 滇中地区水资源脆弱性评价指标、权重、原始值及评价结果

| 地区  | $C_1/\text{mm}$                            | $C_2/(\text{万 m}^3 \cdot \text{km}^{-2})$ | $C_3$                                    | $C_4/(\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1})$ | $C_5/(\text{人} \cdot \text{km}^{-2})$    | $C_6/(\text{元} \cdot \text{人}^{-1})$ | $C_7/\%$    | $C_8/(\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ | $C_9/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ |
|-----|--------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|-------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 昆明  | 980                                        | 30.28                                     | 1.12                                     | 343                                    | 227                                      | 10960                                | 12.42       | 158                                                      | 535                                     |
| 曲靖  | 994                                        | 35.90                                     | 1.08                                     | 382                                    | 215                                      | 6224                                 | 14.82       | 88                                                       | 562                                     |
| 玉溪  | 909                                        | 19.68                                     | 1.28                                     | 361                                    | 227                                      | 18153                                | 12.50       | 101                                                      | 546                                     |
| 楚雄  | 895                                        | 21.95                                     | 1.39                                     | 391                                    | 98                                       | 4218                                 | 8.64        | 77                                                       | 578                                     |
| 红河  | 998                                        | 28.32                                     | 1.24                                     | 277                                    | 157                                      | 4324                                 | 14.33       | 93                                                       | 499                                     |
| 大理  | 1002                                       | 31.24                                     | 1.12                                     | 375                                    | 134                                      | 4129                                 | 10.57       | 78                                                       | 538                                     |
| 丽江  | 929                                        | 29.54                                     | 1.31                                     | 545                                    | 77                                       | 2096                                 | 8.80        | 68                                                       | 516                                     |
| 权重值 | 0.0595                                     | 0.1078                                    | 0.0328                                   | 0.0758                                 | 0.1997                                   | 0.0132                               | 0.0208      | 0.0348                                                   | 0.0208                                  |
| 地区  | $C_{10}/(\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1})$ | $C_{11}/\%$                               | $C_{12}/(\text{t} \cdot \text{万元}^{-1})$ | $C_{13}/\%$                            | $C_{14}/(\text{t} \cdot \text{km}^{-2})$ | $C_{15}/\%$                          | $C_{16}/\%$ | 脆弱度                                                      |                                         |
| 昆明  | 267                                        | 68.40                                     | 107.79                                   | 51.01                                  | 441.26                                   | 32.54                                | 21.92       | 0.613                                                    |                                         |
| 曲靖  | 148                                        | 69.20                                     | 65.84                                    | 47.02                                  | 349.06                                   | 24.13                                | 24.71       | 0.489                                                    |                                         |
| 玉溪  | 36                                         | 98.00                                     | 19.27                                    | 49.55                                  | 635.61                                   | 44.43                                | 20.23       | 0.546                                                    |                                         |
| 楚雄  | 214                                        | 75.00                                     | 77.82                                    | 65.93                                  | 1314.29                                  | 18.16                                | 12.19       | 0.481                                                    |                                         |
| 红河  | 180                                        | 47.40                                     | 90.47                                    | 48.12                                  | 610.28                                   | 14.83                                | 21.89       | 0.518                                                    |                                         |
| 大理  | 183                                        | 40.00                                     | 48.15                                    | 59.78                                  | 961.50                                   | 16.57                                | 12.79       | 0.441                                                    |                                         |
| 丽江  | 437                                        | 78.00                                     | 0.42                                     | 42.42                                  | 529.50                                   | 14.07                                | 24.68       | 0.352                                                    |                                         |
| 权重值 | 0.0348                                     | 0.1644                                    | 0.1138                                   | 0.0559                                 | 0.0188                                   | 0.0335                               | 0.0136      |                                                          |                                         |

况,可以将脆弱度分为5个等级:不脆弱( $<0.3$ )、轻度脆弱( $0.3\sim0.4$ )、中度脆弱( $0.4\sim0.6$ )、重度脆弱( $0.6\sim0.7$ )、极度脆弱( $>0.7$ )。从评价结果可以看出,滇中地区7个地州水资源的脆弱性差异比较大,昆明属于重度脆弱区,丽江属于轻度脆弱区,其他地区属于中度脆弱区(图2)。

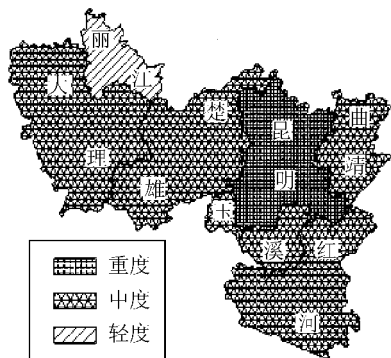


图2 滇中地区水资源脆弱度分区

### 3 结论与建议

研究结果表明,滇中地区整体水资源脆弱性程度较高,研究区按脆弱度由大到小排序为:昆明、玉溪、红河、曲靖、楚雄、大理、丽江。

7个地州中有6个为中度脆弱以上,其中昆明地区为水资源重度脆弱区。从空间上来看,滇中东部地区昆明、曲靖、玉溪和红河水资源脆弱度较大,西部地区楚雄、大理和丽江脆弱度相对较小,而丽江地区的水资源脆弱度最小。滇中东部地区人口密集,产业发达,工农业用水需求量大,除玉溪市外,昆明、曲靖和红河水质恶化的现象都比较严重。这从一定程度上说明滇中地区经济发展与水资源的不协调,水资源总体上呈现出比较突出的脆弱性。

针对滇中地区水资源脆弱性现状,研究分析提出如下建议。

a. 滇中地区的水资源开发利用率高,已超过全国平均水平,要解决滇中地区水资源短缺,必须采取切实有力的措施,加大节水力度,形成全民、全社会共同节水的良好风气,建立节水型社会。

b. 据滇中水资源研究表明,滇中地区是云南省水污染最严重的区域。污水处理及回用既是缓解滇中地区水环境恶化的有效措施,还可以解决滇中地区水资源短缺问题。

c. 滇中地区人口密度大,为了缓解人口密集给水资源带来的压力,降低水资源脆弱度,应该严格控制人口自然增长率,促进经济社会和水资源的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 王明泉,张济世,程中山.黑河流域水资源脆弱性及可持续发展研究[J].林业调查规划,2007,13(2):114-116.
- [2] GOGU R C, DASSARGUES A. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods[J]. Environmental Geology, 2000, 39(6): 549-559.
- [3] 刘绿柳.水资源脆弱性及其定量评价[J].水土保持通报,2002,22(2):41-44.
- [4] 邹君,杨玉蓉,谢小立.地表水资源脆弱性:概念、内涵及定量评价[J].水土保持通报,2007,27(2):132-135,145.
- [5] 杨燕舞,张雁秋.水资源的脆弱性及区域可持续发展[J].苏州城建环保学院学报,2002,15(4):85-88.
- [6] 郭跃东,何沿,邓伟,等.扎龙河滨湿地水系统脆弱性特征及影响因素分析[J].湿地科学,2004,2(1):47-53.
- [7] 李凤霞,郭建平.水资源脆弱性的研究进展[J].气象科技,2006,34(6):731-734.
- [8] 邹君,谢小立.中国南方水资源脆弱区农业水资源管理方略探讨[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):158-163.
- [9] 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.
- [10] 王介勇,赵庚星,王祥峰,等.论我国生态环境脆弱性及其评估[J].山东农业科技,2004(2):9-11.
- [11] 左东启,吴泽宁.基于风险的黄河流域水资源可再生性评价指标[J].人民黄河,2003,25(1):38-40.
- [12] 李剑颖.官厅水库流域水资源脆弱性评价研究[D].北京:北京师范大学,2007.
- [13] 左东启,戴树声,袁汝华,等.水资源评价指标体系研究[J].水科学进展,1996,7(4):367-373.
- [14] 袁鹰,甘泓,汪林,等.水资源承载能力三层次评价指标体系研究[J].水资源与水工程学报,2006,17(3):13-17.
- [15] 邹君,杨玉蓉,田亚平,等.南方丘陵区农业水资源脆弱性概念与评价[J].自然资源学报,2007,22(2):302-310.
- [16] 邹君,谢小立.亚热带丘岗区地表水资源脆弱性评估与管理:以衡阳盆地为例[J].长江流域资源与环境,2007,16(3):303-307.
- [17] 吴青,周艳丽.黄河河源区生态环境变化及水资源脆弱性分析[J].水资源保护,2002(2):21-24.
- [18] 伍立群,顾世祥.滇中水资源研究[M].昆明:云南科技出版社,2005:3-41.
- [19] 云南省水利厅.云南省水资源综合规划水资源调查评价专题报告(水资源四级区)[R].昆明:云南省水利厅,2007.
- [20] 李柏年.模糊数学及其应用[M].合肥:合肥工业大学出版社,2007:103-117.

(收稿日期:2008-12-24 编辑:高渭文)