

# 黄土高原小流域雨水资源承载能力综合评价\*

赵西宁 冯浩 吴普特 王万忠

(西北农林科技大学 中国科学院 水土保持研究所 杨陵 712100)  
水利部

**摘要** 研究提出黄土高原小流域雨水资源承载能力的概念,建立了小流域雨水资源承载能力综合评价模型和评价指标体系,并利用所建模型对黄土高原11个国家科技攻关试验区小流域雨水资源承载能力进行综合评价。

**关键词** 小流域 雨水资源 承载能力 模型 综合评价

**Comprehensive evaluation of the rainwater resources-carrying capacity of small watershed of Loess Plateau.** ZHAO Xi-Ning, FENG Hao, WU Pu-Te, WANG Wan-Zhong (Northwest Agricultural and Forestry University; Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China), *CJEA*, 2006, 14(3): 33~35

**Abstract** The definition of the carrying capacity of rainwater resources in small watershed of Loess Plateau is put forward and the evaluation model and index system of rainwater resources-carrying capacity are established. The model is applied to evaluate the rainwater resources-carrying capacity of 11 experimental small watersheds on the Loess Plateau.

**Key words** Small watershed, Rainwater resources, Carrying capacity, Model, Comprehensive evaluation

(Received Oct. 15, 2004; revised Dec. 1, 2004)

近年来,针对黄土高原水资源严重短缺态势和生态环境建设需要,雨水资源利用这一古老水资源利用技术逐渐受到人们关注和重视,其中以甘肃“121 雨水集流”工程、陕西“甘露”工程、宁夏南部“窑窖农业”最为典型<sup>[1]</sup>。实践证明,雨水资源利用不仅能解决居民生活用水问题,而且通过补灌能在一定程度上抵御旱灾,保障农业生产稳产、丰产,提高粮食生产安全性。土地生产力的提高使该区退耕还林(草)成为可能,雨水资源利用也为退耕还林(草)提供了水源,因此雨水资源利用不仅是解决干旱缺水的临时权益之计,而且是一种可持续综合发展模式,是一项战略性措施。更重要的是,它引发了人们对传统水资源概念及其理论的重新认识。通过雨水资源利用,认识到雨水资源总量才是水资源总量,地表水与地下水由其转化而来,属于雨水派生的资源<sup>[2,3]</sup>。基于此概念对水资源进行评价,其结果对于合理开发利用水资源更具有理论和现实意义。为保证雨水资源能够持续利用,必须对雨水资源可承载能力做出合理评价。目前,在以小流域为单元的雨水资源利用和生态环境建设中,尚无适宜评价指标体系及方法来确定雨水资源承载能力。针对此问题,本研究以小流域为单元,以雨水资源为研究对象,在对雨水资源承载能力概念阐述基础上,运用均方差权数决策方法,对雨水资源承载能力进行综合评价,并以黄土高原水土流失区11个国家科技攻关试验小流域为例进行实证研究,以便为实现雨水资源可持续利用和保证流域生态环境健康发展奠定基础。

## 1 小流域雨水资源承载能力及综合评价

小流域是黄土高原主要地貌单元,是一个完整的自然集水单元。由于该区黄土层深厚,包气带土层厚度一般在十几米到百米之间,外来地下水对流域水资源补给作用非常微弱,常可以忽略不计。因此雨水是小流域尺度上水资源的唯一来源,流域内各种形式的地表水、土壤水、地下水都是雨水经过转化而形成的。基于上述小流域雨水资源特点并借鉴前人对水资源承载力研究基础<sup>[4,5]</sup>,本研究将小流域雨水资源承载能力定义为:在一定历史发展阶段和科学技术水平条件下,某一流域的雨水资源所能够承载的人口、社会经济和资源环境相互协调持续发展的最大水平。它是一个动态的概念,在不同历史发展阶段,由于受到自然、社

\* 中国科学院水利部水土保持研究所领域前沿项目(SW05503)、西北农林科技大学博士专项基金项目资助

收稿日期:2004-10-15 改回日期:2004-12-01

会、经济及资源环境等因素制约,流域雨水资源可承载能力是不同的,并且是有限的。

评价指标选取。建立能够从各方面综合体现与衡量雨水资源承载能力的评价指标体系是进行小流域雨水资源承载能力综合评价的前提和基础。由于雨水资源承载能力影响因素多样,因而选取评价指标时,应从众多影响因素中选取最灵敏和最便于度量的主导性因素,并能去除重复性因素作用。在综合分析相关研究成果基础上<sup>[6,7]</sup>,结合黄土高原小流域雨水资源特点,从雨水资源与人口、社会经济发展和生态环境建设的匹配状况来分析承载能力,匹配程度越高,表明流域社会经济发展和生态环境建设与雨水资源利用越协调,承载能力越大。选取下面 4 个因素作为评价指标,  $u_1$  为人均雨水资源占有量,  $u_2$  为单位粮食占有雨水资源量,  $u_3$  为单位收入占有雨水资源量,  $u_4$  为单位林草面积占有雨水资源量。  $u_1$  反映雨水资源对人口发展的保障能力,  $u_2$  和  $u_3$  反映雨水资源对经济发展的保障能力,  $u_4$  可认为是反映雨水资源对生态环境的保障能力。

评价指标无量纲化处理。设小流域雨水资源承载能力综合评价方案集为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , 具体评价指标集为  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ , 方案  $A_i$  对指标  $U_j$  属性值为  $Y_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ ,  $Y = (y_{ij})_{n \times m}$  表示方案对指标集的“属性矩阵”或“决策矩阵”。由于评价指标体系量纲不同,指标功能也不同,并且指标间数量差异较大,使得不同指标在量上不能直接进行比较,必须对统计指标进行无量纲化处理,无量纲化方法如下:

$$Z_{ij} = (y_{ij} - y_{j\min}) / (y_{j\max} - y_{j\min}) \quad (1)$$

式中,  $y_{j\max}$ 、 $y_{j\min}$  分别为指标  $U_j$  的最大值和最小值。

评价指标权重确定。指标权重确定在小流域雨水资源承载能力综合评价中占有非常重要位置,权重系数大小对评价结果十分重要,它反映了各指标的相对重要性。利用层次分析法(AHP)确定指标权重已得到多方面应用,该法系统性和可靠性较高,但在专家咨询和打分结合试验判断时,易产生指标量度把握不准或丢失部分有用信息,客观性较差。为此,本研究采用均方差决策综合分析方法<sup>[8]</sup>确定各评价指标因素权重。均方差决策反映随机变量离散程度,最重要和最常用的指标是该随机变量的均方差,其基本思路是以各评价指标为随机变量,各方案  $A_i$  在指标  $U_j$  下的无量纲化属性值为该随机变量取值,首先求出该随机变量均方差,将这些均方差归一化,结果即为各指标权重系数,计算步骤如下。随机变量的均值为:

$$E(U_j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i \quad (2)$$

指标  $U_j$  的均方差为:

$$\sigma(U_j) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [Z_{ij} - E(U_j)]^2} \quad (3)$$

指标  $U_j$  的权重系数为:

$$W_j = \sigma(U_j) / \sum_{j=1}^m \sigma(U_j) \quad (4)$$

综合评价模型的建立。雨水资源可承载能力评价指标体系中各单项指标均从不同侧面反映流域雨水资源承载能力状况,因而须对流域雨水资源承载能力总体状况进行综合评价。本研究采用多目标线性加权函数法进行评价:

$$D = \sum_{j=1}^m Z_{ij} \times W_j \quad (5)$$

式中,  $D$  为流域雨水资源可承载能力综合评价值,  $Z_{ij}$  为无量纲化的评价指标值,  $W_j$  为选取的第  $j$  指标所占权重系数。

## 2 实例分析

以设立在黄土高原水土流失区 11 个国家科技攻关试验区小流域为例,对雨水资源承载能力进行综合评价。这 11 个试验区小流域分别代表黄土高原不同社会、生态、经济典型地区,是黄土高原小流域水土流失综合治理的典型代表。表 1 列出 11 个试验区小流域相应评价指标统计值<sup>[1]</sup>。用表 1 中的数据资料,采用上述综合评价模型对 11 个小流域雨水资源承载能力进行综合评价,求出综合评价值,其结果见表 1。

由 11 个试验区小流域雨水资源承载能力综合评价值可知,固原试区雨水资源承载能力综合评价值最高,隰县试区次之,长武试区最小。综合评价值实质上是各评价指标因素的线性加权,其值越大,代表相应

流域雨水资源承载能力越强,故固原试区雨水资源承载能力最强。由表 1 可看出,各试区小流域多年平均降雨量与雨水资源承载能力综合评价排序并不相符,如长武试区多年平均降雨量为 584.1mm,固原试区仅为 475.0mm,但长武试区雨水资源承载能力综合评价值仅为 0.1460,远低于固原试区综合评价值 0.5736,这主要是由于各试区人均雨水资源占有量、单位粮食占有雨水资源量、单位收入占有雨水资源量、单位林草面积占有雨水资源量等指标差异所造成的。针对上述黄土高原小流域雨水资源承载能力较低情况,有必要采取诸如提高雨水资源利用率和利用效率、调整流域产业结构等措施予以解决,确保雨水资源持续高效利用。

表 1 评价指标统计值和评价结果

Tab.1 Evaluation indexes characteristic values and results

| 序号<br>No. | 试区名称<br>Demonstration<br>area | 年均降雨<br>量/mm<br>Mean<br>annual<br>rainfall | 人均雨水资源占<br>有量( $u_1$ )/ $m^3 \cdot 人^{-1}$<br>Rainfall of<br>every person | 单位粮食占有雨水<br>资源量( $u_2$ )/ $m^3 \cdot kg^{-1}$<br>Rainfall of<br>unit output | 单位收入占有<br>雨水资源量<br>( $u_3$ )/ $m^3 \cdot 百元^{-1}$<br>Rainfall of<br>unit income | 单位林草面积<br>占有雨水资源量<br>( $u_4$ )/ $万 m^3 \cdot km^{-2}$<br>Rainfall of unit<br>vegetation<br>cover area | 综合评价值(D)<br>Comprehensive<br>evaluation<br>values | 排序结果<br>Range<br>results |
|-----------|-------------------------------|--|---|---|---|---|---|--------------------------|
| 1         | 准 旗                           | 400.0                                      | 6794  | 5.71  | 404   | 30.0  | 0.3974  | 5                        |
| 2         | 米 脂                           | 425.0                                      | 2345  | 4.76  | 179   | 36.6  | 0.2854  | 8                        |
| 3         | 离 石                           | 492.5                                      | 2271  | 5.04  | 188   | 40.4  | 0.2230  | 9                        |
| 4         | 安 塞                           | 541.2                                      | 6949  | 12.32   | 414   | 46.5  | 0.4320  | 3                        |
| 5         | 长 武                           | 584.1                                      | 1949  | 6.86  | 125   | 50.2  | 0.1460  | 11                       |
| 6         | 隰 县                           | 538.3                                      | 4294  | 4.57  | 338   | 44.1  | 0.4628  | 2                        |
| 7         | 淳 化                           | 600.6                                      | 3185  | 4.88  | 130   | 51.6  | 0.4100  | 4                        |
| 8         | 乾 县                           | 584.2                                      | 2425  | 4.13  | 167   | 43.8  | 0.3721  | 6                        |
| 9         | 固 原                           | 475.0                                      | 5931  | 7.84  | 343   | 38.9  | 0.5736  | 1                        |
| 10        | 西 吉                           | 402.2                                      | 2946  | 3.28  | 250   | 32.9  | 0.3267  | 7                        |
| 11        | 定 西                           | 415.5                                      | 1908  | 3.19  | 161   | 34.0  | 0.1862  | 10                       |

### 3 小 结

针对黄土高原雨水资源利用现状和小流域雨水资源特点,提出小流域雨水资源承载能力的概念。并从雨水资源与人口、社会经济发展、生态环境建设的匹配状况,选取人均雨水资源占有量、单位粮食占有雨水资源量、单位收入占有雨水资源量、单位林草面积占有雨水资源量等指标构建评价指标体系,利用均方差权数决策方法,对流域雨水资源承载能力进行分析探讨。并以黄土高原水土流失区 11 个国家科技攻关试验小流域为例,对雨水资源承载能力进行综合评价。这些分析探讨是对雨水资源可持续利用理论的丰富和发展,并可为黄土高原雨水资源可持续利用和保证流域生态环境健康发展提供一定的理论依据。

### 参 考 文 献

- 1 吴普特,黄占斌,高建恩.人工汇集雨水利用技术研究.郑州:黄河水利出版社,2002.1~48
- 2 刘昌明,牟海省.我国水资源可持续开发中的雨水利用.中国雨水利用研究文集.北京:中国矿业大学出版社,1998.1~7
- 3 徐乾清.对雨水利用的几点认识.中国雨水利用研究文集.北京:中国矿业大学出版社,1998.8~11
- 4 姚治君,王建华,江 东等.区域水资源承载力的研究进展及其理论分析.水科学进展,2002,13(1):111~115
- 5 王顺久,侯 玉,张欣莉等.流域水资源承载力的综合评价方法.水利学报,2003(1):88~92
- 6 汪党献,王 浩,马 静.中国区域发展的水资源支撑能力.水利学报,2000(11):21~26
- 7 冯 浩,邵明安,吴普特.黄土高原小流域雨水资源化潜力计算方法及评价初探.自然资源学报,2001,16(3):140~145
- 8 王明涛.多目标综合评价中权数确定的离差、均方差决策法.中国软科学,1999,8(8):100~102