

典型草原区水资源承载能力评价方法研究

龙胤慧¹, 郭中小¹, 廖梓龙¹, 徐晓民¹, 刘华琳¹, 宋一凡^{1,2}

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘 要: 水资源承载能力评价是典型草原区生态系统得以维持的关键因素, 也是牧区社会经济可持续发展的必要保障。该文提出了基于模糊评价的指标体系法、承载能力计算模型、GIS 方法三种典型草原区水资源承载能力评价方法, 以达茂旗为研究区域, 对 2009 年水资源承载能力进行了评价与分析。在指标体系法中, 因为人口密度较低、人口增长得到有效控制, 故全旗水资源社会承载能力较强; 北部的巴音花镇及满都拉镇因工业较少, 其水资源承载能力经济层为承载一般的状态; 在承载能力计算模型中, 人口、工农业分布密集的百灵庙镇人口与经济均存在超载的情况, 全旗只有巴音花镇和满都拉镇生态承载能力有富余; 在基于 GIS 的水资源承载能力评价中, 达茂旗中南部的百灵庙镇、乌克镇、石宝镇等地水资源承载能力均处于较弱甚至弱的状态, 北部的巴音花镇、满都拉镇水资源承载能力则较强。三种方法的评价结果均表明达茂旗水资源承载能力较弱。

关键词: 典型草原区; 水资源承载能力; 评价方法

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)03-0222-05

Water Resource Carrying Capacity Evaluation Method in Typical Grassland

LONG Yin-hui¹, GUO Zhong-xiao¹, LIAO Zi-long¹, XU Xiao-min¹, LIU Hua-lin¹, SONG Yi-fan^{1,2}

(1. Research Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources,

Hohhot 010020, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The research of water resource carrying capacity is not only the key factor to support the health of ecology in typical grassland area, but also the necessary guarantee for the sustainable development of society and economy in pastoral area. In this paper, three methods, which are index system based on fuzzy analyzing, carrying capacity calculation model and GIS method, have been used to evaluate the present situation of water resource carrying capacity in Damao County in 2009. The results of index system method show that the water resource carrying capacity of Damao County for society system is at stronger level due to less population density and increasing rate, the water resource carrying capacity of Bayinhua Town and Mandula Town for economic system is at medium level. The results of carrying capacity calculation model indicate that Bailingmiao Town, which is the central of population and economy in Damao County, is in overload situation, and Bayinhau Town and Mandula Town are the only area where can support the grassland grazing activity. The results of GIS method reveal that the water resource carrying capacity of the central and southern of Damao County is much weaker than the north area. In general, the results of the three methods show that water resource carrying capacity of Damao County is weak.

Key words: typical grassland area; water resource carrying capacity; evaluation method

中国是世界上草原资源最丰富的国家之一, 中国国土面积的 40% 被草原覆盖着, 主要分布在我国的东北和西北地区。根据生物学及生态特点, 草原可以细分为草甸草原、典型草原、荒漠草原和高寒草原四种类型, 其中典型草原区面积约为 188 万 km², 分

布在内蒙古、新疆、青海等省区, 这些区域干旱少雨, 气候恶劣, 风沙等自然灾害频繁, 生态环境十分脆弱。尽管水资源贫乏, 但有限的水资源成为了典型草原区生态系统得以维持的关键因素, 水资源数量和质量的变化都将对这一区域产生重大影响^[1-3], 研究典型草

原区水资源承载能力对促进草原生态保护及牧区经济社会可持续发展具有重要意义。近几年,水资源承载能力评价方法得到了广泛的研究^[4-6],但关于典型草原区水资源承载能力评价的研究还很少。

1 评价方法研究

1.1 评价目的和要求

与其他水资源承载能力评价不同的是典型草原区既是我国北方重要的天然生态屏障,也是少数民族聚居地,社会经济亟待发展,典型草原区水资源承载

能力评价要统筹兼顾好生态安全与牧区发展这一矛盾。典型草原区水资源承载能力评价的目标是在一定时期和技术水平下,以维护草原区良好生态功能及促进牧区社会经济的可持续发展为原则,考虑可预见的历史文化、科学技术等影响下,实现水资源系统所能支撑的水—草—畜间平衡及其协调发展。

1.2 评价方法对比

目前,关于水资源承载能力评价的方法较多,大致可以归为确定性评价方法和不确定性评价方法两大类,详见表 1。

表 1 水资源承载能力评价方法比较^[7-8]

方法类型	方法名称	理论基础	应用范围	数据要求	操作规程	存在问题
确定性方法	概念模型法	一般	较广泛	较低	较简单	难以量化研究
	供需平衡分析法	一般	较广泛	较低	较简单	适用于宏观评价
	系统动力学法	较强	较广泛	一般	较繁琐	非线性方程参数扰动
	水/生态足迹法	较强	广泛	一般	一般	不适合动态评价
不确定性方法	层次分析法	一般	广泛	较低	简单	受专家赋权主观影响较大
	混沌分析法	一般	广泛	一般	较繁琐	混沌识别方法尚不完善
	灰色分析法	一般	较广泛	较低	较简单	构建模型稳定性较差
	模糊分析法	较强	较广泛	一般	一般	计算相对繁琐
	主成分分析法	较弱	较广泛	一般	一般	物理概念不明确

此外一些新的评价方法及某两个评价方法的耦合等研究也陆续出现,如密切值法^[9]、熵权模糊物元分析模型^[10]、投影寻踪与遗传算法相结合^[11]。

根据典型草原区水资源特点、社会经济发展的实际情况及草原生态保护的要求,需要对典型草原区水资源承载能力进行定性、静态与动态相结合的评价,因此本研究分别采用基于模糊评价的指标体系法、基于供需平衡法的承载能力计算模型和基于 GIS 的叠置分析法评价典型草原区水资源承载能力。

1.3 基于模糊评价的指标体系法

根据水资源承载能力评价的目标和要求,将选取的评价指标进行有机组成,即建立评价指标体系,评价指标体系常见的基本结构有指标集、树型、丛型及矩阵结构形式,树型结构利于体系系统的层次性及多目标性,因此本次评价指标体系采用树型结构。

根据上述分析和指标体系确定的原则,从水资源承载能力的承载主体、承载客体及其相互之间的关联关系综合考虑,选取相应的评价指标,建立三层树型评价指标体系,第一层为目标层,即水资源承载能力,用以衡量水资源系统支撑整个社会、经济及生态环境系统可持续发展水平的能力;第二层为准则层,即水资源承载能力对各个子系统的支撑能力,分为水资源层、社会层、经济层、生态环境层及耦合层 5 部分;第三层为指标层,具体反映各子系统的发展情况,其中水资源层评价指标有人均水资源量,水资源可利用比

例,水资源开发利用率,社会层评价指标有人口密度、人口增长率、城镇人均生活用水量、农村人均生活用水量、城镇化率;经济层评价指标有人均 GDP、有效灌溉面积比重、农业 GDP 比重、工业 GDP 比重;生态环境层评价指标有草地覆盖率、牲畜超载率、水土保持率、干旱指数、水质达标率;耦合层评价指标有工业用水重复率、供水模数、污水处理率。

本次评价采用模糊综合评价法,1965 年,美国加州大学伯克利分校的 Zadeh L A 教授创立了模糊理论,提出了用隶属函数来表达事物的模糊程度,特别是在控制论中,将条件或状态都量化为一组模糊语言,为多目标决策评价奠定了坚实的基础。模糊评价的基本模型大致如下:

设评价的指标集为: $U=\{u_1,u_2,\cdots,u_m\}$;评判的等级为: $V=\{v_1,v_2,\cdots,v_n\}$

对 U 中每一因素根据 V 集合中的等级进行评判,获得评判矩阵

$$R=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1m}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2m}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nm}\end{bmatrix}$$

(1)

式中: r_{ij} —— u_i 对 v_j 的隶属程度。 (U,V,R) 则构成了一个模糊综合评价模型。若设权重矩阵为 A ,与评判矩阵相乘可得:

$$B=A\cdot R=(b_1,b_2,\cdots,b_m)$$

(2)

归一化处理后即可评判评价对象的等级。实际应用中陈守煜等建立了淮河流域水资源承载能力的模糊评价模型^[12]。根据达茂旗经济社会发展的实际情况,结合相关研究成果,参照相关的定额标准等资料,制定水资源承载力评价指标体系评价标准,并划分为 5 个等级,即水资源承载力弱、较弱、一般、较强、强,对于正相关指标,指标值越大则承载力越强,对于负相关指标,指标值越大,承载力越弱。

1.4 水资源承载力计算模型

1.4.1 建模思路 分析评价区域水资源承载力主要是以生产性用水为主,首先从用水结构分析,生产性用水一般占总用水的绝大部分,是水资源消耗的主要构成部分。其次,从前面承载力与承载水平的关系可以看出,承载水平的高低除取决于产业结构和生产方式外,主要取决于用水水平的高低,生产用水效率高,则承载的水平就高。因此,在草原生态保护和目标约束下,不同承载水平下的水资源承载力计算应以可用水资源对生产性用水的支撑程度为主,求出水资源可利用量对经济活动用水的承载力。

1.4.2 计算模型 本次研究水资源承载力计算评价模型的建立,主要是基于上述指标体系中部分指标的含义,尤其是承载主体层指标的的内涵及其与承载客体层指标的关联关系,构造相应的水资源承载力状况的评价计算模型,计算典型草原区水资源承载力。参照左其亭等在城市水资源承载力中的研究成果^[13],结合典型草原区水资源特点,构建计算模型如下:

$$\begin{cases} C_t = \epsilon \cdot W_p / E_p \\ C_{GDP} = W_e / E_{GDP} \\ C_g = (W_a - W_i - W_s) / E_g \end{cases} \quad (3)$$

式中: C_t ——水资源人口承载力; W_p ——水资源总量; ϵ ——有效用水系数; E_p ——人均综合用水定额,其指标值等于人均用水定额 $\times 365$; C_{GDP} ——水资源经济承载力; W_e ——用于经济发展的水资源量; E_{GDP} ——万元国内生产总值用水量; C_g ——水资源草地承载力; W_a ——第一产业可利用水资源量; W_i ——农田灌溉水资源量; W_s ——牲畜综合用水量; E_g ——单位面积灌溉饲草料地和灌溉草地综合用水定额。

1.5 基于 GIS 的水资源承载力评价

1.5.1 地理信息系统用于典型草原区水资源承载力评价的必要性 典型草原区水资源承载系统具有以下几个特点:第一,数据多元性。水资源承载系统涉及社会、经济及生态环境三个大方面的上百个具体

变量要素,不同方面的数据来源都不相同,甚至在同一方面也需要通过不同途径收集变量要素。第二,动态性。水资源承载力评价必须随着时空变化而进行调整,通过评价不同区域不同时间段上的发展状况,为评价区域各项指标的预测及确定发展趋势打下基础。而地理信息系统在处理上述问题时拥有较大的优势,GIS 拥有动态显示的功能,提高了系统在区域范围内运行状况的动态及时掌握。因此,本研究采用地理信息系统动态性地分析和研究典型草原区水资源承载力评价。

1.5.2 基本原理 水资源承载力包含水资源系统本身承载力、水资源社会承载力、水资源经济承载力及水资源生态环境承载力,

$$C = \sum_{i=1}^n S_i \times W_i \quad (4)$$

式中: C ——水资源承载力; S_i ——各个子系统承载力; W_i ——各个子系统对应的权重系数,本次研究采用层次分析法确定的客观权重与专家打分的主观权重相结合的权重确定方法。在地理信息系统中,上述计算思路可以通过缓冲分析与叠置分析实现。

缓冲分析是指对一组要素按一定的条件设定不同的距离值,要素可以是点状和线状,也可以是面状。例如,将人口密集区概化为若干个空间离散点,以点为中心划定不同的影响范围,离该点越远则水资源承载力越强,其数学描述如下:

$$P = \{x \mid d(x, A) \leq r\} \quad (5)$$

式中: P ——缓冲区; A ——给定的对象或缓冲区建立的条件; d ——距离; r ——领域半径。叠置分析是将代表不同涵义的各个数据层在一定的规则下进行组合,产生一个具有多层要素属性的新数据层。在 ArcGIS 9.3 软件中,可以通过叠置分析进行数据层的叠加、合并等操作。由于各类数据的相关性不一致,有的指标为正相关,有的为负相关,所以在叠置分析前,所有数据都需要进行重分类处理,以达到消除量纲影响的目的。

1.5.3 计算流程 在 GIS 中,为了减少计算量,并不考虑所有水资源承载力评价要素,每一系统只选相应有针对性的数据进行空间分析,如水资源数据是以河流水系及土地利用为基础,社会数据主要关注人口空间分布,经济数据侧重农田面积和工矿企业分布,生态环境数据以牲畜分布为核心进行研究。本研究采用 ArcGIS 9.3 软件中的空间分析模块进行具体计算,基于 GIS 的水资源承载力评价流程如图 1 所示。

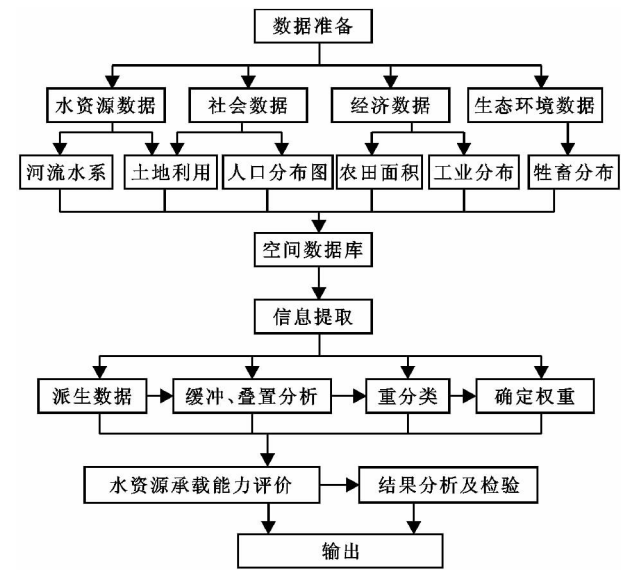


图 1 基于 GIS 的水资源承载力评价流程

2 实例研究

2.1 研究区概况

本研究选择内蒙古自治区达尔罕茂明安联合旗(简称达茂旗)作为研究区,达茂旗属于大陆型干旱气候,冬季寒冷,春季干旱,年平均气温 4.34℃,年平均降水量在 260.73 mm 左右,而多年平均水面蒸发量却高达 2 480.57 mm,约为降水量的 9.5 倍,达茂旗的天然草地植被大致可分为四类,一类是以旱生草本植物为主的典型草原,二类草地植被比一类分布稀疏,且伴有旱生灌木丛,属于荒漠草原,三类则是加入了丛生禾草,形成草原化荒漠,多分散于沿河滩地和盆地,最后一类则是介于以上三类之间的非地带性草地草原,四类草地植被群落结构都比较简单。达茂旗是一个以畜牧业经济为主的边境牧业县,同时也有着丰富的矿产资源,经过近几年的发展,城镇居民人均

可支配收入年均增长了 14.9%,农民人均纯收入年均增长了 12.5%,工业总产值也突破了百亿元大关。

2.2 现状水资源承载力评价

2.2.1 指标体系评价结果 在水资源承载力评价指标体系法中,因为人口密度较低、人口增长得到有效控制,故全旗水资源社会承载力均较强;北部的巴音花镇及满都拉镇因工业较少,其水资源经济承载力一般,其余承载均较弱。此外,各个区域的耦合层承载力均为较弱或弱的状态,说明水资源承载力系统中各层间的相互联系作用较小,经济、社会、生态环境、水资源各个系统没能协调一致可持续发展,这对达茂旗水资源的进一步开发利用是极其不利的。图 2 为指标体系评价法水资源承载力各层评价结果。

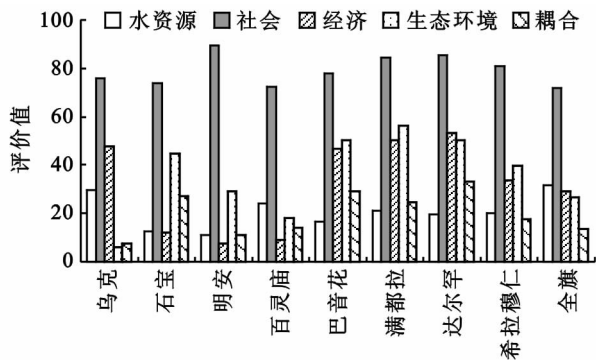


图 2 指标体系评价法水资源承载力评价结果

2.2.2 承载力计算模型评价结果 在水资源承载力计算模型中,在社会承载力方面,人口数量大且分布密集的百灵庙镇存在超载的情况;在经济方面,百灵庙镇及满都拉镇出现了水资源经济承载能力的超载,而在生态环境系统中,只有巴音花镇和满都拉镇的承载力尚有富余。表 2 为水资源承载力计算结果。

表 2 水资源承载力计算结果

行政区划	社会承载力			经济承载力			生态承载力		
	人口承载/ 万人	现状人口/ 万人	超载量/ 万人	经济承载/ 亿元	现状 GDP/ 亿元	超载量/ 亿元	草地承载/ km ²	现状草场/ km ²	超载量/ km ²
乌克镇	4.4	3.1	-1.3	5.23	11.72	-40.58	882.2	984.4	102.2
石宝镇	4.7	3.1	-1.6	56.01	8.21	-47.80	764.6	827.4	62.8
明安镇	1.7	0.5	-1.2	20.59	8.02	-12.57	1591.9	1646.6	54.7
百灵庙镇	2.7	3.6	0.8	32.60	58.31	25.71	2045.7	2846.4	800.7
巴音花镇	0.8	0.4	-0.3	9.39	9.52	0.13	2289.2	2192.7	-96.4
满都拉镇	0.3	0.2	-0.1	3.68	4.22	0.54	2330.7	1542.2	-788.5
达尔罕苏木	1.6	0.4	-0.1	19.12	5.44	-13.68	1799.9	3961.6	2161.6
希拉穆仁镇	1.6	0.5	-1.1	18.93	1.42	-17.51	987.8	1098.7	110.9
全旗	14.4	12.0	-2.4	170.52	106.86	-63.66	12691.9	14500.0	1808.1

2.2.3 GIS 方法评价结果 图 3 为现状年达茂旗水资源承载力评价结果图,从图上可以看出,全达茂旗有一半以上的土地水资源承载力均为一般,在巴

音花镇南部、明安镇西北部与满都拉镇中部,水资源承载力为较强,极少数区域达到了水资源承载力强的状态。

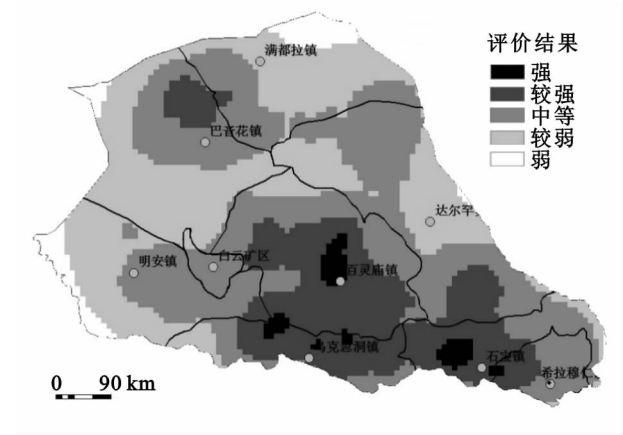


图 3 水资源承载力评价结果

在基于 GIS 的水资源承载力评价中,全旗的水资源承载力在各行政分区的空间分布极不均匀,但人口集中、工农业集中的百灵庙镇、乌克镇、石宝镇等地水资源承载力均处于较弱或弱的状态,达茂旗北部的巴音花镇、满都拉镇水资源农业承载力、水资源人口承载力为较强或一般的状况。

2.3 评价结果综合分析

由以上计算结果可知,总体而言,现状年达茂旗

全旗的水资源承载力均较弱。

比较三种评价方法,一些区域的评价结果有细微的不一致性,这是因为各种方法采用的原理及计算过程不同所造成的,三种方法评价的要素不一致,指标体系法更多评价的是属性类指标,大多以比例的形式给出,水资源计算模型中采用的是定额法进行反演计算出理论承载力,而基于 GIS 的承载力评价结果则受权重计算及数据图层耦合方式的影响较大。三种评价方法各有利弊,在实例中均能达到良好的效果,水资源承载力评价指标体系便于管理中快速地分辨出不合理的指标;水资源承载力计算模型则是量化了指标体系的评价结果,便宜管理人员从宏观上更有效地管理水资源和优化配置水资源;基于 GIS 的水资源承载力评价则是更直观地展现达茂旗全旗水资源承载力的空间变化情况,便于科研人员和管理者采取更有效更细致的水资源保护措施。因此,三种评价方法的综合运用,在典型草原区实现了水资源承载力评价定性 with 定量相结合、静态与动态相结合,三种评价方法均可用于预测规划水平年水资源承载力状况表 3。

表 3 三种水资源承载力评价方法对比

评价方法	数据要求	基本原理	评价结果	适用对象
指标体系法	较低	一般	定性、静态评价	基层用水单位、水管理部门
计算模型	一般	简单	定量、静态评价	水管理部门、行政部门
GIS 方法	较高	较难	定量、动态评价	行政部门、科研机构

3 结论

(1) 提出了基于模糊分析的指标体系法、承载力计算模型及 GIS 方法三种典型草原区水资源承载力评价方法,三种方法评价结果均表明达茂旗 2009 年水资源承载力较弱,其中草原超载严重,人口及经济在百灵庙镇等区域存在超载情况。

(2) 三种评价方法均表明达茂旗水资源承载力属于较弱的状态,但评价结果在局部存在一定的差异,因此在实际应用中,应根据水资源管理要求、数据资料收集程度等因素,因地制宜地选用评价方法。

参考文献:

[1] Lu A, Ding Y, Pang H, et al. Impact of global warming on water resource in arid area of northwest China [J]. Journal of Mountain Science, 2005, 2(4): 313-318.

[2] Feng Q, Cheng G D, Masao M K. Trends of water resource development and utilization in arid north-west China [J]. Environmental Geology, 2000, 39(8): 831-838.

[3] Xia J, Zhang L, Liu C, et al. Towards better water security in North China [J]. Water Resources Manage-

ment, 2007, 21(1): 233-247.

[4] 高瑞忠,李和平,佟长福,等.鄂尔多斯市水资源承载力综合评价与分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 139-142.

[5] 吕萍,刘东,赵菲菲. 基于熵权的建三江分局水资源承载力模糊物元评价模型[J]. 水土保持研究, 2011, 18(2): 246-250.

[6] 付玉娟,何俊壮,强小嫚,等. 辽河流域各市水资源承载力计算分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 171-176.

[7] 王文圣,张翔,金菊良,等. 水文学不确定性分析方法[M]. 北京:科学出版社, 2011.

[8] 严登华,袁喆,王浩,等. 水文学确定性和不确定性方法及其集合研究进展[J]. 水利学报, 2013, 44(1): 73-80.

[9] 刘洋,何俊仕. 基于密切值法的浑河流域水资源承载力评价[J]. 人民黄河, 2010, 32(5): 54-55.

[10] 杨秋林,郭亚兵. 水资源承载力评价的熵权模糊物元模型[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(2): 89-93.

[11] 郦建强,陆桂华,杨晓华,等. 区域水资源承载力综合评价的 GPPIM[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(1): 1-5.

[12] 陈守煜,胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-271.

[13] 左其亭. 城市水资源承载力:理论、方法、应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.