

基于水资源承载能力的达茂旗牧区用水方案优化

龙胤慧, 郭中小, 廖梓龙, 徐晓民, 焦 瑞, 刘华琳

(水利部牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 根据干旱草原区水资源承载系统具有数据多元性和动态性的特点, 建立基于GIS的水资源承载能力模型, 分别从时间和空间尺度上评价现状水资源承载能力及其影响因素, 评价结果表明2008~2012年达茂旗全旗的水资源承载能力为一般水平, 水资源承载能力较强水平的区域占全旗总面积的37.23%; 降水的减少直接导致了生产、生态用水的下降。灵敏度分析结果表明水资源自身承载能力受水资源可利用比例影响最大, 社会系统主要受人口密度、城镇化率影响, 经济系统中, 农业GDP比重影响很大。基于现状评价结果预设3种牧区用水方案优化模式, 水资源承载能力预测结果表明水资源开发利用控制效果并非越严格越好, 节水型社会稳步建设方案是规划水平年牧区用水方案的适宜模式。

关键词: 水资源承载能力; 地理信息系统; 干旱草原区; 牧区用水方案

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2015)02-0238-07

1992年施雅风院士等人首次定义了“水资源承载力”的概念^[1], 1997年联合国在其《世界水资源综合评价》报告中对这一概念进行扩展^[2]。为了与力学中的承载力进行区分, 在近年来的研究中, “水资源承载力”这一名词已逐渐被“水资源承载能力”所取代, 后者也更能体现出水资源系统自身的时空属性及与社会经济系统的协调一致性^[3]。

中国国土面积的40%被草原覆盖, 其中分布最广的是干旱半干旱草原区, 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^[4-6]。内蒙古达尔罕茂明安联合旗(简称达茂旗)是干旱半干旱草原区的典型代表, 该区域年降水量仅有255.52 mm左右, 而多年平均水面蒸发量却高达2 480.57 mm, 为降水量的9倍, 水资源不仅是制约达茂旗经济社会发展的瓶颈, 还是草原畜牧业发展和天然生态保护的屏障^[7]。开展基于水资源承载能力的干旱半干旱草原区(以达茂旗为例)用水方案评价对促进该区域社会-经济-生态协调一致可持续发展具有重要的指导意义。

从内容上看, 水资源承载能力研究大致可分

为两类, 一类是定量评价, 即根据水量的供需平衡状况判别水资源承载能力是否超载, 另一类是定性评价, 即选择分别代表水资源、社会、经济、生态等系统的评价指标, 根据设定的评判标准评价各指标的达标情况^[8,9]。目前大部分的水资源承载能力研究主要是以定性评价为主, 因其选取指标能反映不同用水单元(系统)与水资源的相互作用关系, 评价指标的选取较全面, 比单纯定量评价更客观。目前, 计算水资源承载能力的方法较多, 如系统动力学法^[10]、可变模糊法^[11]、成分分析法^[12]、密切值法^[13]、熵权物元模型^[14]等。与其他区域类似, 干旱半干旱草原区水资源承载系统具有数据多元性和动态性的特点^[15,16], 而现有的水资源评价大多为静态一次评价^[17], 因此, 本文在现有水资源承载能力研究的基础上, 采用地理信息系统建立水资源承载能力模型, 对2008~2012年达茂旗水资源承载能力变化进行研究, 为用水方案调整提供可靠的指导。

1 评价方法

水资源承载能力包含水资源系统本身承载能

收稿日期: 2014-01-17; 修订日期: 2014-05-04

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201201008)和中国水科院重点科研专项(MK2013J09)资助。

作者简介: 龙胤慧(1988-), 女(仫佬族), 广西罗城人, 硕士, 助理工程师。研究方向为草地生态水文过程。E-mail: zilong1115@qq.com

力、水资源社会承载能力、水资源经济承载能力及水资源生态环境承载能力,水资源承载能力模型可用下式描述:

$$C = \sum W_i \times C_i = \sum W_i \times \left(\sum c_{ij} \times w_{ij} \right) \quad (1)$$

式中, C 表示水资源承载能力, C_i 表示各个子系统承载能力, W_i 表示各个子系统对应的权重系数,采用层次分析法与专家打分相结合的权重确定方法。 c_{ij} 表示第*i*个子系统的第*j*个评价指标, w_{ij} 为相应的权重系数。

为了辨识各个子系统中,不同评价指标对水资源承载能力的影响程度,引入灵敏度指数分析法对各评价指标进行分析。灵敏度是指某一输入参数数值的微小变化对计算模型输出结果数值的变化程度,可通过下式求得:

$$S_{ij} = \frac{R_i(1.1 \times c_{ij}) - W_i(0.9 \times c_{ij})}{W_i(c_{ij})} \quad (2)$$

式中, S_{ij} 表示第*i*个子系统中第*j*个评价指标的灵敏度, R_i 表示第*i*个子系统所需的水资源量。

为了便于显示水资源承载能力的时空动态性,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,将人口密度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能力越强,其数学描述如下:

$$P = \{x | d(x, A) < r\} \quad (3)$$

式中, P 为缓冲区, A 为给定的对象或缓冲区建立的条件, d 为距离, r 为领域半径。

2 达茂旗水资源承载能力评价

2.1 研究区概况

达茂旗是一个以畜牧业经济为主的边境牧业县,经过近几年的发展,人们生活水平显著提高,根据达茂旗社会经济统计年鉴^[18],全旗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%。然而,干旱牧区由于水资源短缺,在长期以来的传统观念影响下,水资源的开发利用主要考虑的是满足生活和生产的需求,从未将生态需水纳入正常的水资源配置和流域或区域水资源的分配中,因此,生产用水挤占生态用水,最终导致生态环境恶化,整个区域或流域的水资

源承载能力降低,水资源的可持续利用受到严重威胁,整个区域和流域的经济社会的可持续发展也受到相应的制约。

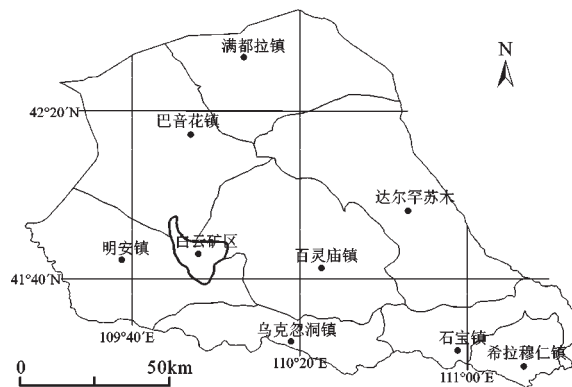


图1 研究区行政区划

Fig.1 The administrative division of study area

2.2 评价指标的选取和评价标准

由于草原生态的脆弱性,评价指标要从草原区干旱半干旱气象水文等自然条件的实际情况出发,建立具有实际操作意义的,能较为全面地反映其社会经济和草原生态环境相协调发展的状况与进程、水资源可持续利用的状况与进程,及其相互适应程度的指标。参照现有水资源承载能力研究成果^[19]、同类型地区的评价标准及全国干旱半干旱区水资源开发利用水平,制定本研究的评价标准。通过专家咨询、打分等,采用层次分析法确定各指标权重。表1为评价指标与评价标准。

2.3 时间尺度上水资源承载能力评价

由于干旱半干旱区年际降水变化较大,年内降水在空间内也十分不均匀,加之农业种植结构和工业发展规模在不同水平年有所差异,若以某一年的水资源状况为基础进行水资源承载能力评价,不仅不能准确反映达茂旗牧区水资源承载能力的实际情况,还会对规划水平年牧区产业发展计划的制定造成干扰。因此,对2008~2012年间水资源承载能力及其子系统承载能力随时间变化情况进行分析评价,评价结果见表2。

由评价结果可知,2009年降水量为133 mm,仅为多年平均降水量255.5 mm的一半,降水的减少直接导致了生产、生态用水的下降,特别是生态系统,过量载畜引起草地退化沙化等问题。2012年丰沛的降水量使得水资源承载能力在工农业规

表1 水资源承载力评价指标与评价标准

Table 1 The evaluation indexes and evaluation standard of water resources carring capacity

系统	评价指标(单位)		权重	评价标准				
				弱	较弱	一般	较强	强
水资源 C1	C ₁₁	人均水资源量(m ³)	0.2017	<500	500~1700	1700~2300	2300~3000	>3000
	C ₁₂	水资源可利用比例(%)	0.3512	<55	55~65	65~75	75~85	>85
	C ₁₃	水资源开发利用率(%)	0.4471	>60	40~60	20~40	10~20	<10
社会 C2	C ₂₁	人口密度(人/10 ⁴ m ²)	0.2763	>50	20~50	10~20	5~10	<5
	C ₂₂	人口增长率(%)	0.1634	>15	10~15	10~6	6~2	<2
	C ₂₃	城镇生活用水定额[m ³ /(d·人)]	0.1841	>310	230~310	160~230	80~160	<80
	C ₂₄	农村生活用水定额[m ³ /(d·人)]	0.1735	>110	80~110	50~80	20~50	<20
	C ₂₅	城镇化率(%)	0.2027	>80	60~80	40~60	20~40	<20
经济 C3	C ₃₁	人均GDP(万元)	0.1396	<0.5	0.5~1	1~3	3~5	>5
	C ₃₂	有效灌溉面积比重(%)	0.1445	<20	20~30	30~40	40~50	>50
	C ₃₃	农业GDP比重(%)	0.2699	>30	20~30	15~20	8~15	<8
	C ₃₄	工业GDP比重(%)	0.2418	>75	65~75	55~65	35~45	<35
	C ₃₅	工业用水重复率(%)	0.2042	<55	55~65	65~75	75~85	>85
生态 C4	C ₄₁	草地覆盖率(%)	0.1655	<10	10~20	20~30	30~40	>40
	C ₄₂	牲畜超载率(%)	0.2436	>20	10~20	3~10	0~3	<0
	C ₄₃	水土保持率(%)	0.1361	<60	60~70	70~80	80~90	>90
	C ₄₄	干旱指数(无量纲)	0.2241	>15	10~15	8~10	5~8	<5
	C ₄₅	水质达标率(%)	0.1182	<60	60~70	70~80	80~90	>90
	C ₄₆	污水处理率(%)	0.1125	<50	50~60	60~70	70~80	>80

表2 各年各系统水资源承载力状况

Table 2 Subsystem water resources carrying capacity in different year

系 统	承载力状况				
	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水资源自身承载力C ₁	一般	弱	一般	一般	较强
社会系统承载力C ₂	较强	一般	较强	强	较强
经济系统承载力C ₃	一般	一般	一般	较强	较强
生态系统承载力C ₄	较弱	弱	较弱	一般	一般
水资源承载力C	一般	较弱	一般	较强	较强

模不断发展的情况下仍能达到较强的水平。目前,达茂旗牧区生活用水基本来自地下水,故社会系统各项指标受降水变化的影响相对较小,加之近几年达茂旗人口增速减缓,在2010~2011年还出现了负增长,故社会系统承载力一直保持在较强的水平。

2.4 空间尺度上水资源承载力评价

水资源自身承载力是其他子系统承载能力的基础,而水资源系统自身受降水影响程度很大,

因此选择接近多年平均降水量的2008年(降水量为244.9 mm)作为现状水平年,采用地理信息系统中的缓冲分析和叠置分析,研究水资源承载力在空间尺度上的变化情况,计算结果见图2、表3。

从不同水资源承载力状况所占面积比来看,达茂旗中南部的水资源承载力均优于北部地区,其中水资源承载力状况为较强的区域最多,占全旗总面积的37.23%。达茂旗中南部的百灵庙镇、乌克镇和石宝镇,这些区域有艾不盖河、

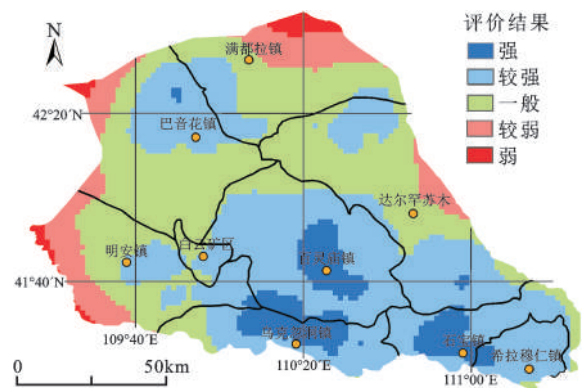


图2 2008年水资源承载力空间分布
Fig.2 The spatial distribution of water carrying capacity in 2008

表3 2008年水资源承载力所占面积比值					
Table 3 The area ratio of water carrying capacity in 2008					
水资源承载力	弱	较弱	一般	较强	强
面积比(%)	4.72	16.31	27.81	37.23	13.93

塔布河等常年性地表水资源,水资源禀赋条件较好,这些区域同时也是达茂旗工农业的集中地,工业用水水平较高,因此该区域水资源承载力均达到了较强或强的水平。

2.5 水资源承载力影响因素分析

采用灵敏度分析研究各评价指标对其对应子系统承载能力的影响程度,研究结果表明水资源自身承载力受水资源可利用比例指标(C_{12})影响最大(表4),社会系统承载力除个别年份,其主要影响指标依次是人口密度、人口增长率、城镇化率、城镇生活用水定额、农村生活用水定额。达茂旗采矿、炼铁、稀土等工业规模较大,工业用水水平也较高,但达茂旗最大用水户仍然是农业,其用水量占全旗生产用水的85%,因此农业GDP比重才是影响经济系统承载能力的关键指标。在生态系统承载力中,长期以来,干旱及过牧是达茂旗草原退化的主要因子。

表4 各年各系统灵敏度最高的指标					
Table 4 The highest sensitivity index of different subsystem in 2008-2012					
系统	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
水资源自身承载力C1	C_{12}	C_{12}	C_{12}	C_{12}	C_{12}
社会系统承载力C2	C_{21}	C_{21}	C_{21}	C_{22}	C_{21}
经济系统承载力C3	C_{33}	C_{33}	C_{33}	C_{33}	C_{33}
生态系统承载力C4	C_{42}	C_{44}	C_{42}	C_{42}	C_{42}

3 达茂旗用水方案优化

3.1 达茂旗用水方案优化思路

上述研究结果表明,在水资源承载力中生态子系统承载力一直处于一般或一般以下的水平,这与社会子系统、经济子系统处于一般或较强并不协调。在上述背景下,面临的问题是:草原生态要恢复和保护,草原畜牧业发展方式和草地资源利用的格局要转变,人口要发展,牧区的经济总量和农牧民的经济收入要增加,灌溉饲草料地和灌溉草场的规模要增加,相应地对水资源的需求量也要增加。实际上,草原生态保护与草原畜牧业经济发展并不是一对不可调和的矛盾,关键问题是草原畜牧业的发展方式。只有生态子系统得到良性循环,水资源承载力才能得到真正提高。因此,天然草原的载畜量必须控制在适宜载畜量范围内,对于严重沙化退化的天然草原实施围封禁牧。

根据各个指标对其对应子系统承载能力的影响程度,通过节水型社会建设、牧区水利规划、水资源优化资源配置等管理措施改进各评价指标值,预设3种牧区用水方案优化模式,并分析其水资源承载力变化情况,对今后达茂旗牧区用水方案的布局提供思路。

1) 水资源系统自身。由于达茂旗地处干旱地区,地表水资源稀缺,新建水库等蓄水工程并不可行,水资源可利用量仍按现状水资源可利用量考虑,只能通过实施最严格的水资源管理来控制水资源开发利用率。

2) 社会系统。近几年,达茂旗的人口增长趋势缓慢,2010~2011年还出现了负增长,因此在生态系统可持续发展的前提下控制城镇化率是提高社会系统承载能力的关键。

3) 经济系统。在农业经济结构中,应增加马铃薯等耐旱作物的种植比例,避免降水减少对农业生产造成的损失。在工业经济结构中,采矿、炼铁等企业用水水平与同类先进企业相比,仍有较大改善空间,应通过工艺改良以提高工业水重复利用率和污水处理率,减少废水废气的排放。

4) 生态系统。长期以来,生产用水挤占生态用水,达茂旗工业发展的同时也造成了生态环境恶化等问题,因此配水应优先考虑以草原畜牧业为主的基础产业以及保护草原生态的需要,其次

是满足工业用水需求。

3.2 规划水平年情景设置

综上所述,预设3种牧区用水方案优化模式,M-1情景为节水型社会快速建设方案,M-2情景为现状方案,M-3情景为节水型社会稳步建设方案。详见表5。

3.3 边界条件预测

干旱区水资源量的变化与降水量及蒸发量的变化密切相关,因此在水资源系统预测中,主要考虑降水量和蒸发量的变化。根据过去50 a达茂旗的降水资料,选择重现期为10 a,即采用2003~2012年的降水量分别作为2013~2022年的降水量,以此计算降水入渗量。蒸发量的预测则通过与降水量建立线性回归方程,通过降水量的预测值得到相应的蒸发量。通过计算所得的降水入渗量和蒸发量推算达茂旗的水资源量和水资源可利用量。

社会、经济系统发展趋势预测主要考虑跟水资源系统密切相关的人口预测和用水量预测。人口预测选用Logistic人口预测模型,生活用水量预测采用定额法计算。根据相关资料^[20],拟定作物净灌溉定额,进而计算农业用水量。工业需水量,

根据预测的取水定额和工业的增加值进行计算。

载畜量采用下述计算公式:

$$Z=A\times E_i\times \alpha/(365\times R)$$
 (4)

式中,Z为载畜量,A为草场可利用面积,E_i为单位面积产草量,α为草场利用率,R为牲畜日食量。为了使草场有缓冲和恢复的余地,草场利用率一般为50%~70%。

3.4 水资源承载能力预测

将3种设计情景代入承载能力计算模型中,并通过ArcGIS进行面积统计,计算结果表明,通过预设实施最严格的水资源管理和节水型社会建设,严格控制水资源开发利用率,3种用水调整方案均能有效改善水资源承载能力,如表6所示。但水资源承载能力并没有因为严格控制生产用水而大幅改善,说明水资源开发利用率控制效果并非越严格越好,需要在满足生态系统良性循环的基础上保持社会经济系统的协调一致发展。在预测结果中,虽然加强水资源管理也会降低水资源承载能力状况为强的水平所占面积比例,统筹考虑牧区生态保护的现实需求和畜牧业可持续发展的保障,M-3情景是规划水平年牧区用水方案的适宜模式。

在规划水平年中,2019年的降水条件最接近

表5 牧区用水方案优化模式设计

Table 5 The designing of optimal water utilization in pastoral area

情景	C1	C2	C3	C4
M-1	C ₁₃ +1.5%	C ₂₅ +0.5%, C ₂₃ +1.0%	C ₃₃ +1.0%, C ₃₄ +1.5%, C ₃₅ +1.0%	C ₄₂ +1.0%, C ₄₅ +1.0%
M-2	C ₁₃ +0.5%	C ₂₅ +0.5%, C ₂₃ +1.0%	C ₃₃ +1.5%, C ₃₄ +2.0%, C ₃₅ +2.0%	C ₄₂ +1.0%, C ₄₅ +1.0%
M-3	C ₁₃ +1.0%	C ₂₅ +0.2%, C ₂₃ +0.5%	C ₃₃ +1.5%, C ₃₄ +2.0%, C ₃₅ +2.0%	C ₄₂ +0.5%, C ₄₅ +1.0%

注:C₁₃+1.5%表示C₁₃指标通过实施最严格的水资源管理制度和节水型社会改善相应子系统,使得该指标在下一年中比原来增加(或改善)1.5%的变幅。

表6 规划年水资源承载能力预测结果(%)

Table 6 The forecast area ratio of water resources carrying capacity in the future (%)

水资源承载能力			弱	较弱	一般	较强	强
面积比(%)	M-1	2015年	5.57	12.56	37.55	27.55	16.77
		2018年	4.44	11.07	38.31	28.16	18.02
		2022年	3.13	9.2	39.26	29.3	19.11
	M-2	2015年	5.64	12.92	36.59	28.96	15.89
		2018年	5.16	11.86	37.51	29.37	16.1
		2022年	4.82	10.43	39.04	30.54	15.17
	M-3	2015年	5.35	12.38	38.12	28.01	16.14
		2018年	4.26	10.51	40.07	29.4	15.76
		2022年	2.98	8.66	42.91	30.86	14.59

① 水利部牧区水利科学研究所,内蒙古自治区主要作物灌溉制度与作物需水量等值线图,2009。

- [16] Zhang Z, Lu W X, Zhao Y, et al. Development tendency analysis and evaluation of the water ecological carrying capacity in the Shiping area of Jilin Province in China based on system dynamics and analytic hierarchy process[J]. *Ecological Modeling*, 2014, (275):9-21.
- [17] Wang Z G, Luo Y Z, Zhang M H, et al. Quantitative evaluation of sustainable development and eco-environmental carrying capacity in water deficient regions: a case study in the Haihe River Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, **13**(1): 195-206.
- [18] 达茂旗统计局. 达茂旗社会经济统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
- [19] 龙胤慧. 典型草原区水资源承载能力评价方法研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013:31~32.
- [20] 内蒙古自治区行业用水定额标准(DB15/T385—2009)[S]. 内蒙古自治区质量技术监督局, 2009.

The Optimal Water Utilization of Damaoqi in Pastoral Area Based on Water Resources Carrying Capacity

LONG Yin-hui, GUO Zhong-Xiao, LIAO Zi-long, XU Xiao-min, JIAO Rui, LIU Hua-lin

(Research Institute of Water Resources for Pastoral Area, The Ministry of Water Resources,
Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: According to the feature of diversity and dynamic of water resources system in arid grassland area, the water resources carrying capacity model is established with Geographic Information System technology, the carrying capacity and its influence factors are evaluated in different spatial and temporal scales. The research results show that the water carrying capacity of Damaoqi is at general level from 2008 to 2012, and the area ratio of the stronger carrying capacity level of water resources is 37.23%. From the calculation results, it can be found that the lower rainfall makes the decrease of industry producing water consuming and ecological water consuming. The sensitivity analyzing results reveal that the available water resources ratio is the main factor to change water resources carrying capacity in water resources system itself, population density index and urbanization index are the two key factors to restrict the social carrying capacity system, and GDP of agriculture is the vital factor to control the economic carrying capacity system. Based on the present evaluation results of water resources carrying capacity, three different development patterns are designed for optimizing the water utilization of Damaoqi in pastoral area. The calculation results indicate that the development pattern of the most strict water resource management is so stricter that the water resources carrying capacity would not be improved effectively, and the development pattern of steady construction of water saving society is the best way to promote the sustainable development of economic, society and ecology in Damaoqi in the planning year.

Key words: water resources carrying capacity; GIS; arid grassland area; water utilization in pastoral area