

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.019

玛纳斯河流域用水结构时空演化及 水资源空间匹配分析

魏卿¹, 薛联青^{1,2}, 王桂芳³, 沈海岑¹, 倪涛¹, 覃金兰¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 皖江工学院, 安徽 马鞍山 243031;
3. 费县水利工程保障中心, 山东 临沂 273400)

摘要:选取2000—2018年作为研究期,以石河子市、玛纳斯县和沙湾县为主要研究对象,归纳出玛纳斯河流域现状用水结构的演变特征,利用信息熵理论、基尼系数和洛伦兹曲线分析了流域的水资源空间匹配程度。结果表明:2000年以来流域的用水总量整体呈上升趋势,用水量增加了11.76%,整体变化程度较小,用水结构的信息熵总体持续增长,信息熵水平从2000年的0.209增加到2018年的0.448,用水总量得到一定控制,用水系统均衡度也逐渐增强,生活、生态用水的空间分布不均衡程度提高,总体来看,水资源与人口和降水较为匹配,与耕地相对匹配,与工业产值较不匹配,各区域工业耗水情况差异度增加,生态用水空间分布趋于均衡,需调整产业经济结构,缩减高耗水企业数量,发展低耗水产业,对水资源进行集约利用,重视生态保护工作,完善水管理机制,实现流域经济社会的健康发展。

关键词:用水结构;信息熵理论;洛伦兹曲线;基尼系数;空间匹配;玛纳斯河流域

中图分类号:TV121 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0124-07

Spatial and temporal evolution of water structure and spatial matching analysis of water resources in Manas River Basin//WEI Qing¹, XUE Lianqing^{1,2}, WANG Guifang³, SHEN Haicen¹, NI Tao¹, QIN Jinlan¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Wanjiang University of Technology, Maanshan 243031, China; 3. Water Conservancy Project Guarantee Center of Feixian County, Linyi 273400, China)

Abstract: Selecting 2000-2018 as the research period, taking Shihezi City, Manas County and Shawan County as the main research objects, the evolution characteristics of the current water structure of the Manas River Basin were summarized. The spatial matching degree of water resources in the basin was analyzed by information entropy theory, Gini coefficient and Lorentz curve. The results show that the total water consumption of the basin from 2000 showed an upward trend as a whole, and the water consumption increased by 11.76%, with a small degree of overall change. The information entropy of the water use structure continued to increase overall. The water entropy of the watershed has increased from 0.209 in 2000 to 0.448 in 2018. The total amount of water used has been controlled to a certain extent. The balance of the water use system has also gradually increased. In general, water resources are more compatible with population and precipitation, relatively compatible with cultivated land, and less compatible with industrial output value. The difference in industrial water consumption among regions has increased. The spatial distribution of ecological water use has tended to be balanced. It is necessary to adjust the industrial economic structure, reduce the number of water-consuming enterprises, develop low-consumption aquaculture, make intensive use of water resources, pay attention to ecological protection, improve the water management mechanism, realizing the healthy development of economy and society in the basin.

Key words: water use structure; information entropy theory; Lorentz curve; Gini coefficient; space matching; Manas River Basin

用水结构是指一定时期某水系统中各类用水量组成,而水资源空间匹配程度反映了不同地区的

水短缺状况。在水资源的约束条件下,确定合理的用水结构,有利于社会持续、稳定和协调发展。社会

基金项目:国家自然科学基金(51779074,41371052)

作者简介:魏卿(1996—),男,硕士研究生,研究方向为环境水文及生态水文。E-mail: 18751893266@163.com

通信作者:薛联青(1973—),女,教授,博士,主要从事环境水文及生态水文研究。E-mail: lqxue@hhu.edu.cn

经济、人口、自然要素等都将影响用水结构的变化^[1]。目前用水演变分析以定性为主,相关的定量分析包括回归分析、因子分析、相关分析等^[2-3]。雷欢^[4]引入信息熵分析了陕西省用水结构的演变趋势,并采用灰色关联度进行驱动力分析。洪思扬等^[5]利用洛伦兹曲线探讨了水资源与人口、GDP、土地利用和降水量的空间匹配度。张洪波等^[6]依据榆林市用水结构空间分布特点,利用生态位及其熵值分析了不同分区用水变化特征。玛纳斯河流域由于大规模进行水土资源开发,引发了包括地下水位下降、泉流量减小等一系列的生态灾害,而研究用水演变和水资源的时空均衡状况可以指导经济建设向更加合理的发展方向。目前已有的研究大部分仅对用水结构进行分析,或者揭示变化环境下的水文响应机理等,忽略了各地区的水资源时空匹配状况。因此,本文基于 2000—2018 年的用水资料,引入信息熵理论,分析各地区用水结构变化情况,采用洛伦兹曲线和基尼系数探究多年的水资源与人口、工业产值、耕地面积及降水量之间的空间匹配程度,为协调水资源约束下的产业结构布局和优化流域的水资源配置提供决策依据。

1 研究区概况与数据来源

玛纳斯河流域是我国西北典型的内陆河流域,位于新疆准噶尔盆地南部,是全疆最大的农耕绿洲区,处于北纬 43°20′~45°55′、东经 84°70′~86°67′之间,河道全长 400 km,包括沙湾、玛纳斯和石河子等县市,面积约 3.4 万 km²^[7](图 1)。由于地质作用、水流及风沙作用,地形南高北低,形成了不同

的地形地貌,大致可分为上游山区、山前平原区和下游荒漠区^[8]。山区是主体产流区,平原绿洲为径流耗散区,流域绿洲总面积约为 1.08 万 km²,是新疆重要的粮棉生产基地^[9-10]。

本文基础数据来源于 2000—2018 年的《石河子市统计年鉴》《玛纳斯县统计年鉴》《沙湾统计年鉴》《新疆统计年鉴》《中国统计年鉴》等。为保证数据的准确性、连续性和一致性,以便进行时空对比分析,其中,用水数据由玛纳斯河流域管理处提供,气象站点分布如图 1 所示,并结合产业发展特点分析用水格局的时空演化特征。

2 研究方法

2.1 信息熵

熵属于热力学的概念,可用于描述任何体系的混乱度和无序度水平。应用信息熵理论可分析用水结构复杂性及演变规律,具有较高的合理性。熵值的大小反映了用水结构类别多少和用水量分布的均匀程度^[11]。信息熵越大,用水量使用越均匀,用水结构演化趋势也越合理;信息熵越小,则说明用水量分布不均。信息熵可描述不同社会发展阶段下的用水结构特点。

对于一个不确定性系统,若离散型随机变量 x 的取值为 $x_1, x_2, \dots, x_n (n \geq 2)$,每一取值的概率为 $p_1, p_2, \dots, p_n (0 \leq p_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n)$ 且 $\sum p_i = 1$,则该离散系统信息熵可表示为

$$H(x) = - \sum p_i \ln p_i \quad (1)$$

式中: H 为用水信息熵值;当 $p_i = 1/n$ 时, $H_{\max} = \ln n$, n 为用水类型数量。

同时考虑用水类型的影响,使信息熵对用水结构分析具有可比性,引入均衡度进行横向比较。均衡度越大,用水系统稳定性和均衡性越强,单一用水类型优势度越弱,状态越理想。均衡度 J 与 H 变化一致,其计算公式为

$$J = \frac{H}{H_{\max}} = - \frac{\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i}{\ln n} \quad (2)$$

2.2 洛伦兹曲线

洛伦兹曲线原本为 1905 年 Lorenz 提出的经济学概念,可用于研究国家或地区国民经济收入分配均衡问题,经济均衡性越高,洛伦兹曲线越趋于直线,经济均衡性越差,则曲线越接近横轴^[12]。基尼系数 G 为定量收入分配差异程度的重要指标,给出了收入分配差距的数值界限,可表示为

$$G = \frac{A_1}{A_1 + A_2} = 1 - 2 \int_0^1 f(x) dx \quad (3)$$

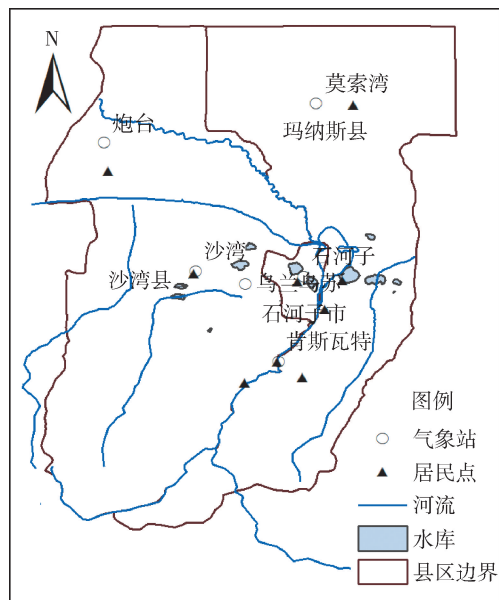


图 1 玛纳斯河流域各县市空间分布

Fig.1 Counties and cities distribution in Manas River Basin

式中: A_1 为绝对公平线 $y=x$ 和洛伦兹曲线围成的面积; $A_1 + A_2$ 为绝对公平线下的直角三角形面积; $f(x)$ 为洛伦兹曲线方程。

2.3 基尼系数

为了简化计算, 本文采用梯形面积法计算基尼系数, 简化后的公式为

$$G = \sum_{i=1}^{n-1} (X_i Y_{i+1} - X_{i+1} Y_i) \quad (4)$$

式中: X_i 、 Y_i 分别为用水总量累计百分比和各类型用水累计百分比, 其中 $X_0 = 0$, $Y_0 = 0$; n 为行政单元总数。根据联合国有关组织规定, 不同的 G 值对应不同收入匹配程度^[13], 基尼系数低于 0.2, 表示收入高度匹配; 0.2 ~ 0.3 表示收入比较匹配; 0.3 ~ 0.4 表示收入相对匹配; 0.4 ~ 0.5 表示收入不匹配; 0.5 以上表示极不匹配。

3 结果与分析

3.1 用水量及用水结构变化

3.1.1 用水量多年变化

玛纳斯河流域的用水总量整体呈上升趋势(图2), 由 2000 年的 25.32 亿 m^3 增加到 2018 年的 28.31 亿 m^3 , 用水量增加了 11.7%, 整体变化程度较小, 其增长过程中的阶段性变化较为明显, 具体表现为: 2000—2004 年用水总量有下降的趋势, 下降率为 10.6%, 2005—2008 年用水总量明显增加, 2008 年用水量达最大值 27.23 亿 m^3 , 2009—2015 年用水总量相对之前趋于平稳, 其中 2012 年用水增长较快, 增长率为 9.2%, 在 2016—2018 年用水量平稳增加。

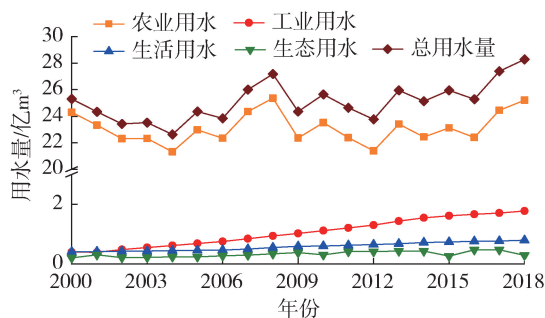


图2 玛纳斯河流域用水总量历年变化情况

Fig.2 Interannual variation of total water use in Manas River Basin

3.1.2 用水结构演变分析

图3为玛纳斯河流域的历年各类用水比例变化。农业用水作为流域主要用水部门, 受耕地扩张和大规模节水的共同影响, 用水自主变化性变化较大, 且呈现渐进式增长, 其平均比重占用水总量的92.1%, 变化趋势与用水总量趋势基本一致, 平均用

水量为 23.11 亿 m^3 。由于工业经济水平的提高, 工业用水量也从 2000 年的 0.39 亿 m^3 增加到 2018 年的 1.77 亿 m^3 , 平均用水量为 1.05 亿 m^3 , 多年来呈明显增加趋势, 生活用水比例由 2000 年的 1.6% 增加到 2018 年的 2.8%, 平均占比仅为 2.3%。生态用水量占比仍较低, 用水量较为稳定。总体上看, 工业用水、生活用水和生态用水虽然均有明显增加, 但农业依然是主要用水部门, 因此控制用水总量的关键仍是节约农业用水。要调整产业结构, 在保障粮食生产和用水效益的基础上, 高效利用水资源, 才能有效缓解对水资源不断增长的需求。

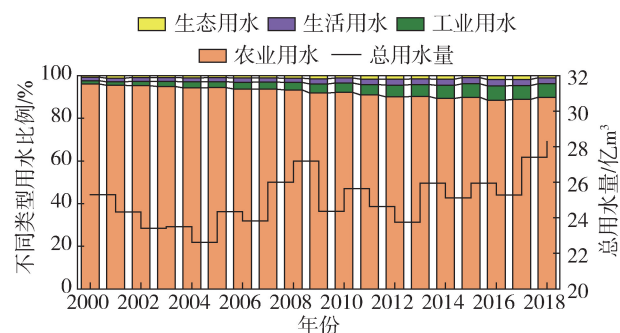
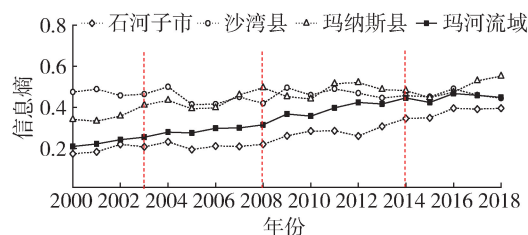


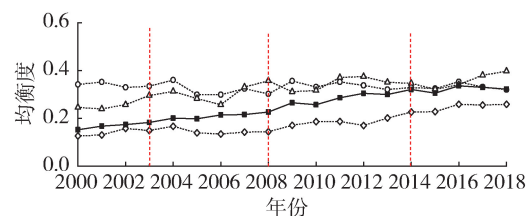
图3 玛纳斯河流域的历年各类用水比例变化

Fig.3 Interannual variation of each kind of water use ratio in Manas River Basin

根据信息熵值的取值变化情况(图4), 流域的用水结构信息熵总体呈持续增长趋势, 大致可以划分为4个阶段: 2000—2003 年的上升速度较快, 从 2000 年的 0.209 增加到 2003 年的 0.254, 伴随西部大开发的推行, 工业经济发展, 工业取用水也逐渐增加, 其用水比例也有所提升; 2004—2008 年, 信息熵大致维持在 0.278 ~ 0.314, 用水结构较为稳定, 由于农业灌溉用水量的快速增加, 信息熵增速变化减



(a) 用水结构的信息熵变化



(b) 用水结构的均衡度变化

图4 玛纳斯河流域历年用水结构的信息熵和均衡度变化
Fig.4 Variation of information entropy and balance degree of the water use structure in Manas River Basin

缓;2008—2013 年的信息熵保持平稳增长,2014 年达到 0.445;2014—2018 年的信息熵基本维持稳定,信息熵值在 2016 年达到 0.466,此后略有降低,这表明流域的用水总量得到一定控制,并且流域的用水系统均衡度也逐渐增加。

分地区来看,玛纳斯县的信息熵始终高于其他地区,且波动幅度较大,在 2006—2008 年呈一定的陡增趋势,2008—2015 年变化较为平缓,2015 年以后熵值缓慢增加;石河子市的信息熵在 2000—2008 年基本保持稳定,2008 年后呈现明显上升,2016 后的熵值维持在 0.395 左右;沙湾县熵值在 2000—2003 年基本维持在 0.457 ~ 0.499,2004 年达到最大为 0.499,2004—2014 年呈阶段性上升,此后变化趋于平缓。但从全流域来看,用水结构的信息熵和均衡度仍较低,信息熵的前期增速也较为缓慢,由于农业用水所占比重较大,工业以及第三产业发展程度仍较低,与其他地区相比,流域的用水结构仍较为不均,受单一因素影响较大,水资源开发利用向着更稳定和均衡方向发展的模式并不明显^[3]。

3.2 不同用水类型空间分布均衡度

图 5 为玛纳斯河流域的 2000 年、2010 年、2018 年不同用水量类型的洛伦兹曲线,其中黑色虚线为绝对平均线,对应的基尼系数如图 6 所示。

由图 5 可知,玛纳斯河流域在 2000—2018 年的农业用水洛伦兹曲线离绝对平均线较近,工业用水和生活用水次之,生态用水的洛伦兹曲线离绝对平均线较远。这说明目前流域的农业用水、工业用水和生活用水空间分布较为均衡,而生态用水在空间分布上最不平衡。2010 年流域工业用水、生活用水、生态用水的洛伦兹曲线的弯曲度呈现一定程度的下降,其中生态用水和生活用水的弯曲度降幅较大,工业用水的弯曲度降幅较小,这说明 2000—2010 年工业用水、生活用水、生态用水在空间上逐渐趋于均衡分布。农业用水的曲线弯曲度在 2018 年有所升高,工业用水曲线的弯曲度基本不变,生活用水、生态用水的曲线弯曲度略有升高,这说明随着干旱区的工业化发展,农业用水、生活用水、生态用水的空间分布不均衡程度有所增加,而工业用水的空间分布却呈一定的集中趋势^[17]。

农业用水、工业用水和生活用水的基尼系数均较小,而生态用水基尼系数较大,这与洛伦兹曲线结果较为一致(图 6)。2000—2018 年的农业用水基尼系数一直小于 0.2,说明其空间分布上属于绝对平均,各地区的农业用水基尼系数略有减小;工业用水基尼系数由 0.183 增加到 0.243,这表明其用水消

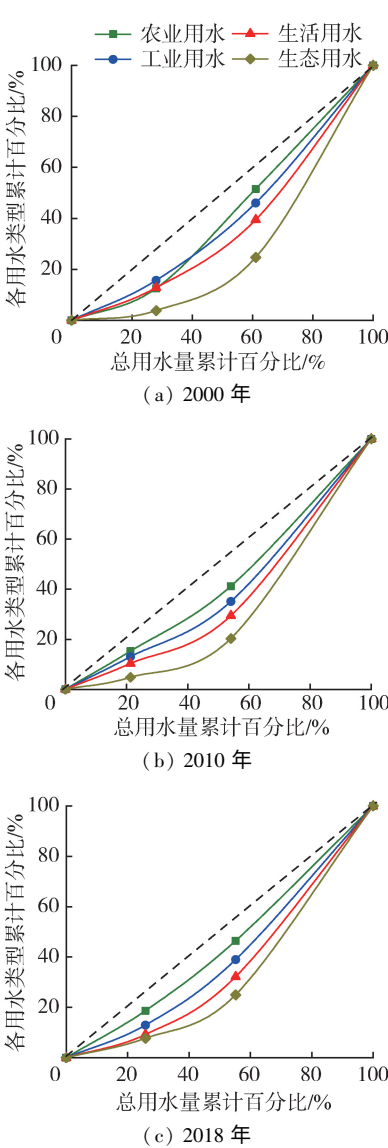


图 5 玛纳斯河流域不同用水类型的洛伦兹曲线
Fig.5 Lorentz curve of different kind of water use in Manas River Basin

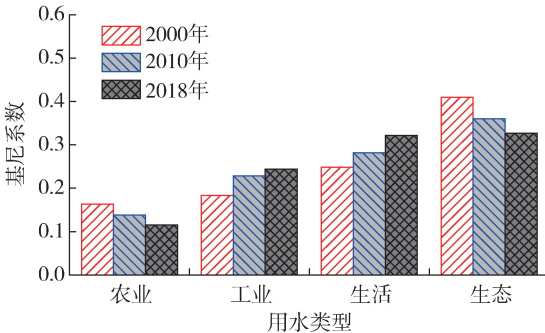


图 6 玛纳斯河流域不同用水类型的基尼系数
Fig.6 Gini coefficient of different kind of water use in Manas River Basin

耗空间分布由绝对平均变为比较平均,各地区工业耗水情况差异度增加,石河子市的人口最为密集,工业最发达,水资源总体较为匮乏;生活用水的基尼系数增加较明显,且用水消耗空间分布由比较平均变

为相对合理,这与流域人口分布的差异性和各县市城市化进程的不同有关。生态用水的基尼系数不断减小,说明其空间分布均衡性有所加强,正逐渐从差距较大变为相对合理。各县市的工业化进程差异不断扩大,随着节水灌溉、填埋沟渠等措施的实施,生态用水空间分布逐渐趋于均衡。

整体上玛纳斯河流域的农业用水比例仍处于 90% 以上,工业用水相对较少,生态用水占比较低。根据我国内陆河水资源开发现状,要使生态趋于改善,经济耗水须保持在 30% ~ 50% 范围内才较为合理,且不宜超过 60% [14]。因此,需要加大调整用水结构的力度,更好推动社会经济的发展。

3.3 水资源量空间匹配分析

图 7 为玛纳斯河流域水资源与各要素洛伦兹曲线,相应的基尼系数如图 8 所示。

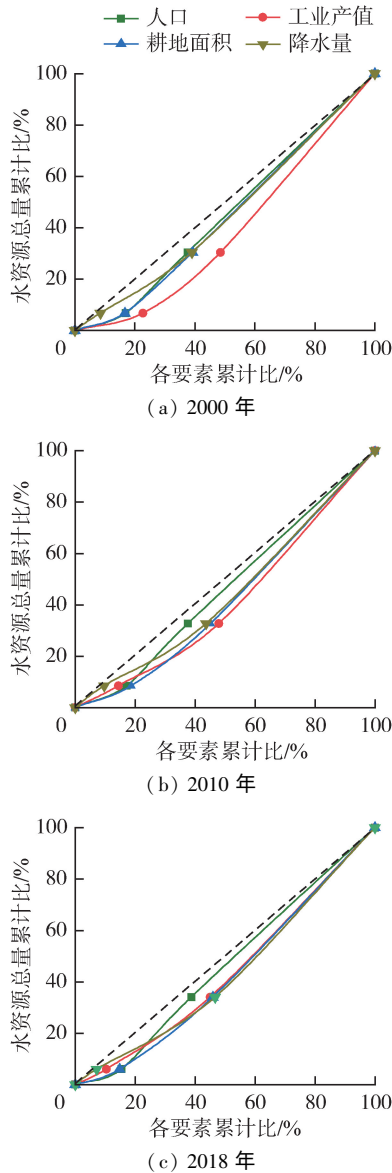


图 7 玛纳斯河流域水资源与各要素洛伦兹曲线
Fig.7 Lorentz curve of water resources and each factor in Manas River Basin

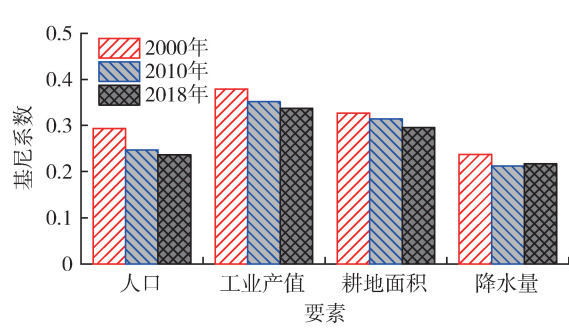


图 8 玛纳斯河流域各要素的基尼系数
Fig.8 Gini coefficient of each factor in Manas River Basin

从全流域来看,由图 7 可知,2000 年、2010 年和 2018 年的水资源量-人口的洛伦兹曲线离绝对平均线最近,说明流域人口分布较为集中,且与水资源分布匹配程度较高,流域人口大部分集中于中游绿洲区。水资源量-工业产值的洛伦兹曲线离绝对平均线最远,且弯曲程度有所下降,说明水资源对流域的工业产值的空间分布差异影响较大。水资源量-耕地和水资源量-降水洛伦兹曲线下降较小,说明尽管近年来流域节水灌溉兴起,但由于耕地规模扩大,水资源分配在耕地空间分布影响较小,全流域的水资源量空间分布与降水分配较为匹配。水资源量-耕地、水资源量-降水量的洛伦兹曲线介于另外两者之间,其空间分布差异性介于两者之间,且多年内无显著变化。

分县区来看,不同地区人口的空间分布有较大差别,石河子市人口密度最大,城镇化率在 2018 年达到 80.6%,水资源量仅占总体的 9.2%,人口数量约占流域的 62.4%,而工业产值占流域工业总产值的 64.9%,降水较为稀少,而耕地面积占流域的 55.7%。沙湾县的水资源量占比为 65.3%,降水相对较多,且人口占比为 20.5%,而工业产值仅为总体的 15.1%,且所占比例逐渐下降,沙湾县的耕地扩张较明显,水资源与耕地的空间匹配程度逐渐增加。玛纳斯县人口占流域的 16.9%,水资源量为 24.9%,而工业产值多年增长较为明显,2018 年达到流域总产值的 24.7%,水资源与工业产值差异程度较为明显。

从图 8 可知,总体来看,水资源量与人口总数和降水量较为匹配,与耕地相对匹配,工业产值对应的基尼系数最大,这说明流域的水资源量与工业总产值的不匹配程度最高。在 2000—2018 年水资源相对于各要素的基尼系数均呈不同程度的下降,均未超过国际上以 0.4 为标准的“警戒水平” [15-16],水资源量-降水量的基尼系数变化较小,匹配程度较高。

要提高水资源空间分布均衡程度,首先,需施行退耕还林(草),控制耕地扩大规模,继续发展节水

工程,提高流域水资源的综合利用率;其次,需要统筹配置,加强对各类水资源的合理利用,使农业发展规模和水资源的合理容量相匹配,推进重点水源工程建设,加强饮用水源地的保护,进行城乡水资源共享,缓解水资源短缺状况^[17-18];调整产业经济结构,缩减高耗水企业数量,发展低耗水产业,促进食品、纺织等行业的发展;注意节水技术的推广,对水资源进行集约利用,重视生态保护工作,完善水管理机制,从而最大限度实现水资源空间分布的均衡^[19]。

4 结 论

a. 流域用水结构的信息熵总体持续增长,从2000年的0.209增加到2018年的0.448,用水总量得到一定控制,用水系统均衡度逐渐增强,生活、生态用水的空间不均衡程度提高。玛纳斯县的信息熵始终高于其他地区,且波动较大,2008—2015年的变化较为平缓。

b. 工业用水基尼系数由0.183增加到0.243,其空间分布由绝对平均变为比较平均,各县市的工业化进程差异不断扩大,随着节水灌溉等措施的实施,生态用水空间分布逐渐趋于均衡,流域的水资源开发向着更稳定方向发展的模式不显著。

c. 随着人口增加和社会经济的发展,生活、生态用水的空间分布不均衡程度有所增加,而工业用水却呈一定的集中趋势。水资源与人口和降水较为匹配,与耕地相对匹配,与工业产值的不匹配程度最高,与降水量的匹配程度最高。

d. 在水资源的开发利用上,应控制耕地扩张规模,定量的进行水资源的经营与利用,改造不合理地水资源输配体系,调整产业结构,完善水管理机制,以推动社会经济的发展。

参考文献:

[1] 范嘉伟,黄锦林,袁明道,等.广州市用水结构空间均衡差异性分析[J].水资源保护,2020,36(4):82-86. (FAN Jiawei, HUANG Jinlin, YUAN Mingdao, et al. Analysis of spatial equilibrium of water consumption structure in Guangzhou City [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 82-86. (in Chinese))

[2] 张志彬,胡继连.山东省用水结构演变及驱动因子分析[J].山东农业大学学报(社会科学版),2019,21(4):60-65. (ZHANG Zhibin, HU Jilian. Evolution of water use structure in Shandong Province and analysis of driving factors [J]. Journal of Shandong Agricultural University (Social Science Edition), 2019, 21(4): 60-65. (in Chinese))

[3] 王永静,闫周府.新疆玛纳斯河流域用水结构演变及其驱动力分析[J].干旱区研究,2017,34(2):243-250.

(WANG Yongjing, YAN Zhoufu. Evolution and driving forces of water consumption structure in the Manas River Basin in Xinjiang [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(2): 243-250. (in Chinese))

[4] 雷欢.陕西省用水结构变化特征及驱动力分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.

[5] 洪洪扬,宋志松,程涛,等.基于基尼系数的南水北调受水区水资源空间匹配分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2017,53(2):175-179. (HONG Siyang, SONG Zhisong, CHENG Tao, et al. Spatial matching analysis of water resources in the intake area of South-to-North Water Transfer Project based on Gini coefficient [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2017, 53(2): 175-179. (in Chinese))

[6] 张洪波,兰甜,王斌.基于洛伦茨曲线和基尼系数的榆林市用水结构时空演化及其驱动力分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):15-24. (ZHANG Hongbo, LAN Tian, WANG Bin. Analysis of temporal and spatial evolution and driving forces of water consumption structure in Yulin City based on Lorenz curve and Gini coefficient [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(1): 15-24. (in Chinese))

[7] 薛联青,倪涛,刘远洪,等.基于地表径流量预测的玛纳斯河流域绿洲适宜规模计算[J].水资源保护,2021,37(1):7-13. (XUE Lianqing, NI Tao, LIU Yuanhong, et al. Calculation of suitable scale of oasis in Manas River Basin based on surface runoff prediction [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 7-13. (in Chinese))

[8] XU Z, WEI H, FAN W, et al. Relationships between ecosystem services and human well-being changes based on carbon flow: a case study of the Manas River Basin, Xinjiang, China [J]. Ecosystem Services, 2019, 37: 100934.

[9] 包安明.气候变化与人类活动对新疆玛纳斯河流域水文生态过程影响研究[M].北京:气象出版社,2013.

[10] XUE L, ZHU B, WU Y, et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River Basin based on terrain gradients [J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 283-293.

[11] 郑伟,王鲁河.黑龙江省用水结构演变及其驱动力分析[J].哈尔滨师范大学自然科学学报,2017,33(4):89-93. (ZHENG Wei, WAN Luhe. Analysis of water consumed structure change and its driving forces in Heilongjiang Province [J]. Natural Sciences Journal of Harbin Normal University, 2017, 33(4): 89-93. (in Chinese))

[12] 吴昊,华骅,王腊春,等.区域用水结构演变及驱动力分析[J].河海大学学报(自然科学版),2016,44(6):477-484. (WU Hao, HUA Hua, WANG Lachun, et al. Analysis of change and driving forces of regional water consumption structure [J]. Journal of Hohai University

- (Natural Sciences), 2016, 44 (6): 477-484. (in Chinese))
- [13] 马黎华,康绍忠,栗晓玲. 西北干旱内陆区石羊河流域用水结构演变及其驱动力分析[J]. 干旱地区农业研究,2008(1):125-130. (MA Lihua,KANG Shaozhong,SU Xiaoling. Study on evolution and its driving forces of water utilization structure of Shiyang River Basin in Northwest arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008(1):125-130. (in Chinese))
- [14] 王长建,张小雷,杜宏茹,等. 塔里木河中下游城镇化进程中水资源利用分析:以巴音郭楞蒙古自治州为例[J]. 干旱区地理,2012,35(2):324-331. (WANG Changjian, ZHANG Xiaolei, DU Hongru, et al. Relationship between urbanization and water use in Tarim River;a case of Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture [J]. Arid Land Geography, 2012, 35 (2): 324 331. (in Chinese))
- [15] 朱彩琳,董增川. 引汉济渭受水区用水结构及水资源空间匹配分析[J]. 人民长江,2018,49(16):47-52. (ZHU Cailin,DONG Zengchuan. Water use structure and spatial matching analysis of water resources in water reception area of Hanjiang-to-Weihe River Water Transfer Project [J]. Yangtze River, 2018, 49 (16): 47-52. (in Chinese))
- [16] 栗晓玲,赵晨,马黎华. 关中地区近20年用水结构演变及其驱动力研究[J]. 灌溉排水学报,2008(5):71-73. (SU Xiaoling,ZHAO Chen,MA Lihua. Water consumed structure evolvment and its driving forces for Guanzhong Region in the past 20 years[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2008(5):71-73. (in Chinese))
- [17] 常浩娟,刘卫国,吴琼. 玛纳斯河流域用水分析、需水预测和影响因素[J]. 节水灌溉,2017(7):88-93. (CHANG Haojuan, LIU Weiguo, WU Qiong. Water consumption,requirement forecast and influence factors of Manas River Basin [J]. Water Saving Irrigation,2017(7):88-93. (in Chinese))
- [18] 夏帆,陈莹,窦明,等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护,2020,36(1):52-57. (XIA Fan,CHEN Ying,DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. Water Resources Protection,2020,36(1):52-57. (in Chinese))
- [19] 王飞,蒋文杰,李景保,等. 皖江城市带产业结构与用水结构的互动耦合关系[J]. 水资源保护,2017,33(6):60-64. (WANG Fei, JIANG Wenjie, LI Jingbao, et al. Interactive coupling relationship between industrial structure and water use structure in Wanjiang City Belt [J]. Water Resources Protection,2017,33(6):60-64. (in Chinese))

(收稿日期:2020-05-26 编辑:彭桃英)

(上接第 116 页)

- [13] 赵克勤,宣爱理. 集对论:一种新的不确定性理论方法与应用[J]. 系统工程,1996(1):18-23. (ZHAO Keqin, XUAN Aili. Set pair theory;a new method and application of uncertainty theory[J]. System Engineering, 1996(1):18-23. (in Chinese))
- [14] 吴开亚,金菊良,周玉良,等. 流域水资源安全评价的集对分析与可变模糊集耦合模型[J]. 四川大学学报(工程科学版),2008,40(3):6-12. (WU Kaiye,JIN Juliang, ZHOU Yuliang, et al. Set pair analysis based variable fuzzy set assessment model for watershed water resources security[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition),2008,40(3):6-12. (in Chinese))
- [15] 金菊良,沈时兴,潘争伟,等. 水资源集对分析理论与应用研究进展[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(4):54-66. (JIN Juliang, SHEN Shixing, PAN Zhengwei, et al. Advances in theoretical and applied research on set pair analysis method for water resources system[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2017, 38(4):54-66. (in Chinese))
- [16] 李文君,邱林,陈晓楠,等. 基于集对分析与可变模糊集的河流生态健康评价模型[J]. 水利学报,2011,42(7):775-782. (LI Wenjun, QIU Lin, CHEN Xiaonan, et al. Assessment model for river ecology health based on set pair analysis and variable fuzzy set [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42 (7): 775-782. (in Chinese))
- [17] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58. (ZHNAG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):53-58. (in Chinese))
- [18] 刘晓霞,解建仓. 山西省用水结构与产业结构变动关系[J]. 系统工程,2011,29(4):45-52. (LIU Xiaoxia, XIE Jiancang. The interactive relationship between water consumption structure and industrial structure of Shanxi Province [J]. System Engineering, 2011, 29 (4): 45-52. (in Chinese))
- [19] 秦润婧. 山西省煤炭开采对水资源的影响[J]. 山西煤炭,2018,38(1):46-48. (QIN Runqiang. Effects of coal mining on water resources in Shanxi Province[J]. Shanxi Coal,2018,38(1):46-48. (in Chinese))
- [20] 赵天宇. 山西省煤炭资源开采与水资源的关系研究[J]. 生产力研究,2016(1):40-44. (ZHAO Tianyu. Study on the relationship between coal mining and water resources in Shanxi Province [J]. Productivity Research, 2016(1):40-44. (in Chinese))

(收稿日期:2021-02-24 编辑:熊水斌)