DOI:10.15928/j.1674-3075.201907040171

民勤荒漠绿洲干旱影响因子及驱动机制研究

石媛媛[1],纪永福[2],张恒嘉[1],王雅云[1]

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070;
2.甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070)

摘要:探究荒漠绿洲系统中气象、水文、农业、社会经济及综合干旱形成的原因,可为干旱环境与水循环研究以及生态系统的恢复与建设提供理论依据。基于主成分分析法,选取21个指标,对甘肃民勤荒漠绿洲的干旱驱动机制进行多层面和多角度解析。结果表明,研究期内蒸发量和平均温度是引起气象干旱的主要因素,累计方差贡献率为86.853%;水文干旱受制于民调水量和出库水量,累计方差贡献率为92.190%;农业干旱主要是由耕地面积与有效灌溉面积增大所致,累计方差贡献率为86.179%;工业用水与万元工业增加值用水量成为社会经济干旱的驱动要素,累计方差贡献率为87.582%。综合干旱层面提取4个主成分,其累计方差贡献率为98.255%,准确反映干旱环境的形成原因,年蒸发量、平均湿度、地表供水量、地下水开采量、地下水位、出库水量、民调水量、上游来水量、水利财政支出等因素是民勤荒漠绿洲干旱的主要驱动力来源,其对干旱的影响程度排序为:地下水开采量>出库水量>地表供水量>民调水量>年蒸发量>平均湿度>上游来水量>地下水位>水利财政支出。

关键词:荒漠绿洲;干旱因子;驱动机制;主成分

中图分类号:X821 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2021)04-0018-08

干旱是指某一地区长期无雨或少雨,使空气、土壤水分不足、作物水分平衡遭到破坏、水文循环减弱或形成非良性循环而影响生态系统的现象。干旱的发生和持续,给农业生产带来巨大损失,还造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多生态和环境方面的不利影响(闫娜娜,2012)。随着人口和经济的增长及不合理的水资源利用,区域内水资源日益匮乏,直接导致干旱地区的扩大与干旱化程度的加重,甚至出现严重的生态危机,干旱的形成过程和作用机制已成为全球关注的重点。

国际上一般将干旱分为气象干旱、水文干旱、农业干旱、社会经济干旱4种类型;其中,气象干旱和水文干旱是从其自然属性考虑,农业干旱和社会经济干旱则侧重其社会属性(裴源生等,2013)。翁白莎(2012)以东辽河为背景,构建广义干旱演变的整体驱动模式,并提出基于3S技术的广义干旱风险区划方法;余中元等(2014)结合"压力-状态-响应"模型和"暴露度-敏感性-恢复力"模型,研究社会生态系统脆弱性驱动机制,甄选出影响风险、敏感性及应对能力的驱动因素;蒋桂芹(2013)按照干旱类型的不同,结合气候系统理论,从各层面追溯干旱形成的原因,构建干旱评估指标,提出干旱驱动定量分析方法;闫浩文等(2013)采用主成分分析法,探究影响民勤绿洲地下水埋深的因素,并运用灰色预测模型对主要人为因素进行预测,指出人口、粮食产量呈增长趋势,地下水埋深呈上升趋势;王海青和张勃(2007)认为黑河流域干旱面积的扩张受气候干旱、水文干旱、人为干旱的影响;程国栋和王根绪(2006)研究得出水资源开发利用、水土保持及土地利用等人类活动是造成西北地区水文干旱进一步加剧的因素;马海娇等(2013)认为干旱荒漠化是一个关乎生态、地理、气候、人文等众多因子的综合性过程。

目前,干旱演变驱动机制研究尚处于起步阶段,相关的理论成果尚不够系统深入,加强干旱事件演变的驱动机制分析是未来的研究趋势(郭瑞霞等,2015)。国内的相关研究多集中在单一方面,对荒漠绿洲综合环境的干旱研究不够深入和具体,造成干旱驱动因子的重叠和繁杂无序。要从根本上反映荒漠绿洲系统干旱环境与生产、生活的关系,就必须从多方入手,揭示引起干旱形成的重要驱动因素,深入分析荒漠绿洲系统中气象、水文、农业、社会经济与干旱之间的相互作用,并通过对相关指标的合理调控,以此改变干旱发展历程,提高绿洲系统的承载能

收稿日期:2019-07-04 **修回日期**:2021-03-18

基金项目:国家自然科学基金(51669001)。

作者简介:石媛媛,1991年生,女,硕士研究生,研究方向为荒漠绿洲生态需水。E-mail:1013832574@qq.com

通信作者:张恒嘉,1974年生,男,教授,博士生导师,主要从事农田水利工程与农业生态教研工作。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

力，改善荒漠绿洲环境。本文以甘肃省民勤县为例，探究干旱形成条件及其驱动机制，旨在为荒漠绿洲生态系统的恢复与建设提供理论依据。

1　研究区概况

民勤县位于甘肃省西北部、河西走廊东北部、石羊河流域下游（101°49′41″～104°12′10″E，38°3′45″～39°27′37″N），是阻隔巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠合拢的生态屏障，总面积约为 1.59×10^4 km^2，周长 672.22 km（图 1）。民勤县属于大陆性干旱气候，多风沙、少降雨，全年平均日照时数 3 100 h，年均风速 2.7 m/s，年降雨量约 115 mm，多年平均有效降雨为 64.4 mm，蒸发量在 2 300 mm 左右。低温主要集中在 1 月、2 月和 12 月，高温出现在 6－8 月。

民勤县上游来水量由 1956 年的 5.14×10^8 m^3 逐年减少至 2002 年的 0.62×10^8 m^3，地下水开采成为支撑人类生存发展的必要措施，地下水埋深快速下降引发一系列生态问题（王琪等，2003）。自 2007 年实施《石羊河流域重点治理规划》以来，民勤生态环境有所改善，地下水开采量由 2007 年的 4.92×10^8 m^3 减少到 2015 年的 1.15×10^8 m^3。但依据民勤站 2007～2016 年地下水位观测数据显示，10 年间地下水位埋深由 21.18 m 降到 23.31 m，平均每年下降 21.4 cm；民调水量由 2007 年的 0.45×10^8 m^3 逐渐增加到 2015 年的 0.83×10^8 m^3，出库水量也逐年增加。随着节水农业的发展、工业技术的革新，农业灌溉用水和工业用水减少，保证了用于生态建设的水量。2010 年到 2015 年，民勤县国内生产总值增加 36.71 亿元，平均年增长 7.34 亿元。在经济快速发展的同时，占用消耗资源量方面表现为万元国内生产总值用水量与万元工业增加值用水量都在逐步减少。

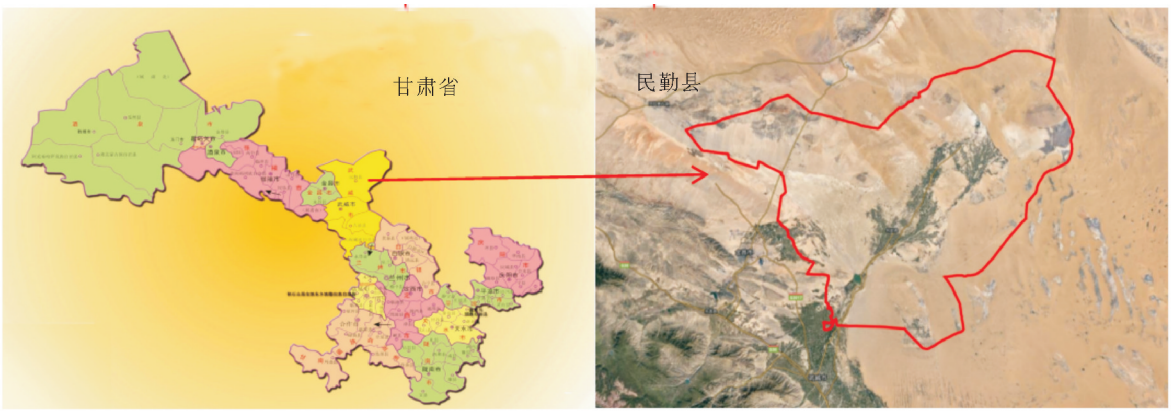


图 1　甘肃省及民勤县区位示意

Fig.1　Location of Minqin County in Gansu Province

2　研究方法

2.1　主成分指标选择

主成分分析法是利用降维思想，把多个相关性指标转化成为几个互不相关的综合指标，克服了多变量之间的重叠性。转化的综合指标即为主成分，且每个主成分都是原始变量的线性组合（杨怀德等，2017）。当用第一个线性组合不能抽取更多信息时，再考虑用第二个线性组合，直到所抽取的信息与原指标相差不多时为止。引入贡献率来表明选取主成分能够反映原样本信息量的程度，有效描述多个指标构成的样本。

本文从气象、水文、农业、社会经济 4 个方面入手，研究民勤荒漠绿洲干旱驱动机制，分第一目标层、第二表征层和第三指标层，共选取 21 个干旱影响指标（图 2）。

2.2　数据处理

各类指标对地区干旱的影响有正有负，正向指标值越高，干旱程度越大；负向指标值越低，干旱程度越大，因此需要对指标进行正向化处理，一般取其倒数。主成分分析对极端异常值很敏感，为减弱其对结果的影响，要对指标进行标准化处理：

$$X_{ij}=(Y_{ij}-\overline{Y_j})/S_j \qquad ①$$

$$\overline{Y_j}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}Y_{ij} \qquad ②$$

$$S_j^2=\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}(Y_{ij}-\overline{Y_j})^2 \qquad ③$$

式中：X_{ij} 为标准化值；$\overline{Y_j}$ 为均值；S_j^2 为方差。

气象资料和水文数据取自甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站，其余数据来自《民勤县国民经济和社会发展统计资料汇编》。采用 SPSS19.0 对数据进行统计和正向标准化处理。

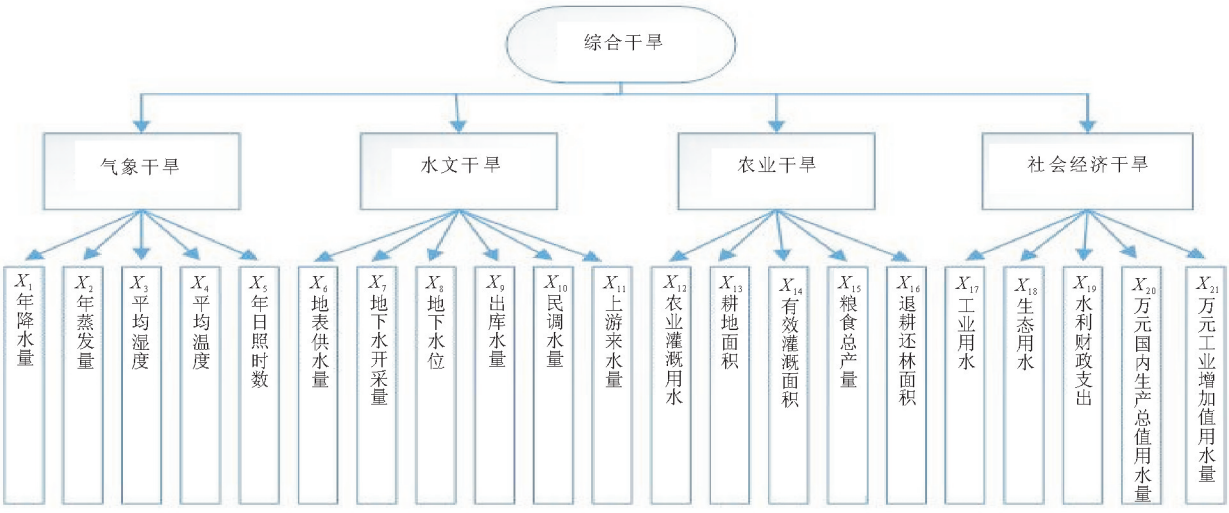


图2 指标层次及指标选择

Fig.2 Index system of drought driving factors for Minqin desert oasis

3 结果与分析

3.1 气象干旱

气象干旱一般指非正常的干燥天气时期，通常主要以降水的短缺、标准化前期降水指数(SAPI)作为气象干旱指标。本文依据民勤气候特征，遴选出X_1年降水量、X_2年蒸发量、X_3平均湿度、X_4平均温度、X_5年日照时数共5个指标，对民勤气象干旱因素进行分析(表1)。提取了两个主成分，累计方差贡献率为86.853%，表中X_2在主成分1上的荷载为0.982，表明X_2年蒸发量与成分1紧密相关；而X_4在主成分2上的荷载高于其他要素，表明X_2对整体的影响大于其他要素，由此说明年蒸发量与平均温度变化是气象干旱的主要驱动因素，最直接原因是大气降水量减少和气温偏高。

3.2 水文干旱

石羊河流域下游的水资源供需矛盾很突出，民勤地区用水主体的资源分配不合理，依据该地区实际情况，选取X_6地表供水量、X_7地下水开采量、X_8地下水位、X_9出库水量、X_{10}民调水量、X_{11}上游来水量共6个指标分析水文干旱驱动因素。水文水资源因子解释总方差及成分矩阵见表2。

表1 气象因子解释总方差及成分矩阵

Tab.1 Meteorological factors contributing to the total variance, with the composition matrix

成分	初始特征值			提取平方和载入			指标	成分	
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%		1	2
1	2.961	59.222	59.222	2.961	59.222	59.222	X_1	0.821	0.019
2	1.382	27.631	86.853	1.382	27.631	86.853	X_2	0.982	0.021
3	0.489	9.773	96.626				X_3	−0.974	−0.111
4	0.169	3.373	99.998				X_4	0.289	0.898
5	8.03×10^{-5}	0.002	100				X_5	−0.540	0.749

表2 水文水资源因子解释总方差及成分矩阵

Tab.2 Hydrological and water resource factors contributing to the total variance, with the composition matrix

成分	初始特征值			提取平方和载入			指标	成分	
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%		1	2
1	4.523	75.383	75.383	4.523	75.383	75.383	X_6	0.940	−0.040
2	1.008	16.808	92.190	1.008	16.808	92.190	X_7	0.876	−0.156
3	0.391	6.515	98.705				X_8	−0.736	0.652
4	0.073	1.209	99.914				X_9	0.946	0.297
5	0.005	0.086	100				X_{10}	0.968	−0.107
6	1.14×10^{-17}	1.90×10^{-16}	100				X_{11}	0.706	0.676

由表2可知，提取两个主成分，方差贡献率高达92.190%。对成分1影响最大的荷载为X_{10}民调水量(0.968)，其次是X_9出库水量(0.946)；成分2的变化主要集中在X_{11}上游来水量所贡献的荷载量

0.676。X_{10}民调水量属于外流域调水，已成为绿洲生态系统必不可少的水量，保证了生态系统的可持续发展，同时也成为影响干旱的因素。X_{11}上游来水量与 X_9 出库水量有紧密的联系，主要取决于石羊河中上游各用水部门对水资源的开发利用及下游民勤绿洲区对水资源的需求量，是保证绿洲生态稳定不可或缺的要素。

3.3　农业干旱

农业干旱一般指由于降水减少导致土壤含水量过低，造成农作物产量减少；另一方面，农业干旱表现为大面积的适宜耕地缺水和农业用水资源的匮乏。选取 X_{12}农业灌溉用水、X_{13}耕地面积、X_{14}有效灌溉面积、X_{15}粮食总产量、X_{16}退耕还林面积共计 5 个指标，对农业干旱形成要素进行分析(表 3)。

表 3 中，大于 1 的特征值只有 4.309，所以只提取了一个主成分，累计方差贡献率为 86.179%，该主成分荷载量主要来源为 0.924 与 0.922。该结果表明主成分与 X_{13}耕地面积的关系最为密切，其次是 X_{14}有效灌溉面积，由此得出农业干旱主要是由耕地面积与有效灌溉面积的增大所引起。近年来，随着人口增长、农业工程和水利工程技术的提高，X_{13}耕地面积和 X_{14}效灌溉面积也逐渐增大，引起灌溉用水量的大幅增长，挤占了生态用水，使得本就脆弱的绿洲生态系统逐步向干旱荒漠化发展，灌溉用水直接导致农业干旱和生态系统干旱的形成。

3.4　社会经济干旱

社会经济干旱是指相互作用的自然系统与人类社会经济系统，由水资源分布利用不平衡造成的生产力减弱、生产资料分配不合理、经济疲软等社会经济活动现象。选取具有代表性的 X_{17}工业用水、X_{18}生态用水、X_{19}水利财政支出、X_{20}万元国内生产总值用水量、X_{21}万元工业增加值用水量共 5 个指标进行统计分析，探讨造成社会经济干旱的驱动因素，结果见表 4。

表 3　农业因子解释总方差及成分矩阵

Tab.3　Agricultural factors contributing to the total variance, with the composition matrix

成分	初始特征值			提取平方和载入			指标	成分 1
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%		
1	4.309	86.179	86.179	4.309	86.179	86.179	X_{12}	-0.950
2	0.528	10.554	96.733				X_{13}	0.924
3	0.128	2.566	99.299				X_{14}	0.922
4	0.035	0.698	99.997				X_{15}	-0.955
5	0	0.003	100				X_{16}	0.889

表 4　社会经济因子解释总方差及成分矩阵

Tab.4　Social and economic factors contributing to the total variance, with the composition matrix

成分	初始特征值			提取平方和载入			指标	成　分	
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%		1	2
1	3.295	65.898	65.898	3.295	65.898	65.898	X_{17}	0.980	0.085
2	1.084	21.684	87.582	1.084	21.684	87.582	X_{18}	-0.971	0.189
3	0.599	11.976	99.558				X_{19}	0.705	0.043
4	0.017	0.344	99.902				X_{20}	0.926	0.276
5	0.005	0.098	100				X_{21}	-0.188	0.981

表 4 中提取两个主成分，累计方差贡献率为 87.582%，成分 1 荷载来源为 X_{17}工业用水的对应值 0.980。成分 2 荷载贡献量主要由 X_{21}万元工业增加值用水量提供。社会经济干旱主要考虑影响社会生产生活和人类消费活动的问题，工业用水与万元工业增加值用水量成为影响社会经济干旱的驱动因素，也是导致民勤县区域经济条件变化的主要影响因子。

3.5　综合干旱影响因子

民勤荒漠绿洲生态系统研究涉及多领域、多层面，各影响因子之间存在非线性耦合关系。为保证荒漠绿洲生态系统的完整性和统一性，对 21 个指标进行处理，如表 5 所示。提取 4 个互相独立的主成分，累计方差贡献率为 98.255%，所提取信息总量明显高于各单项分别提取的信息量，是各影响因子对系统综合作用的体现。主成分分析碎石图如图 3。

利用 Varimax 法(正交旋转法，也称方差最大旋转法)得到旋转后因子负荷矩阵，以此反映各主成分与影响因子关系。载荷的绝对值大小反映指标对评价结果的影响程度，正负号反映指标与主成分之间的作用方向；主成分载荷的绝对值越大，表示指标对评价结果越重要，即公因子所包含的原始指标信息就越多(刘影等，2016)。

不同主成分影响因子的作用见图 4。

表5　总指标解释总方差

Tab.5　The total index contributing to the total variance

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%	合计	方差/%	累积/%
1	12.516	59.600	59.600	12.516	59.600	59.600	7.915	37.691	37.691
2	4.326	20.598	80.198	4.326	20.598	80.198	4.779	22.759	60.450
3	2.182	10.389	90.588	2.182	10.389	90.588	4.337	20.655	81.104
4	1.610	7.667	98.255	1.610	7.667	98.255	3.602	17.150	98.255
5	0.367	1.745	100						
6	4.901×10^{-16}	2.334×10^{-15}	100						
…	…	…	…						
21	-6.918×10^{-16}	-3.295×10^{-15}	100						

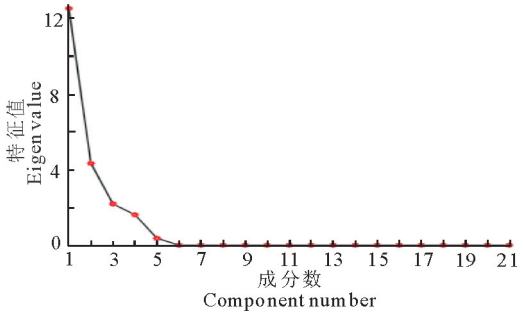


图3　21个生态指标的主成分分析碎石图

Fig.3　Gravel diagram of 21 ecological indicators by principal component analysis

主成分表达式能详细说明各影响因子对干旱生态系统的影响程度，对成分矩阵进行转换和计算变量命令得出主成分特征向量矩阵，主成分系数表达式如下：

$$Y_1=0.1X_1+0.11X_2-0.09X_3-0.16X_4-0.26X_5+0.26X_6+0.24X_7-0.2X_8+0.26X_9+0.28X_{10}+0.18X_{11}-0.25X_{12}+0.23X_{13}+0.23X_{14}-0.26X_{15}+0.26X_{16}-0.25X_{17}+0.23X_{18}-0.19X_{19}-0.27X_{20}-0.06X_{21} \quad ④$$

$$Y_2=0.35X_1+0.43X_2-0.45X_3+0.29X_4-0.06X_5+0.04X_6+0.13X_7-0.12X_8+0.09X_9+0X_{10}+0.19X_{11}+0.19X_{12}-0.05X_{13}-0.05X_{14}+0.14X_{15}-0.09X_{16}+0.15X_{17}-0.24X_{18}-0.11X_{19}+0.11X_{20}-0.38X_{21} \quad ⑤$$

$$Y_3=0.12X_1-0.04X_2+0.05X_3+0.29X_4-0.07X_5-0.03X_6-0.09X_7+0.45X_8+0.18X_9-0.05X_{10}+0.43X_{11}+0.09X_{12}-0.05X_{13}-0.04X_{14}-0.12X_{15}-0.16X_{16}-0.05X_{17}+0.17X_{18}-0.46X_{19}+0.09X_{20}+0.39X_{21} \quad ⑥$$

$$Y_4=0.4X_1-0.13X_2+0.1X_3-0.14X_4+0.27X_5+0.25X_6-0.35X_7+0.04X_8+0.11X_9+0.06X_{10}-0.05X_{11}+0X_{12}+0.42X_{13}+0.42X_{14}-0.09X_{15}-0.18X_{16}+0.27X_{17}-0.17X_{18}+0.03X_{19}+0.15X_{20}+0.01X_{21} \quad ⑦$$

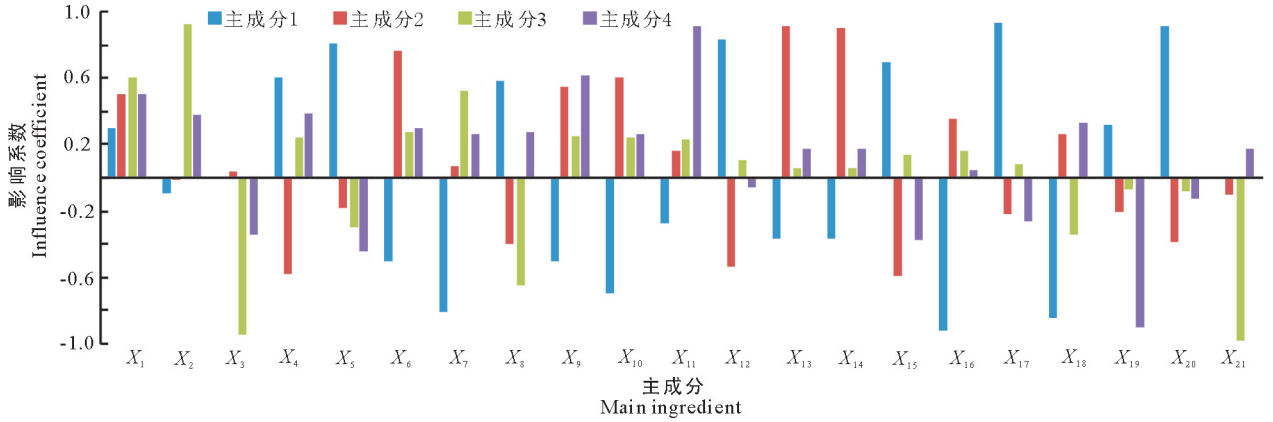


图4　主成分影响因子的作用

Fig.4　The role of influencing factors in the principal components

从式④可以看出，X_6 地表供水量、X_7 地下水开采量、X_9 出库水量、X_{10} 民调水量在第一主成分上有较高的荷载，说明第一主成分 Y_1 依赖于系数绝对值介于0.25～0.28的因素；

式⑤可见，第二主成分上 X_2 年蒸发量和 X_3 平均湿度有较高的荷载，说明第一主成分 Y_2 的贡献率来源主要依赖于 X_2 与 X_3 的变化；

式⑥中，X_8 地下水位、X_{11} 上游来水量和 X_{19} 水利财政支出成为第三主成分的重要载荷项，表明第三主成分 Y_3 是由 X_8、X_{11} 和 X_{19} 这3个变量决定的；

式⑦中，X_1 年降水量、X_{13} 耕地面积和 X_{14} 有效灌溉面积成为第四主成分 Y_4 的主要荷载项。

综上可见，X_2 年蒸发量、X_3 平均湿度、X_6 地

表供水量、X_7 地下水开采量、X_8 地下水位、X_9 出库水量、X_{10}民调水量、X_{11}上游来水量、X_{19}水利财政支出影响因子是引起民勤荒漠绿洲生态环境综合干旱的重要因素。

由表 5 得出主成分 1 与主成分 2 已经提取 80.198%的信息,通常当累积贡献率大于 85%时,认为选取的新的主成分包含原变量的大部分信息,即可以用主成分代替原变量,由此主成分 3 所提取的原指标信息在重要程度上高于主成分 4,且不可或缺;主成分 4 提取的要素信息可以作为次要影响因素。按照主成分 1、主成分 2 和主成分 3 所占信息的比重,计算出对干旱影响程度的排列次序为:X_7 地下水开采量>X_9 出库水量>X_6 地表供水量>X_{10}民调水量>X_2 年蒸发量>X_3 平均湿度>X_{11}上游来水量>X_8 地下水位>X_{19}水利财政支出。

4　讨论

4.1　民勤荒漠绿洲干旱形成的主要驱动因素

本次研究表明,X_2 年蒸发量、X_4 平均温度变化是气象干旱形成发展的主要驱动因素,尤其是对于民勤荒漠绿洲区来说,蒸发量通常是有效降水量的 35 倍(杨帅等,2014),对干旱的影响作用更是不容忽视。水文干旱依赖于 X_9 出库水量、X_{10}民调水量的变化,水文干旱对民勤的影响要远远大于气象干旱,如果地表水资源调配不合理、地下水资源枯竭,民勤绿洲将会最终演化成沙漠的一部分。农业干旱主要是由 X_{13}耕地面积与 X_{14}有效灌溉面积的增大所引起,而 X_{17}工业用水与 X_{21}万元工业增加值用水量成为影响社会经济干旱的驱动因素,以上结果反映出现阶段造成民勤绿洲各层面干旱的主要驱动要素。在对民勤荒漠绿洲生态环境进行综合干旱评价时,应重点考虑 X_2 年蒸发量、X_3 平均湿度、X_6 地表供水量、X_7 地下水开采量、X_8 地下水位、X_9 出库水量、X_{10}民调水量、X_{11}上游来水量、X_{19}水利财政支出等影响因素,其影响程度排序为:X_7>X_9>X_6>X_{10}>X_2>X_3>X_{11}>X_8>X_{19}。

不同干旱之间通过物质能量传递进行相互转化,其中气象干旱和水文干旱在水循环过程中相互依存,气象干旱也直接影响农作物的生长,影响农业干旱程度,同时耕地面积与有效灌溉面积变化也直接影响粮食产量。水文干旱直接影响到社会经济的发展,而社会经济干旱也在农业机械化、农作物新品种等方面制约农业的发展。气象干旱是干旱的先决条件,并没有直接影响到社会经济,但其以水循环作为运载途径,间接影响社会经济的发展和人类生活的改善(董前进和谢平,2014;陈文华等,2019)。

4.2　多层面确定造成区域干旱的主要驱动因子

研究表明,地下水埋深是控制荒漠植被类型、群落结构及地上生物量的主要因素(金晓媚等,2016;白玉锋等,2017),强调了地下水的作用,这与本研究得出的 X_7 地下水开采量、X_8 地下水位是影响综合干旱的重要因子结论吻合;同时,研究得出 X_2 年蒸发量、X_3 平均湿度是影响综合干旱的重要因子,这与王媛等(2019)研究结果一致。耕地面积与有效灌溉面积是影响农业生产和农业干旱的主要因素,这与基于灰色关联分析得出耕地面积是引起民勤绿洲荒漠化的主要驱动力的研究结论相近(马艳萍,2012;骈宇哲等,2015)。区域经济条件是农业干旱形成的主要因子,侧面反映了本研究的正确性(Fraser et al,2008)。徐新创等(2010)从农业脆弱性角度着手,认为社会经济对农业生产的影响逐渐深入,并成为影响脆弱程度的重要因素。以上结果从绿洲生态系统的整体性出发,从多层面选择因素进行分析,在确定各层面驱动因子的同时,识别了造成区域综合干旱的主要因子,补充了在以往研究中侧重于区域降水量而忽略其他重要因素造成研究不全面的问题。

综上,民勤荒漠绿洲干旱的发生与流域水气条件、农业灌溉用地、经济发展程度等有关,在无法剔除人类干预的情况下,分别揭示了导致气象、水文、农业、社会经济干旱的影响因子以及干旱形成最重要的驱动因素;阐明了水在循环系统中的主导作用以及各类干旱的相互关系,为荒漠绿洲干旱生态系统的恢复与建设指明了方向。后期研究重心应放在解析干旱形成机理,明晰各影响因素之间的物质循环和能量转化,构建复杂性视角下干旱与其影响因素间的关系网络,探讨各表征层之间的耦合关系,最终阐明民勤水环境变化与干旱形成的互馈机制,为实现社会-经济-生态可持续发展打下基础。

参考文献

白玉锋,徐海量,张沛,等, 2017. 塔里木河下游荒漠植物多样性、地上生物量与地下水埋深的关系[J]. 中国沙漠,37(4):724-732.

陈文华,徐娟,李双成,2019. 怒江流域下游地区气象与水文干旱特征研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),55(4):764-772.

程国栋,王根绪, 2006. 中国西北地区的干旱与旱灾-变化趋

势与对策[J]. 地学前缘,13(1):3-14.
董前进,谢平,2014. 水文干旱研究进展[J]. 水文,34(4):1-7.
郭瑞霞,管晓丹,张艳婷,2015. 我国荒漠化主要研究进展[J]. 干旱气象,33(3):505-513.
蒋桂芹,2013. 干旱驱动机制与评估方法研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院.
金晓媚,王松涛,夏薇,2016. 柴达木盆地植被对气候与地下水变化的响应研究[J]. 水文地质工程地质,43(2):31-36,43.
刘影,李丹,何蕾,等,2016. 赣南地区农业生态系统脆弱性评价及驱动力分析[J]. 江西师范大学学报(哲学社会科学版),49(3):72-79.
马艳萍,2012. 绿洲-荒漠耦合研究及其驱动因子的灰色关联分析[D]. 兰州:兰州大学.
马海娇,杨志勇,韩宇平,等,2013. 变化环境下干旱事件演变驱动机制研究进展[J]. 水电能源科学,31(11):5-8.
裴源生,蒋桂芹,翟家齐,2013. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展,24(3):449-456.
骈宇哲,姜朋辉,陈振杰,等, 2015. LUCC 研究进展及其对干旱区生态环境的意义[J]. 水土保持研究,22(5):358-364.
王琪,史基安,张中宁,等,2003. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析[J]. 中国沙漠, 23(1):46-52.
王海青,张勃,2007. 黑河流域干旱化驱动力机制及其趋势预测[J]. 干旱区资源与环境,21(9):68-72.
王媛,焦黎,董煜,2019. 博斯腾湖流域干旱变化趋势及气候影响因素[J].干旱区研究,36(5):1102-1108.
翁白莎, 2012. 流域广义干旱风险评价与风险应对研究[D]. 天津:天津大学.
徐新创,葛全胜,郑景云,等,2010. 农业干旱风险评估研究综述[J]. 干旱地区农业研究, 28(6):263-270.
闫浩文,刘艳平,曹建君,2013. 民勤绿洲地下水埋深影响因素分析及其变化趋势预测[J]. 中国水土保持科学, 11(2):45-50.
闫娜娜,2012. 基于多源数据的农田旱情遥感监测模型研究[D]. 北京:中国科学院大学.
杨帅,于志岗,苏筠,2014. 中国气象干旱的空间格局特征(1951-2011)[J]. 干旱区资源与环境,28(10):54-60.
杨怀德,冯起,郭小燕,2017. 1999-2013 年民勤绿洲地下水埋深年际变化动态及影响因素[J]. 中国沙漠, 37(3):562-570.
余中元,李波,张新时,2014. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J]. 生态学报,34(7):1870-1879 .
Fraser E D G, Termansen M, Sun N, et al, 2008. Quantifying socioeconomic characteristics of drought-sensitive regions:evidence from chinese provincial agricultural data[J]. Comptes Rendus Geoscience, 340(9/10): 679-688.

(责任编辑 万月华)

Driving Factors and Mechanism of Drought in Minqin Desert Oasis

SHI Yuan-yuan[1], JI Yong-fu[2], ZHANG Heng-jia[1], WANG Ya-yun[1]

(1.School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070,P.R.China;
2.Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070,P.R.China)

Abstract: A comprehensive exploration of factors (meteorological, hydrological, agricultural, social and economic) that lead to drought in a desert oasis system can lay the foundation for study of arid environments and the water cycle. In this investigation, the Minqin desert oasis in Gansu Province was selected as a case study and the driving factors and mechanism producing drought in a desert oasis was explored, aiming to provide a theoretical basis for restoring desert oasis ecosystems. Using principal component analysis, 21 indicators of meteorology, hydrology, agriculture and the social economy were selected to study the mechanism producing draughts in the Minqin desert oasis from multiple aspects. Evaporation and temperature were the primary factors driving meteorological drought in the oasis during the study period, contributing a cumulative variance of 86.853%. Hydrological drought was attributed primarily to public water transfer volume and reservoir discharge volume, contributing a cumulative variance of 92.190%. Agriculture drought was mainly due to the increase in arable land and irrigation area, contributing a cumulative variance of 86.179%. Industrial water consumption and the 10 000-yuan added value of industrial water consumption have become the primary drivers of socio-economic drought, contributing a cumulative variance of 87.582%. The cumulative variance contributed by the four principal components extracted from the comprehensive drought level analysis was 98.255%, accurately reflecting the reasons an arid environment formed. The degree of impact among the nine primary drought factors were ranked as follows: groundwater extraction volume>reservoir water supply>surface water supply>public transfer water volume>annual evaporation>average humidity>upstream water supplementation>groundwater level>water conservancy financial expenditure. This comprehensive analysis indicates that numerous factors affect draught intensity and reflect the complexity of draught cycles in desert oasis ecosystems.

Key words: desert oasis; drought driving factors; draught mechanism; principal component