引文格式：高建国,朱丹. 基于GIS的朔州市输电线路大风灾害风险区划研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(12): 46-50. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.12.011

基于GIS的朔州市输电线路大风灾害风险区划研究

高建国[1]，朱　丹[1]
（1. 国网山西省电力公司朔州供电公司，山西 朔州 036000）

摘　要：以揭示朔州市输电线路大风灾害风险等级及其空间分布为目的，利用多源异构监测数据、输电线路密度及社会经济数据，采用层次分析和加权综合评价法及GIS技术，建立朔州市输电线路大风灾害风险评估模型，形成了朔州市输电线大风灾害风险区划图。结果表明：右玉县中东部至平鲁区西北部以南区域、怀仁县中西部到山阴县中北部再到朔城区以北的区域，输电线路处于大风灾害风险区划的高风险区和次高风险区；山阴县南部、应县中北部区域的输电线路是大风灾害风险区划的低风险区。2022年风险区划检验表明：朔州市输电线路大风灾害综合风险区划结果具有较高的合理性，可为输电线路设计及防灾减灾提供科学依据。

关键词：输电线路；大风灾害；　风险区划；风险等级
中图分类号：P208　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2024）12-0046-05

Research on Gale Disaster Risk Zoning of Transmission Line in Shuozhou City Based on GIS

GAO Jianguo[1], ZHU Dan[1]
(1. State Grid Shanxi Electric Power Company Shuozhou Power Supply Company, Shuozhou 036000, China)

Abstract: To reveal the risk level and spatial distribution characteristics of gale disasters on transmission lines in Shuozhou City, based on the multi-source heterogeneous monitoring data, transmission line density and socio-economic data, we used analytical hierarchy process method, weighted comprehensive evaluation method and GIS technology to establish a risk assessment model of transmission line gale disaster in Shuozhou City, and formed the risk zoning map. The results show that the transmission lines in the southern area from middle east of Youyu County to northwest of Pinglu District, and in the northern area from middle west of Huairen County, through north-central Shanyin County, to Shuocheng District, are located in the high risk area and the sub high risk area of the comprehensive risk zoning of gale disaster. The transmission lines in the south of Shanyin County and north-central Ying County are low risk areas. The risk zoning test in 2022 shows that the comprehensive risk zoning results of gale disaster on transmission line in Shuozhou City are highly reasonable, which can provide scientific basis for transmission line design and disaster prevention and reduction.

Key words: transmission line, gale disaster, risk zoning, risk level

目前基于GIS的灾害风险区划技术得到进一步的提高。但这些方法和技术大多是应用国家站的大风资料[1-3]，区划对象包括市级及以上行政区域、建筑物、森林等，而对于综合利用长序列国家和区域气象站资料，尤其是输电线路微地形微气象站资料的大风灾害风险评估和区划的研究，目前还未见公开的相关报道[4-10]。

本文以减轻输电线路大风灾害为目的，通过对朔州市近40 a国家和区域气象站以及输电线路微地形微气象站的大风日数和风速极值进行统计分析，并以自然灾害评价理论为基础，重点考虑不同输电线路风速的极值和频次分布、地质结构和输电线路密度等因素，采用层次分析和加权综合评价方法及GIS技术，对朔州市输电线路大风灾害进行区划研究，旨在给出输电线路大风灾害的风险等级及其空间分布特征，为不同输电线路的设计和大风灾害的防御规划及预报预警提供科学依据。

1　资料和方法

1.1　资料来源

所用的1981—2020年朔州市6个国家气象站大风资料和近10 a 69个区域气象站大风资料均来自山西省气象信息中心，12个微地形微气象站大风资料来自国

收稿日期：2023-07-20。
项目来源：国网山西省电力公司科技项目。
第一作者简介：高建国（1970—），本科，高级工程师，研究方向为输变电设备运维检修和灾害风险区划，E-mail：mam1226@163.com。

网山西朔州供电公司输电线路安装的自动监测站监测数据，且经过与周边气象局原有气象站资料对比分析后订正到输电线路的近10 a时间序列资料，输电线路大风灾害资料及其输电线路密度资料来自国网朔州电力公司。

地理信息资料主要是山西省1∶1 000的DEM（数值高程模型）资料、坡度资料、朔州市地理信息shp文件等；社会经济资料来源于《2021山西统计年鉴》[11]，主要包括：人口密度、GDP密度、人均GDP等数据资料；地质环境资料主要是由山西省地质环境中心提供的地质灾害易发分区资料。

1.2　研究方法

朔州市输电线路大风灾害的综合风险区划主要采用了层次分析法、归一化方法、加权综合评价及GIS技术。

1）层次分析法概念。层次分析法（analytic hierarchy process，AHP）是将与决策有关的元素分解成目标、指标、基础等层次，在此基础上进行定性和定量分析的决策方法。

2）层次分析法的步骤： 建立层次结构模型；构造判断（成对比较）矩阵；层次单排序及其一致性检验；层次总排序及其一致性检验。

①建立层次结构模型：应用层次分析法，首先构造朔州市大风灾害综合风险区划层次结构模型。大风综合风险区划的指标体系均采用自右向左的分层评估指标结构，自右向左分别为基础层、指标层和目标层。

②构造判断矩阵：指标层中各指标在目标衡量中所占的比重并不一定相同。引用数字1～9及其倒数作为标度[12]，定义判断矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}$。$a_{ij}$ 表示要素 i 与要素 j 相对重要度之比，且有下述关系：

$$a_{ij}=1/a_{ji};a_{ii}=1;i,j=1,2,\ldots,n \tag{1}$$

式中，比值越大，要素 i 的重要度就越高。

计算各个要素与1981—2020年朔州市大风灾情普查数据的相关性，根据相关系数的大小来确定2个要素的重要性。以此构造的朔州市大风灾害综合风险区划 A，致灾因子 B_1，孕灾环境 B_2，承载体易损性 B_3 的判断矩阵分别为：

$$\begin{cases} A=\begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{vmatrix} \quad B_1=\begin{vmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{vmatrix} \\ B_2=\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{vmatrix} \quad B_3=\begin{vmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 1/2 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{vmatrix} \end{cases} \tag{2}$$

③层次单排序及其一致性检验：

a）采用求和法计算各判断矩阵的特征值和特征向量：将判断矩阵 $\boldsymbol{A}$ 按列归一化（即列元素之和为1）：

$$b_{ij}=a_{ij}/\sum a_{ij} \tag{3}$$

将归一化的矩阵按行求和：

$$C_i=\sum b_{ij}\ （i=1,2,\cdots,n） \tag{4}$$

将 C_i 归一化，得到特征向量：

$$\begin{cases} \boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}} \\ w_i=C_i/\sum \boldsymbol{C}_i \end{cases} \tag{5}$$

求特征向量 $\boldsymbol{W}$ 对应的最大特征值：

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{(A\boldsymbol{w})_i}{nw_i}\right) \tag{6}$$

b）计算一致性指标 CI（consistency index）。

$$CI=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1} \tag{7}$$

其中，$\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。

c）查找一致性指标 RI。

d）计算一致性比例 CR（consistency ration）。

$$CR=\frac{CI}{RI} \tag{8}$$

当 $CR<0.1$ 时，认为判断矩阵的一致性可接受，否则，应对判断矩阵进行适当修正。

依据以上方法计算朔州市输电线路大风灾害综合风险区划各个矩阵的权重系数，见表1。

由表1可知，各矩阵的 CR 均小于0.1，满足层次单排序一致性要求。

表1　各矩阵权重系数和一致性检验参数

矩阵	$\boldsymbol{W}_1$	$\boldsymbol{W}_2$	$\boldsymbol{W}_3$	$\boldsymbol{W}_4$	$\lambda_{\max}$	CI	CR
A	0.423	0.227	0.227	0.123	4.009	0.003	0.003 4
B_1	0.667	0.333	/	/	2.000	0.000	0.000 0
B_2	0.500	0.500	/	/	2.000	0.000	0.000 0
B_3	0.539	0.297	0.163	/	3.010	0.005	0.009 6

④层次总排序及其一致性检验

a）层次总排序：对层次结构模型中各层各元素的单排序结果，由左向右计算最低层（基础层）各元素对目标层的相对重要的排序值为层次总排序。设二级共有 m 个要素 B_1，B_2，…，B_m，它们对总值的权重为 w_1，w_2，…，w_m；设三级共有 n 个要素 C_1，C_2，…，C_n，令要素 C_i 对 B_j 的权重为 v_{ij}，则三级要素 C_i 的综合权重为：$w_i'=\sum_j w_j v_{ij}$。由此式计算可获得朔州市输电线路大风灾害综合风险区划层次总排序（见表2）。

表2 层次总排序

层次	B_1	B_2	B_3	B_4	层次C
	0.423	0.227	0.227	0.123	总排序权重
C_1	0.667				0.282 141
C_2	0.333				0.140 859
C_3		0.50			0.113 500
C_4		0.50			0.113 500
C_5			0.539		0.122 353
C_6			0.297		0.067 419
C_7			0.163		0.037 001
C_8					0.123 000

b）一致性检验：为确保层次总排序的一致性，对其进行一致性检验，计算公式如下：

$$CR=\frac{\sum_{i=1}^{n}b_iCI_i}{\sum_{i=1}^{n}b_iRI_i} \tag{9}$$

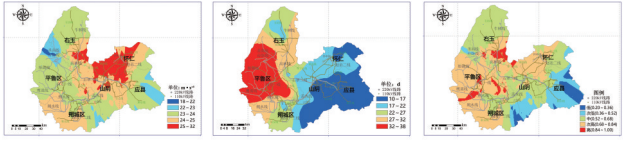
式中，CR为层次总排序的随机一致性指标；b_i为B层中元素B_i对应的权重；CI_i与RI_i分别为b_i相对应层次C中各判断矩阵的一致性指标和随机一致性指标。

由式（9）计算CR=0.009 6<0.1，满足层次总排序一致性要求。此外，在ArcGIS作图中还利用了自然断点法。自然断点法是用统计公式来确定属性值的自然聚类，是减少同一级中的差异，增加级间差异的方法。

2 影响大风风险区划的评价指标及分析

2.1 致灾因子危险性分析及区划

1）朔州市输电线路风速极值和大风发生频率的空间分布特征。由朔州市近40 a国家站、近10 a区域站、订正后的近10 a朔州市输电线路微地形微气象站风速极值和大风日数统计资料绘制的极大风速和年平均大风日数空间分布图（图1）可知，朔州市极大风速具有西部和东部输电线路风速极值小、中间输电线路风速极值大的分布特征（图1a）；年平均大风日数则具有西部输电线路多、东部输电线路少，山地输电线路多、盆地输电线路少及西部山区多于东部山区输电线路的分布特征（图1b）；怀仁县西部、右玉县东南部、山阴县中北部、平鲁区东南角的输电线路风速极值最大（图1a）；平鲁区全区、右玉县西南部、朔城区北边缘输电线路为大风的频发区，应县、山阴县中南部、朔城区东南部、怀仁县东北角输电线路为大风的少发区（图1b）。



a 风速极值 b 年平均大风日数 c 致灾因子危险性区划

图1 1981—2020年朔州市输电线路致灾因子危险性区划分析图

2）致灾因子危险性分析及区划。根据民政部门以及朔州供电公司的灾情报告和大风对电网的影响调查表明，风速的极值大和大风发生的频次高是朔州市输电线路大风致灾的主要原因。因此，可将各站点风速的极值（图1a）和大风发生的频次（图1b）作为致灾因子。确定风速极值和大风频次按照表1计算出的权重比例，对朔州市6个国家气象站和69个区域气象站、以及12个朔州输电线路微地形微气象站大风的风速极值和频次进行无量纲化处理。在ArcGIS10.0环境下，采用克里金插值方法和栅格计算器进行空间和参差分析，再应用自然断点法将大风致灾因子危险性划分为5个等级。由此，得到朔州市输电线路大风的致灾因子危险性分析区划图（图1c，空间分辨率为1 km×1 km）。由图1c可知，朔州市输电线路大风致灾因子的高危险区主要位于右玉县东南部、平鲁区东南部、山阴县北边缘地带的输电线路；应县和朔城区东南部的输电线路是大风致灾因子的低危险区。总体上大风的致灾因子危险性具有山区高于盆地输电线路的空间分布特征。

2.2 孕灾环境敏感性分析及区划

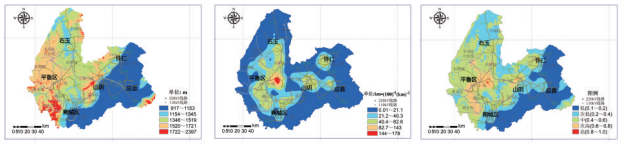
针对输电线路大风灾害发生的特点，孕灾环境敏感性主要与地形（海拔高度、地形标准差）、输电线路所处的环境有关。故本研究从影响大风成灾的条件和机理出发，孕灾环境因子主要选择了输电杆塔安装的海拔高度、地形标准差、输电线路密度。敏感性也主要考虑了海拔高度、地形标准差、输电线路密度对大风致灾的影响程度。

地形对大风灾害的影响主要体现在海拔高度及地形标准差，地势越高、标准差越大，越容易孕育大风。根据朔州市实际情况及数字地面高程，在GIS中将朔州市海拔分为5级（图2a），地形标准差分为3级，按海拔越高，影响值越大，标准差越大，影响值越大的原则进行赋值，得到地形影响指数（见表3）。

孕灾环境敏感性的计算综合考虑了地形因子（海拔高度、地形标准差）、输电线路密度因子。应用表1计算出的权重比例，借助于ArcGIS软件，通过自然断点和加权平均法，依据造成大风灾害敏感性的大小，将孕灾环境敏感性划分为5个等级。分别为：低[0.1, 0.2]、次低（0.2, 0.4]、中（0.4,0.6]、次高（0.6,0.8]、

表3　地形因子赋值表/m

地形高程	高程标准差		
	一级（≤1）	二级（1~10）	三级（≥10）
一级（<1 153）	0.4	0.5	0.6
二级（1 154 ~ 1 345）	0.5	0.6	0.7
三级（1 346 ~ 1 519）	0.6	0.7	0.8
四级（1 520 ~ 1 721）	0.7	0.8	0.9
五级（>1 721）	0.8	0.9	1.0



a 朔州市高程　　b 输电线路密度　　c 孕灾环境敏感性区划

图2　朔州输电线路大风灾害孕灾环境敏感性区划

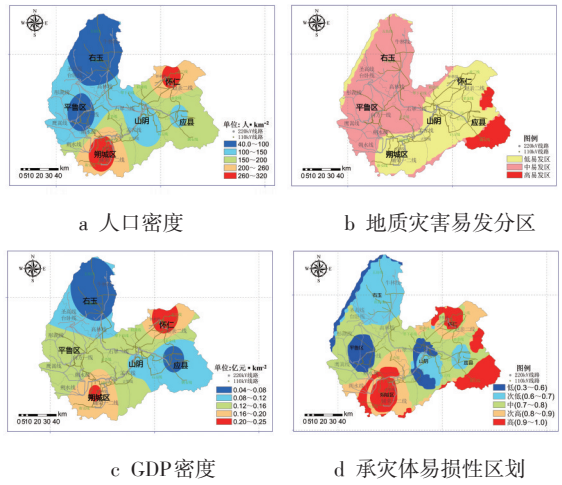
高（0.8,1.0]。由此，得到空间分辨率为1 km×1 km的孕灾环境敏感性区划图(图2c)。由图2c可以看出，朔州市输电线路大风灾害孕灾环境高敏感区主要分布在朔州市平鲁区东部的输电线路，次高敏感区主要位于平鲁区中东部、朔城区北部、山阴县中部地带的输电线路；低敏感区位于朔州市东南部区域的输电线路，包括朔城区南部、山阴县南部、应县、怀仁县东部地区的输电线路。

2.3　承灾体易损性分析及区划

承灾体的自然状况决定了大风造成的危害程度。评价区域内遭受大风的损失大小与该区域人口和财产的集中程度相关。人口和财产越集中，易损性越高，可能遭受大风灾害的风险就越大。因此，把人口密度（单位面积土地上居住的人口数，图3a）、地质环境（地质灾害易发分区，图3b）、GDP密度（本区域生产总值GDP与生产这些GDP的土地面积比，图3c）作为易损性分析的主要因子。

在其他条件相同的情况下，不同的地质环境条件将导致不同程度的灾害发生。朔州市国土资源部门根据朔州市的地质环境条件，将朔州市地质灾害分为低易发[0, 0.33)、中易发[0.33, 0.66)、高易发[0.66, 0.99)3个级别（图3b）。

由于3个因子对大风灾害的影响程度不同，故采用表1计算出的权重系数。在此基础上，依次采用ArcGIS叠加、自然断点法等获得空间分布率为1 km×1 km的承灾体易损性区划分析图（图3d）。按照易损性大小划分为低[0.3,0.6]、次低（0.6,0.7]、中（0.7,0.8]、次高（0.8,0.9]、高（0.9,1.0]5个级别（图3d）。图3d表明：朔城区、应县东南部、怀仁县中部的输电线路易损性风险最高。



a 人口密度　　b 地质灾害易发分区

c GDP密度　　d 承灾体易损性区划

图3　朔州市输电线路承灾体易损性分析区划图

2.4　防灾减灾能力分析及区划

受灾区域对灾害的抵御能力以及在一定时间内能够从灾害中恢复的程度体现了该区域的防灾减灾能力。当大风引发的灾害不可避免时，此时防灾减灾能力的高低决定着受灾区域在灾害中所受损失的大小。由于人均GDP值（人均国内生产总值Real GDP per capita）间接或直接地影响着政府在防灾减灾工程等基础设施建设方面的投资，从而影响防灾减灾能力的强弱。因此，对防灾减灾能力的区划分析，本文主要应用2021年《朔州市统计年鉴》中的人均GDP值。图4a是分辨率为1 km×1 km的朔州市人均GDP分布图，可以看出平鲁区中部乡镇的人均GDP高，表明在遭受相同的大风灾害时，这些区域在防灾减灾能力方面相对较强；而应县、怀仁县东南部乡镇、朔城区中部区域，人均GDP不高，间接影响着防灾减灾能力。

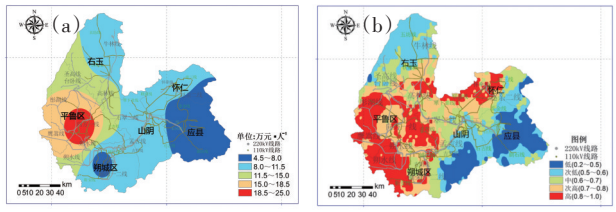


图4　朔州市人均GDP和输电线路大风灾害综合风险分析区划图

2.5　综合风险区划与分析

2.5.1　风险指数评估模型

依据自然灾害数学公式（见式10），并根据大风灾害评价指标体系，建立朔州市输电线路大风灾害风险指数模型，见式11。

$$D=f(H,S,V,R) \tag{10}$$

式中，D为灾害风险；H、S、V、R分别为致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力。

$$D=f(VH^{wh})(VS^{ws})(VV^{wv})(VR^{wr}) \quad (11)$$

式中，D 为灾害风险；VH 、VS 、VV 、VR 分别为致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力；wh 、ws 、wv 、wr 分别为相应的权重系数。由表1可知：wh 、ws 、wv 、wr 分别为：0.423、0.227、0.227、0.123。

2.5.2 综合风险区划与分析

在朔州市输电线路大风灾害风险评估模型建立的基础上，利用ArcGIS10.0软件，对致灾因子危险性、孕灾环境敏感性、承灾体易损性和防灾减灾能力4个因子，按照表1给出的权重系数大小进行栅格计算叠加和空间分析；采用自然断点法将大风灾害综合风险进行等级划分（见表4）。得到空间分辨率为1 km×1 km的朔州市输电线路大风灾害综合风险区划图（见图4b）。可以看出，右玉县中东部至平鲁区西北部一线以南区域、怀仁县中西部到山阴县中北部再到朔城区一线以北的区域，220 kv和110 kv输电线路处于大风灾害综合风险区划的高风险区和次高风险区。其中，向方一线、平朔一线、朔水线、鹰嵩线、彤湖线、靳安线、吉杏线、高林线、右翠二线、翠下Ⅱ线、联南线、怀牵线、亲三线、赵亲二线、赵南线、铺区线、铺城线等输电线路处于综合风险区划的高风险区；山阴县南部、应县中北部区域的输电线路是大风灾害综合风险区划的低风险区。

表4 朔州市输电线路大风灾害综合风险区划等级划分

综合风险区划等级	1	2	3	4	5
数据	0.2~0.5	0.51~0.6	0.61~0.7	0.71~0.8	0.81~1.0

3 结 语

通过对近40 a由大风造成的灾害统计及近17 a的大风的灾情报告以及2010—2020年朔州输电线路因大风造成的线路故障分析，朔州市输电线路大风灾害的发生区域与朔州市输电线路大风综合风险区划的高风险区和次高风险区有很好的相关性：①朔州市极大风速呈现出西部和东部输电线路风速极值小、中间输电线路风速极值大的分布特征；年平均大风日数则具有西部输电线路多、东部输电线路少，山地输电线路多、盆地输电线路少及西部山区输电线路多于东部山区输电线路的分布特征。②朔州市输电线路大风致灾因子的高危险区主要位于右玉县东南部、平鲁区东南部、山阴县北边缘地带的输电线路；应县和朔城区东南部的输电线路是大风致灾因子的低危险区。总体上，大风的致灾因子危险性具有山区输电线路高于盆地输电线路的空间分布特征。③右玉县中东部至平鲁区西北部一线以南区域、怀仁县中西部到山阴县中北部再到朔城区一线以北的区域，输电线路处于大风灾害综合风险区划的高风险区和次高风险区；山阴县南部、应县中北部区域的输电线路是大风灾害综合风险区划的低风险区，其余区域为中风险区和次低风险区。④2021年和2022年检验结果表明，朔州市输电线路大风灾害综合风险区划结果具有较高的合理性，可以为防灾减灾建设和输电线路设计提供指导性的参考依据。

参考文献

[1] 张丽娟,陈红,高玉宏,等. 黑龙江省大风分布特征及风险区划研究[J]. 地理科学进展,2011,30(7):899-905

[2] 缪霄龙,缪启龙,宋健,等. 杭州地区雷雨大风灾害风险区划[J]. 气象与减灾研究,2012,35(3):45-50

[3] Yoshimatsu H, Abe S. A Review of Landslide Hazards in Japan and Assessment of Their Susceptibility Using an Analytical Hierarchic Process(APP) Method[J]. Landslide, 2006,3(2):149-158

[4] Karimi I,Hullermeier E .Risk Assessment System of Natural Hazards: A New Approach Based on Fuzzy Probability[J]. Fuzzy Sets Syst,2007,158(9):987-999

[5] Korkmaz K A. Earthguake Disaster Risk Assessment and Evaluation for Turkey[J]. Environ Geology, 2009, 57(2): 307-320

[6] Ye X L, Yao Z Z. Study on Evaluation of the Rainstorm Disaster in Fujian Province Based on Spectral Clustering Model with Grey Correlation Analysis[J] . Meteor Environ Res,2012,3(6):45-49

[7] Sang Y K ,Wang Z G ,Liu C M. What Factors are Responsible for the Beijing Storm[J]. Nat Hazards , 2013 , 65(1): 2 399-2 400

[8] 孙强,陈时军,张正帅. 基于GIS等方法的淄博市地震灾害风险区划研究[J] .地理空间信息,2022,20(11):57-63

[9] 高牧寒,秦昆,王少东,等. 空间信息技术支持的乡镇洪涝灾害风险评估[J]. 地理空间信息,2022,20(12):35-37,158

[10] 徐晗,徐建刚. 基于流域GIS空间建模的雨洪模拟方法[J] . 地理空间信息,2022,20(2):33-38,92

[11] 山西省统计局,国家统计局山西调查总队. 2021山西统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2021:200-279

[12] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100