

罗少辉, 汪家鹏, 金欣, 等. 基于主成分分析和结构方程模型的青海高原雷电环境特征[J]. 灾害学, 2023, 38(4): 94 – 98, 203. [LUO Shaohui, WANG Jiapeng, JIN Xin, et al. Characteristics of Lightning Environment in Qinghai Plateau Based on Principal Component Analysis and Structural Equation Model[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(4): 94 – 98, 203. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.016.]

# 基于主成分分析和结构方程模型的 青海高原雷电环境特征\*

罗少辉<sup>1</sup>, 汪家鹏<sup>2,3</sup>, 金欣<sup>4</sup>, 陶世银<sup>1</sup>

(1. 青海省气象灾害防御技术中心, 青海 西宁 810001; 2. 郑州大学, 河南 郑州 450000;  
3. 国家开发银行青海省分行, 青海 西宁 810001; 4. 青海民族大学, 青海 西宁 810001)

**摘要:** 利用青海省53个气象台站的最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数、霾日数、雾日数、蒸发量和最大风速等观测资料和闪电定位资料, 通过主成分分析和结构方程模型分析, 研究闪电日数与以上各气象因子的关系以及青海省雷电环境特征, 以期对青海省雷电灾害的防御和评估提供科学依据。研究表明: 青海省年闪电日数在2.1~119.0 d之间, 两个高值中心在玉树州南部和海南州北部, 雷电活动最为密集、闪电发生频率最高的地区主要分布在青海省东部、玉树州、果洛州等地区; 主成分分析、逐步回归分析和结构方程模型计算结果表明, 冰雹日数、最大日降水量、最小相对湿度与闪电日数关系最为密切, 均对雷电日数具有正向影响。

**关键词:** 雷电环境; 主成分分析; 结构方程模型; 闪电日数; 青海高原

**中图分类号:** X43; X915.5; P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)04-0094-09

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.04.016

青海地处青藏高原东北部, 地形地貌复杂, 气候类型多样, 是全国气象灾害较为严重的省份之一。其中雷电灾害时有发生, 给农牧民生产、电力、建筑等行业造成了严重影响<sup>[1]</sup>。据不完全统计, 青海省平均每年发生近14起雷电灾害, 造成平均伤亡人数达10.4人、直接经济损失达64.7万元<sup>[2]</sup>。随着青海经济社会的快速发展和生态强省战略的实施, 建设和谐安居社会、保障人民生命财产和社会稳步发展, 对有效防御和减轻气象灾害、保障人民生命财产安全的要求越来越高。

目前关于雷电活动特征的研究大多集中于区域范围或行业雷电过程的分析<sup>[3-6]</sup>、预报方法的研究<sup>[7-8]</sup>、分析其时空分布气候特征<sup>[9-11]</sup>以及研究与单一气象因子的关系<sup>[12-13]</sup>等。由于影响雷电环境的因素很多, 且诸因素间存在一定的相关性, 致使信息发生大部分重叠。目前, 使用较广泛的主成分分析方法能够从各种反映雷电活动相关的因素中提取有用的信息, 建立尽可能少的新变量与雷电活动之间的规律关系, 降低新变量之间的相关性, 并尽可能多地保持这些新变量在反映雷电活动规律方面的相关信息。

在结构方程模型研究方面, 国内在雷电灾害和雷电环境方面应用较晚。郭凯<sup>[14]</sup>利用结构方程模型研究了煤矿安全影响因素评估, 并用于实践

的分析与评估; 雒丽<sup>[15]</sup>等研究了高寒生态脆弱区影响农牧户气候变化感知的关键因素及其作用路径。利用结构方程模型的方法建立闪电日数与环境因素之间的关系, 探讨多环境参数与闪电日数之间的关系, 有利于全面认识青海省雷电环境特征。

本文从多个角度分析青海省地闪环境特征, 探讨多环境参数与闪电日数之间的关系。选用2008—2018年青海省闪电资料和其他21种环境参数资料, 分析青海省雷电环境特征, 探讨多环境参数与闪电日数之间的关系, 为青海省雷电灾害的防御、风险评估和安全管理提供更加科学、客观的技术参考。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料及其来源

收集青海省雷电观测资料包括雷暴日数据和雷电定位资料, 全省53个气象台站的最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数、霾日数、雾日数、蒸发量、最大风速等资料, 以上资料均由青海省信息中心提供。由于人工雷暴日数于2013年后停止观测, 雷暴日数收集的年限为1978—2013年。

\* 收稿日期: 2023-01-31 修回日期: 2023-04-23

基金项目: 青海省科技厅“青海省雷电监测网定位精度和探测效率基础研究”(2019-ZJ-7098); 青海省科技厅“2021年青海省昆仑人才资助项目”

第一作者简介: 罗少辉(1986-), 男, 汉族, 河南漯河人, 工程师, 主要从事气象防灾减灾研究。E-mail: 948347792@qq.com

通信作者: 金欣(1988-), 女, 汉族, 青海西宁人, 高级工程师, 主要从事防灾减灾技术研究。E-mail: 526445115@qq.com

雷电定位资料选取全省 2014—2018 年的闪电定位资料, 并进行域外数据剔除、重复数据清洗等质量控制。文中分析所用闪电日数、闪电强度数据由闪电定位资料统计得出。

文中使用底图为青海省标准地图(审图号为 GS(2019)3266), 由青海省测绘院提供。所使用的地形起伏度、土壤电阻率、海拔高度等信息来源于北京大学地理数据平台提供的共享数据。

## 1.2 研究方法

本研究在进行统计分析及风险评估时, 采用数据归一化、层次分析法(AHP)、自然断点法、主成分分析等统计方法。

### 1.2.1 数据归一化

为了消除各指标的量纲差异, 对每一个指标值进行归一化处理, 本报告中雪灾、暴雨、冰雹、雷电、干旱灾害风险区划中对于危险性、敏感性和易损性所包含的各个指标归一化计算公式均为:

$$D_{ij} = 0.5 + 0.5 \times \frac{A_{ij} - \min_i}{\max_i - \min_i} \quad (1)$$

式中:  $D_{ij}$  是  $j$  站点第  $i$  个指标的归一化值;  $A_{ij}$  是  $j$  站点第  $i$  个指标值;  $\min_i$  和  $\max_i$  分别是第  $i$  个指标值中的最小值和最大值。

### 1.2.2 层次分析法

层次分析法是将系统问题概化为各层次间的逻辑结构关系的一种分析方法。分析步骤为:

(1) 建立层次结构模型。第一层为影响雷电灾害风险程度的准则层, 为雷电灾害致灾因子危险性( $b_1$ ); 第二层为分析对象的目标层, 选取的评估指标( $C_1 - C_5$ , 表 1)。闪电日数为年闪电日数( $d$ ), 闪电强度为年平均强度(年/ $\text{km}^2/\text{kA}$ ), 地形起伏度( $m$ ), 海拔高度( $m$ ), 土壤电阻率( $\Omega \cdot m$ ), 在进行风险评估前, 对评估指标进行数据归一化, 量纲为 1。

(2) 建立风险区划指标权重的判断矩阵  $T$ 。判断矩阵表示针对上一层某个指标, 本层次与之有关的各指标之间相对重要程度比较(表 2)。

表 1 雷电灾害风险评估指标

第一层	第一层指标	第二层	第二层指标
$b_1$	致灾因子危险性	$C_1$	闪电日数/ $d$
		$C_2$	闪电强度/(年/ $\text{km}^2/\text{kA}$ )
		$C_3$	地形起伏度/ $m$
		$C_4$	海拔高度/ $m$
		$C_5$	土壤电阻率/( $\Omega \cdot m$ )

表 2 雷电灾害风险评估判断矩阵

$T$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
$C_1$	1	1	3	5	5
$C_2$	1	1	3	5	5
$C_3$	1/3	1/3	1	3	3
$C_4$	1/5	1/5	1/3	1	1
$C_5$	1/5	1/5	1/3	1/3	1/3

(3) 计算所构造判断矩阵的最大特征根( $\lambda_{\max}$ )和特征向量( $A_w$ ), 判断矩阵的一致性检验。

首先, 计算一致性指标  $CI$ :

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

式中:  $n$  为判断矩阵的阶数, 经计算  $CI$  为 0.05。然后, 查找平均随机一致性指标  $RI$  为 1.12, 计算一致性比例  $CR$ :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

经计算,  $CR$  为 0.04, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的( $CR < 0.1$ )。

(4) 根据雷电灾害风险评估判断矩阵、 $CI$ 、 $CR$  值计算各个指标的相对权重。闪电日数, 闪电强度, 地形起伏度, 海拔高度, 土壤电阻率的权重分布为 0.36、0.36、0.15、0.08、0.05。

### 1.2.3 雷电致灾因子危险性计算

将行政区域范围划为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  网格, 利用 Kriging 插值法将闪电日数、闪电强度插值成网格数据, 对各网格的闪电日数、闪电强度进行归一化处理再加权综合得到致灾因子指数。

将孕灾环境的影响因子地形起伏度、海拔高度、土壤电阻率经归一化处理后, 再按权重加权平均, 计算得到  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$  网格孕灾环境指数。

根据综合致灾因子和孕灾环境指数, 按照层次分析法确定权重系数, 根据致灾危险性指数  $RH$  模型进行计算。

$$RH = (L_d^{C_1} + L_n^{C_2}) \times (T_R^{C_3} + E_h^{C_4} + S_c^{C_5}) \quad (4)$$

式中:  $RH$  为致灾因子危险性;  $C_1$  为闪电日数权重,  $L_d$  为闪电日数;  $C_2$  为闪电强度权重,  $L_n$  为闪电强度;  $C_3$  为地形起伏度权重,  $T_R$  为地形起伏度;  $C_4$  为海拔高度权重,  $E_h$  为海拔高度;  $C_5$  为土壤电阻率权重,  $S_c$  为土壤电阻率。

根据致灾危险性指数  $RH$  计算结果, 按照自然断点法将危险性划分为 3 级(低、中、高), 并绘制致灾因子危险性分布图, 完成危险性评估。

### 1.2.4 自然断点法

自然断点分级法是用统计公式来确定属性值的自然聚类, 目的是减少同一级中的差异、增加级间的差异。计算公式为:

$$SSD_{i-j} = \sum_{k=1}^j (A[k] - \text{mean}_{i-j})^2, (1 \leq i < j \leq N) \quad (5)$$

也可表示为:

$$SSD_{i-j} = \sum_{k=1}^j A[k]^2 - \frac{(\sum_{k=1}^j A[k])^2}{j - i + 1}, (1 \leq i < j \leq N) \quad (6)$$

式中:  $A$  是一个数组(数组长度为  $N$ ),  $\text{mean}_{i-j}$  是每个等级中的平均值。

### 1.2.5 其他研究方法

运用数理统计方法、运用 SPSS 统计, 利用主成分分析和逐步回归分析, 阐明多环境参数、单环境参数与闪电日数之间的关系。用 R 语言构建结构方程模型, 对多环境参数与闪电日数之间的关系进行验证。其中, 逐步回归分析是自变量对因变量影响效应, 由大到小逐个把有显著影响的自变量引入回归方程, 对因变量影响不显著的变量则可能被忽略。直到回归方程中所有变量都不能剔除而又没有新变量可以引入, 逐步回归过程结束。

## 2 结果与分析

### 2.1 闪电日数空间分布

由于地理环境、气候条件的差异, 闪电日数特征在不同区域的环境影响因素有很大的差异, 因此, 需要针对特定区域进行雷电环境特征分析及相关影响因素分析。图 1 可知青海省年闪电日数在 2.1 ~ 119.0 d 之间, 地域分布基本呈南多北少的纬向分布, 祁连山附近地区存在一个 50 ~ 60 d 的高值区。雷电多发中心在玉树州南部和果洛州

区域,年闪电日数在 100 d 以上,另一中心在海北州、海南州、西宁市北部、海东市北部一带,年闪电日数在 70 ~ 102 d 之间;海西州是雷电活动最少的地区,年闪电日数在 10.0 d 以下。海南州、西宁市、海东市、黄南州交界处也是一个低值中心,年闪电日数在 30.0 ~ 40.0 d 之间。

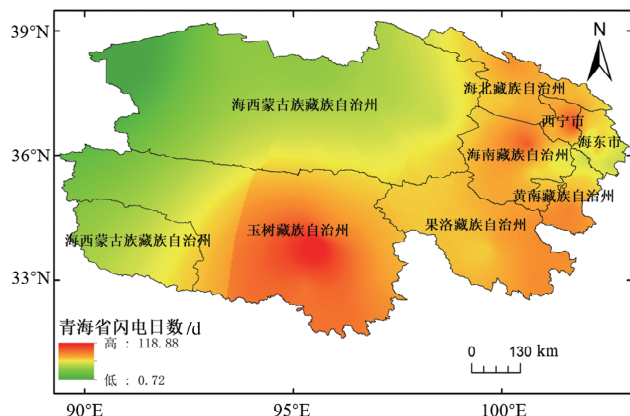


图1 青海省闪电日数的空间分布图(审图号 GS(2019)3266, 底图无修改,下同。)

## 2.2 雷电致灾因子危险性

雷电致灾因子危险性包括闪电日数、闪电强度、地形起伏度、土壤电阻率、海拔高度,将这些雷电环境影响因素进行归一化处理,用层次分析法确定权重,用自然断点法、克里金插值法进行雷电环境空间分布分析。图2中红色、黄色、绿色分别表示雷电致灾因子危险性高、中、低区域。红色区域是致灾因子危险性最高地区,主要分布在青海省东部、玉树州、果洛州等地区,涉及海北、西宁、海东、黄南、海南、果洛、玉树等8个州市。该区面积为 24.29 万  $\text{km}^2$ , 约占青海省总面积的 33.7%。黄色区域是雷电致灾因子危险性较高的地区。该区主要分布在青海省南部和西部地区,涉及西宁、海北、海东、黄南、海南、果洛、玉树、海西等8个州市。该区面积为 30.07 万  $\text{km}^2$ , 约占青海省总面积的 41.7%。绿色区域雷电致灾因子危险性较低,主要分布在青海省北部、西部以及东部部分地区,涉及海北、海南、果洛、玉树、海西等7个州市。该区面积为 17.74 万  $\text{km}^2$ , 约占青海省总面积的 24.6%。

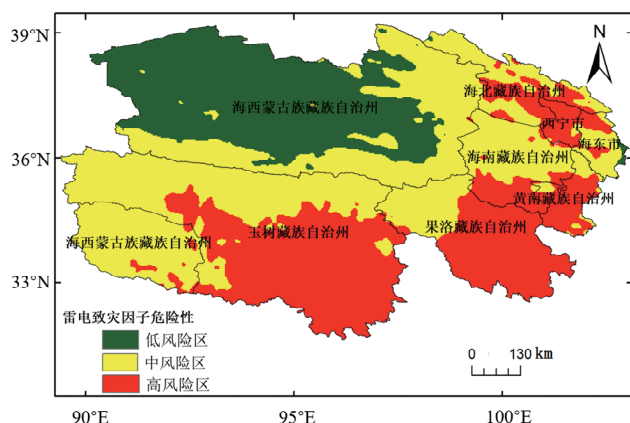


图2 青海省雷电致灾因子危险性分布图

## 2.3 闪电日数和相关气象因子的相关关系

主成分分析中,首先进行  $KMO$  检验,  $KMO$  值越接近于 1,表示变量之间的相关性越强,  $KMO$  值

低于 0.5 则无法使用主成分分析。本研究中  $KMO$  度量值为 0.777, Bartlett 球形检验概率显著性  $p < 0.001$ , 达到极显著水平,说明原变量之间具有一定的结构性和相关性。因此,综合这两个方面,本研究数据适合做主成分分析。相关矩阵结果表明,月平均闪电日数与月平均低云量之间相关系数是 -0.809, 伴随概率是 0.000, 月平均闪电日数与霾日数之间相关系数是 0.159, 伴随概率是 0.000, 月平均闪电日数与月蒸发量之间相关系数是 0.146, 伴随概率是 0.000, 月平均闪电日数与最大风速之间相关系数是 0.727, 伴随概率是 0.000, 具有很好的相关性。其中,伴随概率是 SPSS 计算中的统计量,用于与给定的显著性水平进行比较,确定是否应该拒绝原始假设,应低于 0.05。

表3中公因子方差表示变量的共同度,表示主成分对每个变量的方差解释度。第一列初始表示根据初始解计算出来的变量的共同度,表示把所有变量都作为公因子时候的共同度,因此数值均为 1, 提取表示的是提取的一定数量的公因子对相关指标的解释程度,数值变量共同度越大越好,数值在 0.8 以上表示比较理想的状态。本研究中共提取了 6 个因子作为公因子,对于月闪电日数的解释是 76.1%, 能够解释霾日数方差的 70.2%, 能够解释最大风速方差的 80.30%。能够解释最大日降水量方差的 75.4%, 能够解释最大风速方差的 80.30%。因子 1 的初始特征值合计 5.151, 能够解释所有变量方差的 24.53%, 是方差贡献率最大的一个主成分。前 6 个因子累积方差贡献率可达到 68.020%, 这 6 个变量累积能够解释所有方差变异的 68.020% (表 4)。

表3 公因子方差分析

	初始	提取
闪电日数	1.000	0.761
最小相对湿度	1.000	0.286
最大日降水量	1.000	0.754
冰雹日数	1.000	0.403
霾日数	1.000	0.702
雾日数	1.000	0.582
蒸发量	1.000	0.541
最大风速	1.000	0.803

图3是 21 个参数因子载荷碎石图,确定因子数为 6,从第 6 个数开始相对比较平坦,因此,确定因子数为 6 比较合适。从图中可以看出,前 6 个因子载荷衰减明显。计算特征协方差矩阵、协方差的特征值,其与主成分相关联的特征值按从大到小的顺序分别为 5.151, 3.188, 1.903, 1.610, 1.374, 1.057 (表 4)。

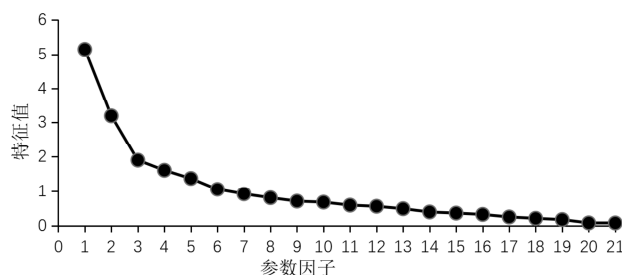


图3 参数因子荷载碎石

表 4 方差解释表

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	5.151	24.53	24.530	5.151	24.530	24.530	4.711	22.433	22.433
2	3.188	15.181	39.711	3.188	15.181	39.711	2.728	12.990	35.423
3	1.903	9.060	48.771	1.903	9.060	48.771	2.474	11.783	47.205
4	1.610	7.669	56.440	1.610	7.669	56.440	1.770	8.427	55.633
5	1.374	6.544	62.984	1.374	6.544	62.984	1.481	7.051	62.683
6	1.057	5.036	68.020	1.057	5.036	68.020	1.121	5.336	68.020

表 5 因子载荷矩阵

	成分					
	1	2	3	4	5	6
降水量	0.808	-0.147	-0.268			
最大日降水量	0.802	0.149	-0.212			
闪电日数	-0.204	0.264	0.235	0.218	0.712	
最小相对湿度	0.515					
冰雹日数	0.491	0.187	-0.262		0.101	-0.219
最大风速	-0.278	0.697	-0.397	0.285		
蒸发	0.219		-0.304		0.141	0.641
大型蒸发	0.140	0.312	0.613	0.347	-0.258	0.152
霾日数		-0.191			0.205	0.700

表 5 因子载荷矩阵结果表明, 月降水量、最大日降水量、闪电日数、最小相对湿度、冰雹日数、最大风速、蒸发量、大型蒸发量在第 1 个因子上载荷比较高, 在 0.140 以上, 月降水量、最大日降水量、闪电日数、冰雹日数、最大风速、大型蒸发量在第 2 和第 3 个因子上载荷较高, 都大于 0.147, 闪电日数、最大风速、大型蒸发量在第 4 个因子上载荷比较高, 闪电日数、冰雹日数、蒸发量、大型蒸发量、霾日数在第 5 个因子上载荷比较高, 冰雹日数、蒸发量、大型蒸发量、霾日数在第 6 个因子上载荷比较高, 降水量、最大日降水量、最小相对湿度、冰雹日数在第 1 个因子上载荷比较高, 闪电日数在第 5 个因子上载荷较高, 最大风速在第 2 个因子上载荷较高, 蒸发量、霾日数在第 6 个因子上载荷较高, 大型蒸发量在第 3 个因子上载荷较高。

由于月降水量、最大日降水量、闪电日数、冰雹日数、最大风速、蒸发量、大型蒸发量、霾日数在多个因子中都有, 采用因子旋转载荷大小进一步分化, 不同变量的因子归属会更加清晰。表 6 旋转成分矩阵结果表明, 月降水量、最大日降水量、冰雹日数、最小相对湿度、主要成分是第一 1 个因子上, 闪电日数主要成分是在第 5 个因子上, 最大风速主要成分是在第 2 个因子上, 蒸发量、霾日数主要成分是在第 6 个因子上, 大型蒸发主要成分是在第 4 个因子上, 主要成分是在第 6 个因子上。月闪电日数与最小相对湿度、最大风速、大型蒸发量为同一主成分。

成分得分因子矩阵是主成分分析的一个重要结论, 可以写出主成分的组成结构表达式。从成分得分因子矩阵可以得出, 我们最关注的闪电日数相关系数最高的在第二个因子公式中(表 7)。

表 6 旋转成分矩阵

	成分					
	1	2	3	4	5	6
降水量	0.921			0.104		
最大日降水量	0.820		0.171	-0.115		
闪电日数		0.209			0.814	
冰雹日数	0.570			-0.213		-0.140
最小相对湿度	0.495	-0.156				0.125
最大风速	-0.231	0.564		0.236		
蒸发	0.221			-0.156		0.706
大型蒸发		0.145	0.346	0.747		
霾日数	-0.101					0.731

表 7 成分得分因子矩阵

	成分					
	1	2	3	4	5	6
闪电日数( $X_1$ )	0.043	0.35	-0.083	0.100	0.009	-0.008
最小相对湿度( $X_2$ )	0.208	0.026	-0.042	0.021	0.030	-0.026
最大日降水量( $X_3$ )	-0.028	0.219	-0.015	0.173	0.020	0.069
冰雹日数( $X_4$ )	0.155	0.052	-0.028	-0.154	0.054	-0.160
霾日数( $X_5$ )	-0.045	0.062	0.123	0.435	-0.072	0.026
雾日数( $X_6$ )	0.024	0.050	0.042	-0.049	-0.043	0.633
蒸发量( $X_7$ )	-0.057	-0.058	0.320	-0.011	0.051	0.015
最大风速( $X_8$ )	0.055	0.341	-0.058	-0.053	0.016	0.010

第二个因子的表达式为:

$$Y = 0.350X_1 + 0.026X_2 + 0.219X_3 + 0.052X_4 + 0.062X_5 + 0.050X_6 - 0.058X_7 + 0.341X_8 \quad (7)$$

从主成分分析图 4 中可以看出, 闪电日数、冰雹日数、最大日降水量、最小相对湿度对成分 1 具有较大的贡献, 最大风速、霾日数与成分 1 之间呈负相关性。最大风速、蒸发量、大型蒸发量对成分 2 具有较大的贡献, 最大日降水量、最小相对湿度、霾日数与成分 2 之间呈负相关性。闪电日数与最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数、霾日数、蒸发量、大型蒸发量、最大风速之间具有非常密切的联系。其中, 闪电日数与最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数、蒸发量、大型蒸发量呈正相关关系, 与霾日数和最大风速呈负相关关系。

#### 2.4 闪电日数与主要相关气象因子的回归分析

由于主成分分析无法明确表述哪个主成分代表哪些原始变量, 采用回归分析方法进一步研究。回归分析表明, 闪电日数与最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数、霾日数、蒸发量、大型蒸发量、最大风速之间均有显著的相关性。进一步进行逐步回归, 闪电日数( $X_1$ )与最大日降水量( $X_3$ )、冰雹日数( $X_4$ )、最小相对湿度( $X_2$ )、蒸发量( $X_7$ )之间的逐步回归方程为:

$$X_1 = 0.200X_3 + 1.295X_4 + 0.067X_2 + 0.002X_7 - 0.015 \quad (8)$$

因此, 结合主成分分析和逐步回归分析的结果可看出, 闪电日数关系最密切的是最小相对湿度、最大日降水量、冰雹日数(见图 4)。

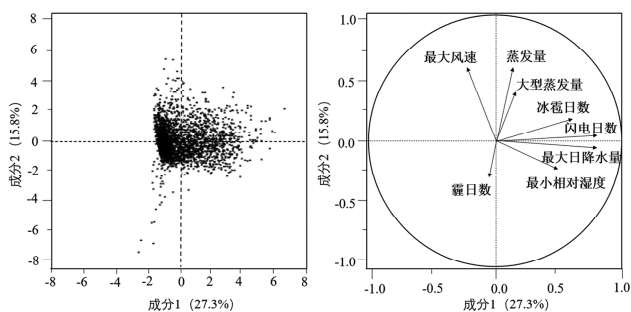


图 4 闪电日数与主要相关气象因子的关系图

#### 2.5 结构方程模型分析

结构方程结果表明, 气象因子对闪电日数的贡献中最小相对日数、最大日降水量、蒸发量、冰雹日数对闪电日数有直接正向作用( $p < 0.01$ ), 影响程度按照大小排列为冰雹日数(1.29) > 最大日降水量(0.20) > 最小相对湿度(0.07) > 蒸发量(0.00)。大型蒸发量、最大风速对闪电日数具有间接的正向作用(图 5)。

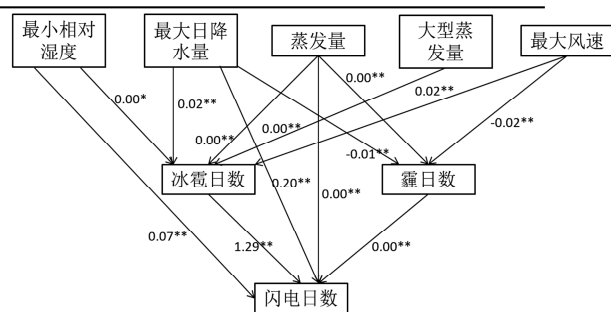


图 5 闪电日数与气象相关因子的结构方程模型

注: \* 表示在 0.05 水平下显著相关( $p < 0.05$ ), \*\* 表示在 0.01 水平下显著相关( $p < 0.01$ )。

最小相对湿度、最大日降水量、蒸发量、大型蒸发量、最大风速对冰雹日数均有直接正向作用( $p < 0.01$ ), 影响程度按照大小排列为最大日降水量(0.02) = 最大风速(0.02) > 最小相对湿度(0.00) = 蒸发量(0.00) = 大型蒸发量(0.00)。

蒸发量对霾日数有正向作用( $p < 0.01$ ), 最大日降水量和最大风速对霾日数有负向作用, 影响程度为最大风速(-0.02) > 最大日降水量(-0.01)。

### 3 研究结论及建议

青海省年闪电日数在 2.1 ~ 118.9 d 之间, 高值中心在玉树州、果洛州南部和海北州、海南州、西宁市北部、海东市北部一带, 而低值中心在海西州和海南州、西宁市、海东市、黄南州交界处; 雷电致灾因子危险性最高的地区主要分布在青海省东部、玉树州、果洛州等地区; 闪电日数关系最密切的是冰雹日数、最大日降水量、最小相对湿度。

建议条件允许的情况下, 统计更长时间序列的闪电日数和其他气象因子资料, 进一步利用主成分分析、逐步回归分析和结构方程模型等方法分析各气象因子与闪电日数之间的相关性, 使研究结果更准确。

#### 参考文献:

- [1] 王军, 刘靖惠, 刘晓燕, 等. 青海省 2000—2016 年雷电灾害特征分析及防御措施[J]. 青海科技, 2017, 24(4): 45-50.
- [2] 黎峰, 王军, 陶世银. 青海省雷电灾害特征分析[J]. 青海气象, 2011, 1(2): 79-82.
- [3] 刘岩, 王振会, 张慧良. 2007 年浙江地区梅雨期闪电特征的分析[J]. 气象科学, 2009, 29(2): 225-229.
- [4] 潘娅英, 王亚云, 周良女, 等. 浙江省地闪活动特征分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5(3): 82-88.

(下转第 203 页)