

2009—2018年拉萨市降水化学组成特征及变化趋势

索娜卓嘎¹, 赵矿¹, 陈旭¹, 王彩红¹, 杨凤琴^{2a,b}, 葛梦娟^{2a,b}, 张继峰^{2a,b}, 董慧科³, 周云桥³

1. 西藏自治区生态环境监测中心, 西藏拉萨 850000

2. 西藏大学 a. 青藏高原生物多样性与生态环境保护教育部重点实验室; b. 拉萨城市湿地生态系统西藏自治区野外定位观测站, 西藏拉萨 850000

3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

摘要:基于2009—2018年采集的拉萨市270个降水样品,分析了降水的pH、电导率、水溶性离子浓度特征及变化趋势;应用相关性分析和主成分分析等溯源方法,探讨了降水中水溶性离子的潜在来源。结果表明:拉萨市降水年平均pH变化范围为7.34~7.87,平均值为7.56,呈弱碱性;电导率变化范围为1.24~5.64 mS/m,平均值为3.91 mS/m,低于北京市、西安市等大部分城市。降水中水溶性离子平均浓度大小顺序为 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{F}^-$ 。近年 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 NO_3^- 等阴离子浓度占比迅速升高的趋势需要格外警惕。来源分析表明:阴离子的来源较为一致,主要来自汽车尾气排放;阳离子 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自地表土壤和浮尘,它们对降水pH起到了中和作用。

关键词:特征分析;降水;化学组成;长期观测;拉萨市

中图分类号:X823 文献标志码:A 文章编号:1002-6002(2024)06-0104-08

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2024.06.11

Chemical Characteristics and Trends of Atmospheric Precipitation in Lhasa from 2009 to 2018

SUONA Zhuoga¹, ZHAO Kuang¹, CHEN Xu¹, WANG Caihong¹, YANG Fengqin^{2a,b}, GE Mengjuan^{2a,b}, ZHANG Jifeng^{2a,b}, DONG Huike³, ZHOU Yunqiao³

1. Tibetan Ecology and Environment Monitoring Center, Lhasa 850000, China

2. Tibet University a. Key Laboratory of Tibetan Plateau Biodiversity and Ecological Environment Protection, Ministry of Education; b. Lhasa Urban Wetland Ecosystem Observation and Research Station of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: In this study, we analyze 270 precipitation samples collected in Lhasa city over the past decade (2009-2018) to examine the characteristics and trends of pH, conductivity, and water-soluble ion concentrations in precipitation. By employing traceability methods such as correlation analysis and principal component analysis, we explore the potential sources of water-soluble ions in precipitation. The findings reveal that the annual average pH of precipitation in Lhasa ranges from 7.34 to 7.87, with a mean value of 7.56, indicating weak alkalinity. The conductivity variation ranges from 1.24 to 5.64 mS/m, with an average of 3.91 mS/m, which is lower than that of major cities like Beijing and Xi'an. The average concentration of water-soluble ions in precipitation follows the order: $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{F}^-$. Notably, the percentage of anion concentrations, including SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , has shown a rapid increase in recent years, highlighting a concerning trend that warrants additional attention. Source analysis suggests that anions likely originate from vehicle emissions, exhibiting a more consistent source, while cations such as Ca^{2+} and Mg^{2+} primarily come from surface soil and floating dust, acting as neutralizers of precipitation pH.

Keywords: characteristics; precipitation; chemical composition; long-term observation; Lhasa

收稿日期:2023-07-13;修订日期:2023-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42107438,42007359);中国博士后科学基金项目(2020M680696)

第一作者简介:索娜卓嘎(1985-),女,藏族,西藏林芝人,学士,工程师。

通讯作者:周云桥

大气污染物主要通过大气干、湿沉降降落到地表,其中湿沉降(降水)是大气污染物清除的重要途径^[1]。降水在雨滴形成和降落冲刷过程中会溶解大气中的可溶性离子,因此,降水中的化学组成(可溶性离子)与当地大气污染情况直接相关,是反映区域大气环境特征及污染状况的重要指标之一^[2]。

随着工业化和城市化的快速发展,大气污染已成为全球关注的环境问题,对人类健康和生态安全造成了日益严重的威胁^[3]。从1980年开始,中国各地区陆续开展降水化学组成特征的相关研究,发现城市区域降水中水溶性离子浓度水平较高^[4]。受燃煤和汽车尾气排放影响,大气中致酸离子(如 SO_4^{2-} 和 NO_3^-)占比通常较高,导致部分城市出现酸雨问题^[5]。总体上,这些研究主要集中在华东、华南和西南酸雨区,大气环境相对清洁的青藏高原地区对此关注不足。

拉萨市是西藏自治区首府,地处青藏高原腹地,海拔高、气候复杂多变,地理和环境状况与内地平原地区明显不同。历史观测表明,拉萨市降水pH普遍为7.5以上^[6-8],呈弱碱性,这与太原市(pH为5.19)^[4]、黄石市(pH为5.48)^[9]等城市大气降水呈酸性的情况明显不同。然而,迄今为止对拉萨市大气降水化学组成特征报道仍较为缺乏,仅有的研究观测时间也较短,无法准确衡量拉萨市降水中化学组成的长期变化趋势,也无法解释降水呈碱性的原因。

降水呈酸性通常与大气中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等酸性组分的存在有关,而拉萨市降水呈碱性可能与该地区特有的地理和气候条件有关(如高原地区富含碳酸盐岩、气温低和太阳辐射强烈等^[10-11])。因此,有必要对拉萨市降水pH和化学组成特征进行长期观测,并在此基础上深入了解拉萨市大气降水pH的独特性,探讨其形成原因,以及是否存在特定的来源和控制因素。

该研究基于2009—2018年拉萨市城区降水的长期观测,分析了历年大气降水中pH、电导率以及化学组分的浓度及变化趋势,利用相关分析和主成分分析探究了化学组分的潜在来源。研究结果可为了解拉萨市大气环境质量状况和演变趋势以及高原大气污染防治工作提供科学参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

拉萨市位于西藏中南部,平均海拔为3 568 m,是世界上海拔最高的城市之一。整个地区地形起伏较大,被喜马拉雅山脉和冈底斯山脉环绕,形成了多山丘陵和高原湖泊的复杂地貌。拉萨市的气候属于高原季风气候,具有典型的高寒特点^[12]。受高海拔和地形的影响,该地区的气温较低,气候凉爽,年平均气温约为8.0℃。夏季时间相对较短,主要集中在6—8月,最高气温可达25℃以上。冬季漫长而寒冷,一般为12月至次年2月,气温常在0℃以下,有时会出现严重的冰冻现象。受夏季南亚季风影响,拉萨市降水主要集中在6—9月,多夜雨,年降水量为200~510 mm^[13]。

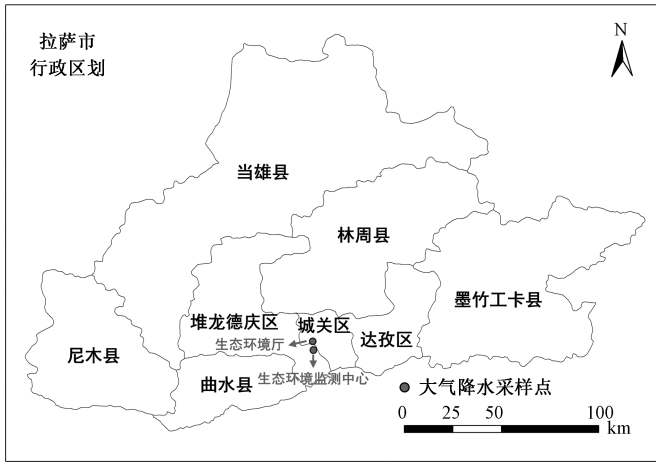
1.2 样品采集

2015年前,大气降水采样点设置在西藏自治区生态环境监测中心办公楼楼顶,2015年将采样点挪至西藏自治区生态环境厅办公楼楼顶,两地相距约4.5 km,采样点布设见图1。该研究收集了2009—2018年拉萨市城区的降水样品。样品采集方法参照《大气降水样品的采集与保存》(GB/T 13580.2—1992)、《酸沉降监测技术规范》(HJ/T 165—2004)。采用大气降水自动采样器采样后,样品用无色聚乙烯塑料瓶储存,共收集了270场降水的样品(2009年23场,2010年48场,2011年37场,2012年18场,2013年25场,2014年34场,2015年6场,2016年12场,2017年19场,2018年48场)。降雨主要集中在6、7、8月(图1)。

1.3 样品分析与质量保证

样品测定项目包括降水量、pH、电导率、水溶性阴离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 和 F^-)和水溶性阳离子(NH_4^+ 、 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}),具体分析方法和仪器见表1。

为保证大气降水监测数据的质量,样品采集和分析均按照相关国家标准的要求严格执行。所有采样和分析人员均持证上岗,所用分析仪器均经计量部门检定合格并在有效期内使用。样品分析时,各离子标准曲线的相关系数均大于0.999,并同步测定实验空白、回收率和平行样(不低于样品总量的10%),空白样品低于方法检出限,标准样品的准确度和平行样品的精密度均符合要求。



月份	平均降雨次数	平均降雨量/mm
3	1	2.0
4	1	3.5
5	3	13.5
6	5	38.0
7	8	81.9
8	8	47.2
9	3	12.7
10	1	2.7
11	2	1.5
12	1	7.4

图1 大气降水采样点位布设及降水事件统计

Fig. 1 Sampling site of the precipitation monitoring sites and statistics of rainfall events

表1 大气降水监测项目及分析方法

Table 1 Atmospheric precipitation monitoring indicators and their analysis methods

监测项目	分析方法	分析仪器
降水量	雨(雪)量计 HJ/T165—2004	虹吸式雨量计(DSJ2,恒奥德,中国) 雨量计(RS-222,建大仁科,中国)
pH	电极法 GB/T 13580.4—1992	便携式酸度计 (HI8424,哈纳,意大利)
电导率	电极法 GB/T 13580.3—1992	电导率仪 (DDS-11A,哈纳,意大利)
硫酸根 硝酸根 氯离子 氟离子 铵离子 钾离子 钠离子 钙离子 镁离子	离子色谱法 GB/T 13580.13—1992	离子色谱 (ICS1000,赛默飞,美国)

2 结果与讨论

2.1 拉萨市降水 pH 和电导率

拉萨市 2009—2018 年降水 pH、电导率的年际变化情况见图 2。总体上,拉萨市降水年均 pH 为 7.34~7.87,10 年均值为 7.56,与 1998—2000 年拉萨市降水 pH 均值(7.46)接近^[7],说明拉萨市降水 pH 长期呈弱碱性。传统认为,大气 CO₂ 分压是决定降水酸度的重要因素,海平面 CO₂ 分压值为 37 Pa,可计算出吸收饱和 CO₂ 后纯水的 pH 为 5.6。虽然拉萨海拔较高(约为 3 600 m),其 CO₂ 分压值约为 20 Pa,但计算所得纯水的 pH 为 5.7,仅比海平面纯水 pH 高 0.1,因此海拔高导致的低 CO₂ 分压不是引起拉萨市降水中 pH 高的主因。中国北方部分地区降水 pH 较高,其原因被认为是大气中碱性物质含量较高^[14-15]。拉萨市地处干旱半干旱地区,气候干燥,空气中含有大量来自表土的浮尘,浮尘中含有的碱性物质起到了中和降水 pH 的作用^[16]。这些浮尘可能是导

致降水 pH 长期呈弱碱性的主因。但验证这一猜测需要进一步分析降水中的化学组成。

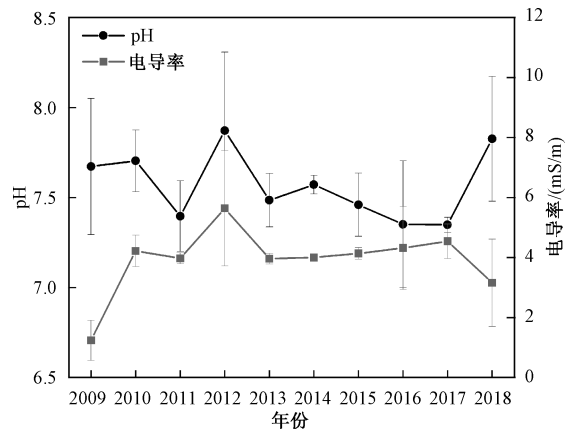


图2 拉萨市 2009—2018 年降水 pH 和电导率的年际变化

Fig. 2 Annual variation of rainfall pH and conductivity in Lhasa during 2009-2018

拉萨市 2009—2018 年降水的电导率为 1.24~5.64 mS/m,平均值为 3.91 mS/m。其数值低于北京市(5.82 mS/m)^[16],但高于中国降水背

景点瓦里关(1.46 mS/m)^[17]。电导率直接反映了降水中离子总浓度的高低,降水中的离子由大气中的气态污染物和颗粒物中的可溶物形成,因此较低的电导率说明拉萨市大气环境质量仍较为清洁,但受城市区域发展的影响,其可溶性离子含量水平已超过背景值区域。

从图2还可看出,拉萨市降水pH和电导率在年内有较大波动。季节变化会影响风速、风向、温度、湿度等气象因素,进而影响降水的pH和电导率。因此,以月份为单位,统计了拉萨市2009—2018年各月降水量及降水中pH与电导率

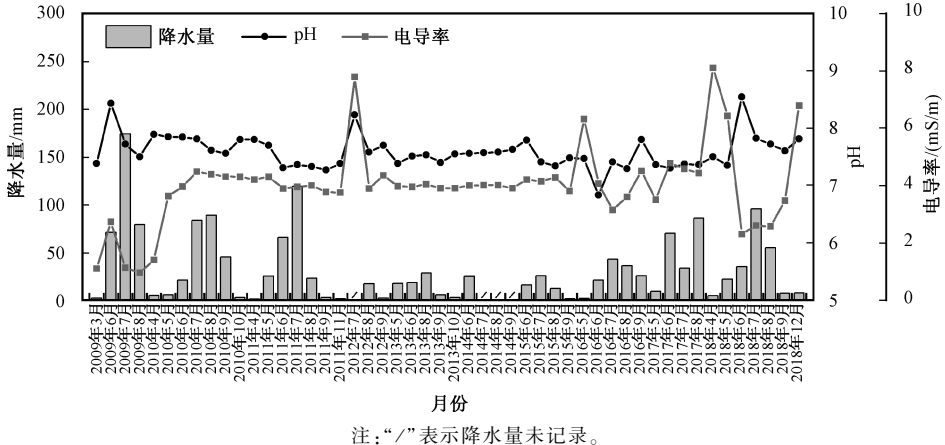


图3 拉萨市2009—2018年降水pH、电导率及降水量的月变化情况

Fig. 3 Monthly variation of rainfall pH, conductivity and precipitation in Lhasa during 2009-2018

2.2 降水中化学组成特征

拉萨市2009—2018年降水中可溶性离子总浓度和各离子占比的变化趋势见图4。总离子浓度范围为329~1 212 $\mu\text{eq/L}$,平均值为784 $\mu\text{eq/L}$ 。从各离子占比情况看,拉萨市历年降水中各离子浓度变化范围较大。就平均占比而言,各离子由高到低排序依次是 $\text{Ca}^{2+} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{F}^-$,其中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 年平均百分含量分别为51.1%和12.8%,其余离子平均百分含量占比均小于10%。但从年际变化规律看, Ca^{2+} 占比从2009年的70%波动下降至2018年的22%,而 SO_4^{2-} 占比从2009年的6%波动上升至2018年的30%。除 SO_4^{2-} 外, Cl^- 浓度在近年占比也明显增加, Cl^- 可能受到工业排放或者垃圾焚烧的影响。大气中可溶性氯化物的增加会显著增强气溶胶吸水性,导致灰霾和雾的形成^[20]。拉萨市降水中阴离子总浓度占比显著增加可能导致拉萨市降水酸化和灰霾的发生,这一趋势需要特别注意。

表2总结了拉萨市降水中离子浓度的历史观

的变化(图3)。由图3可见,拉萨市降水主要集中在6—9月,降水量的波动对降水pH和电导率影响不大。降水pH在7.5附近波动,最小值出现在2016年6月,但仍高于6.5,整体呈弱碱性。相比pH,电导率在2016年后波动明显增大。2016年拉萨市地区生产总值超过425亿元,城市发展进入快速期,人口从74.4万增长至2018年的80.9万,机动车保有量也从18.0万辆增长至2018年的24.9万辆^[18]。快速的城市发展改变了拉萨市区域环境状况和大气污染物排放特征^[19],最终导致降水电导率的大幅波动。

测数据以及全国其他城市降水中的离子浓度数据。与历史观测数据对比发现,虽然拉萨市降水pH基本保持稳定,但阴、阳离子浓度(除 Na^+ 外)均有大幅升高,其中致酸离子 SO_4^{2-} 的浓度比1987—1988年观测的数值^[7]升高了近50倍。与同处青藏高原的长江源^[14]及纳木错^[21]降水对比可见,拉萨市降水中阴、阳离子的浓度明显较高,也高于偏远城市乌鲁木齐市^[22]和武威市^[23],再次证明了城市发展对区域大气环境质量的影响。但拉萨市阴、阳离子浓度远低于敦煌市^[24],说明大气环境存在巨大的区域差异。与同纬度的上海市^[25]和重庆市^[26]对比可见,拉萨市降水中致酸离子 SO_4^{2-} 浓度明显较低。进一步与全国其他城市或地区对比发现,拉萨市降水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子含量明显高于降水pH较低的北京市^[14]、太原市^[4]、黄石市^[8]等,而与降水pH同样呈弱碱性的天山冰川附近^[27]数值接近,说明拉萨市降水呈弱碱性与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子含量高相关,这些离子起到了中和降水pH的作用。

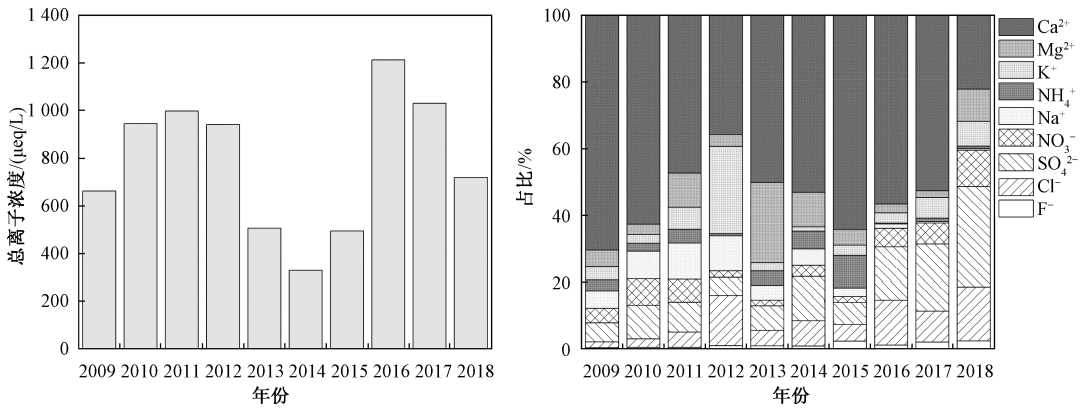


图4 拉萨市2009—2018年降水中总离子浓度和各离子占比情况

Fig. 4 The total ion concentration and percentage of each ion in precipitation in Lhasa from 2009 to 2018

表2 拉萨市降水中水溶性离子浓度及其与全国其他地区对比情况

Table 2 Ionic concentration in precipitation in Lhasa and its comparison with other regions in China $\mu\text{eq/L}$

区域	地区	年份	pH	阴离子				阳离子				文献	
				F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺		Ca ²⁺
研究区	拉萨市	2009—2018	7.61	8.50	67.1	101	42.9	39.3	20.0	55.0	49.9	400	该研究
	拉萨市	1998—2000	7.46	0.40	21.6	6.10	7.30	9.80	8.70	9.80	11.8	199	[7]
	拉萨市	1997—2000	8.36	0.40	9.70	5.20	6.90	11.2	14.3	5.14	10.9	197	[8]
	拉萨市	1987—1988	8.37	—	21.5	2.10	2.30	61.7	15.5	12.6	18.3	146	[7]
偏远区域	天山冰川	2013—2014	7.81	—	24.1	34.2	30.4	51.4	53.4	5.04	50.3	402	[27]
	长江源	2013	6.70	—	1.00	4.30	4.70	4.10	9.30	0.60	0.30	5.40	[14]
	瓦里关	2007—2009	6.40	—	6.10	24.0	8.30	8.70	45.5	3.80	12.1	34.0	[17]
偏远城市	纳木错	2005—2006	—	—	19.2	15.5	10.4	15.4	18.1	14.5	7.43	65.6	[21]
	乌鲁木齐市	2017—2019	7.95	0.61	9.46	29.0	4.32	9.47	2.92	2.30	1.92	21.9	[22]
	武威市	2013—2014	7.60	0.10	4.20	23.1	7.10	3.90	1.60	1.70	1.60	19.4	[23]
	敦煌市	2012—2013	7.80	—	1 002	1 185	163	1 203	—	69.0	501	1 463	[24]
同纬度城市	上海市	2000	5.43	166	17.8	1 071	323	122	231	60	28.9	303	[25]
	重庆市	1987—1989	4.11	—	30.0	299	23.0	17.0	123.0	17.0	31.0	125	[26]
其他城市	黄石市	2020	5.48	3.57	6.99	32.4	24.6	6.12	40.8	7.42	3.38	39.0	[8]
	北京市	2016—2017	6.97	10.1	19.1	45.8	54.0	19.6	169	7.79	10.8	67.0	[15]
	太原市	2011—2013	5.19	15.8	31.0	229	99.2	22.4	141	10.5	42.2	265	[4]
	丽江市	2012	—	—	1.19	17.3	5.70	3.70	35.3	1.96	6.82	39.2	[28]
	西安市	2009	5.83	6.90	39.3	304	67.5	30.3	171	13.7	37.6	226	[29]
	沈阳市	2007	6.59	58.1	85.0	330	73.9	39.9	175	15.0	66.9	291	[30]

注：“—”表示未检测或文献未提及。

2.3 降水中离子相关关系

降水酸度受到各水溶性离子之间的平衡关系和相互作用的共同影响,因此对拉萨市降水中水溶性离子(F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、Na⁺、NH₄⁺、Mg²⁺、K⁺和Ca²⁺)进行皮尔森相关分析,结果见表3。

由表3可见,F⁻与SO₄²⁻具有显著相关性,相关系数为0.74,SO₄²⁻和NO₃⁻的相关系数为0.56,相关性显著。此外,Cl⁻和SO₄²⁻也具有显著相关性,且相关系数大于0.50。这些离子都是阴离子,说明拉萨市降水中阴离子可能来自相同排放源,与其他区域发现的前体物SO₂和NO_x具有相同排放源和相似化学性质的研究结果一致^[31]。其他离子间虽然也具有显著相关性,但相关系数

均小于0.50,说明这些离子(尤其是阳离子)可能受到多种来源和因素的影响。

2.4 降水中离子来源分析

为进一步分析降水酸碱性与其化学组分之间的关系,确定不同化学组分的来源,该研究采用主成分分析法对2009—2018年拉萨市降水中各水溶性离子组分进行分析,再通过方差最大旋转法提取出各因子的特征值,结果见表4。在主成分分析结果中,每个成分在因子上的载荷值越高,表示该因子对该成分越重要。由表4可见,在95%的置信水平上,提取的特征值大于1的4个因子共同解释了89.0%的信息(大于80%),表明这4个因子能很好地代表全部项目的信息。

表3 拉萨市大气降水中各水溶性离子间的相关性
Table 3 Correlation coefficient of ionic components in precipitation in Lhasa

离子	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺
F ⁻	1								
Cl ⁻	0.530 **	1							
SO ₄ ²⁻	0.735 **	0.501 **	1						
NO ₃ ⁻	0.410 **	0.317 **	0.562 **	1					
Na ⁺	0.005	0.116	0.190 **	0.277 **	1				
NH ₄ ⁺	-0.200 **	-0.199 **	-0.212 **	-0.050	0.002	1			
Mg ²⁺	0.255 **	0.043	0.304 **	0.186 **	0.264 **	0.148 *	1		
K ⁺	0.140 *	0.587 **	0.099	0.030	0.456 **	-0.095	0.168 **	1	
Ca ²⁺	0.241 **	0.155 *	0.377 **	0.434 **	0.602 **	-0.033	0.138 *	0.261 **	1

注：“*”表示在0.05置信水平下相关性显著；“**”表示在0.01置信水平下相关性显著。

表4 拉萨市大气降水化学组成的主成分分析统计结果
Table 4 Statistical results of PCA analysis of ionic compositions in precipitation of Lhasa

离子	因子1	因子2	因子3	因子4
F ⁻	0.823	-0.296	-0.181	-0.003
Cl ⁻	0.856	0.308	-0.273	0.059
SO ₄ ²⁻	0.926	-0.226	0.169	0.230
NO ₃ ⁻	0.672	0.043	0.620	0.287
Na ⁺	-0.248	0.902	0.300	0.101
NH ₄ ⁺	-0.718	-0.111	0.374	-0.032
K ⁺	0.281	0.832	-0.422	-0.044
Mg ²⁺	-0.328	0.049	0.031	0.907
Ca ²⁺	0.388	0.224	0.727	-0.367
特征值	3.63	1.81	1.46	1.11
方差/%	40.36	20.08	16.21	12.32
方差累计/%	40.36	60.44	76.66	88.98

因子1中载荷值较高的离子包括F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻，这类离子占总解释度的40.36%，其中SO₄²⁻的因子载荷值在0.90以上。SO₄²⁻主要来自燃煤、化石燃料燃烧等^[32]，结合拉萨市工业活动较少的特征，此因子主要代表汽车尾气排放。因子2中Na⁺、K⁺的因子载荷值较高，这类离子占总解释度的20.1%，Na⁺和K⁺通常与营养元素相关，一部分来自海洋源，也有可能来自生物质燃烧、化肥施用等^[33]，这个因子代表农业活动排放或蒸发岩影响。因子3中具有较高载荷值的离子是Ca²⁺，其解释度占比为16.2%，而因子4中具有较高载荷值的离子是Mg²⁺（解释度占比为12.3%），这2种离子主要是地壳元素，在风力作用下易进入大气并随干、湿沉降再次沉降到地表^[14]，因此因子3和因子4主要代表地表土壤和浮尘。

总体来说，拉萨市大气降水中阴离子主要来自汽车尾气排放。Ca²⁺和Mg²⁺主要来自地表土壤和浮尘，中和了阴离子的致酸作用。然而，未来随着拉萨市汽车保有量的增加，阴离子浓度和占比将进一步提升，拉萨市降水是否会向酸性转变需要密切且持续的监测。依据长期观测数据，建议

制定保护拉萨市大气环境质量的切实有效的政策和措施。

3 结论

1) 2009—2018年拉萨市降水年均pH为7.34~7.87，均值为7.56，呈弱碱性。电导率均值为3.91 mS/m，低于中国东部大部分城市，说明拉萨市大气环境依然洁净。

2) 来源分析发现，阴离子的来源较为一致，主要来自汽车尾气排放；阳离子Ca²⁺和Mg²⁺主要来自地表土壤和浮尘，对降水pH起到了中和作用，是拉萨市降水呈弱碱性的主因。

3) 拉萨市降水中水溶性离子Ca²⁺和SO₄²⁻浓度占比相对较高，但碱性离子Ca²⁺占比波动下降，致酸离子SO₄²⁻占比波动上升，拉萨市降水的潜在酸化趋势需要长期密切监测。

参考文献 (References):

- [1] PAN Y P, WANG Y S. Atmospheric Wet and Dry Deposition of Trace Elements at 10 Sites in Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,

- 2015, 15(2): 951-972.
- [2] 何微娜, 谢松青, 杨小涛, 等. 2010—2019年台州市市区降水化学组成特征及变化趋势[J]. 中国环境监测, 2021, 37(5): 140-147.
HE Weina, XIE Songqing, YANG Xiaotao, et al. Chemical Characteristics and Trends of Precipitation in Urban Taizhou from 2010 to 2019 [J]. Environmental Monitoring in China, 2021, 37 (5): 140-147.
- [3] BRUNEKREEF B, HOLGATE S T. Air Pollution and Health [J]. The Lancet, 2002, 360 (9 341): 1 233-1 242.
- [4] 郭晓方, 崔阳, 王开扬, 等. 近3年太原市夏季降水的化学特征研究[J]. 环境科学, 2015, 36(2): 388-395.
GUO Xiaofang, CUI Yang, WANG Kaiyang, et al. Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan [J]. Environmental Science, 2015, 36(2): 388-395.
- [5] 张舵, 许瑞广, 赵一飞, 等. 2006—2021年中国酸雨年际变化特征分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(6): 849-854.
ZHANG Duo, XU Ruiguang, ZHAO Yifei, et al. Interannual Variation Characteristics of Acid Rain from 2006-2021 in China [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2023, 45(6): 849-854.
- [6] 章典, 师长兴, 假拉. 西藏降水化学分析[J]. 干旱区研究, 2005(4): 55-59.
ZHANG Dian, SHI Changxing, JIA La. Analysis on Chemical Composition of Rainfall on the Tibet Plateau [J]. Arid Zone Research, 2005(4): 55-59.
- [7] 章典, 师长兴, 假拉. 青藏高原降水化学研究[J]. 环境科学学报, 2004(3): 555-557.
ZHANG Dian, SHI Changxing, JIA La. A Study of Chemical Properties of Rains on the Tibetan Plateau [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004(3): 555-557.
- [8] ZHANG D D, PEART M, JIM C Y. Precipitation Chemistry of Lhasa and Other Remote Towns, Tibet [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37 (2): 231-240.
- [9] 鞠定国, 任大军, 刘婷, 等. 黄石市大气降水的化学特征及来源解析[J]. 环境化学, 2022, 41(11): 3 685-3 694.
JU Dingguo, REN Dajun, LIU Ting, et al. Chemical Characteristics and Source Analysis of Precipitation in Huangshi City [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(11): 3 685-3 694.
- [10] 黄琼中. 拉萨市环境空气质量与气象特征分析[J]. 中国环境监测, 2001, 17(6): 50-53.
HUANG Qiongzong. Analysis on the Ambient Air Quality Relation to Meteorological Condition in Lhasa [J]. Environmental Monitoring in China, 2001, 17 (6): 50-53.
- [11] 卓嘎, 德庆卓嘎, 陈涛. 拉萨市大气污染分布特征及气象影响因子分析[J]. 中国环境监测, 2009, 25(1): 90-97.
ZHUO Ga, DEQING zhuoga, CHEN Tao. Study on the Air Pollution Feature and Its Meteorological Influencing Factor in Lhasa [J]. Environmental Monitoring in China, 2009, 25(1): 90-97.
- [12] LI D, TIAN P, LUO H, et al. Impacts of Land Use and Land Cover Changes on Regional Climate in the Lhasa River Basin, Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 14 0570.
- [13] 邱大瑞, 杜晓辉, 扎西罗杰, 等. 1980—2019年拉萨市降水气候特征分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(12): 193-196.
QIU Darui, DU Xiaohui, ZHAXI luojie, et al. Analysis of Climatic Characteristics of Precipitation in Lhasa from 1980 to 2019 [J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2022, 50(12): 193-196.
- [14] 韩力慧, 王红梅, 向欣, 等. 北京市典型区域降水特性及其对细颗粒物影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(9): 3 635-3 646.
HAN Lihui, WANG Hongmei, XIANG Xin, et al. The Characteristics of Precipitation and Its Impact on Fine Particles at a Representative Region in Beijing [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (9): 3 635-3 646.
- [15] ZHANG F. Spatial Pattern and Seasonal Variation of Alkaline Precipitation Observed in the Gansu Province, NW China [J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(14): 417.
- [16] 汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 等. 长江源区大气降水化学特征及离子来源[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4 431-4 439.
WANG Shaoyong, HE Xiaobo, WU Jinkui, et al. Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River [J]. Environmental Science, 2019, 40 (10): 4 431-4 439.
- [17] 汤洁, 薛虎圣, 于晓岚, 等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析[J]. 环境科学学报, 2000(4): 420-425.
TANG Jie, XUE Husheng, YU Xiaolan, et al. The Preliminary Study on Chemical Characteristics of Precipitation at Mt Waliguan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000(4): 420-425.
- [18] 拉萨市 2018 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2019-04-17) [2023-08-20]. <https://www.lasa.gov.cn/lasa/stjj/201911/38f538d2db834>

- df6b9d12cc9bfc29c57.shtml.
- [19] 李玲. 西藏拉萨市经济发展与生态环境耦合度分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(3): 7-9.
LI Ling. Analysis of the Coupling Degree of Economic Development and Ecological Environment in Lhasa, Tibet [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(3): 7-9.
- [20] GUNTHE S S, LIU P, PANDA U, et al. Enhanced Aerosol Particle Growth Sustained by High Continental Chlorine Emission in India [J]. Nature Geoscience, 2021, 14(2): 77-84.
- [21] LI C, KANG S, ZHANG Q, et al. Major Ionic Composition of Precipitation in the Nam Co Region, Central Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Research, 2007, 85(3/4): 351-360.
- [22] 赛买提·阿布都热合曼, 王涛, 张建中, 等. 乌鲁木齐市米东区大气降水的化学特征及来源分析[J]. 环境化学, 2022, 41(1): 135-143.
ABUDUREHEMAN Saimaiti, WANG Tao, ZHANG Jianzhong, et al. Chemical Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Precipitation in Urumqi City [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(1): 135-143.
- [23] 李宗杰, 宋玲玲, 田青. 河西走廊东段大气降水特征及水汽来源分析[J]. 环境化学, 2016, 35(4): 721-731.
LI Zongjie, SONG Lingling, TIAN Qing. Analysis of Precipitation Characteristics and Water Vapor Sources in the East of Hexi Corridor [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(4): 721-731.
- [24] GUO X, FENG Q, LIU W, et al. Stable Isotopic and Geochemical Identification of Groundwater Evolution and Recharge Sources in the Arid Shule River Basin of Northwestern China [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(22): 4 703-4 718.
- [25] 叶诗雨, 段玉森, 李庆. 上海市 2000—2019 年降水酸性和离子成分的变化趋势[J]. 环境化学, 2021, 40(12): 3 672-3 680.
YE Shiyu, DUAN Yusen, LI Qing. The Trend of Acidity and Ion Compositions of Precipitation During 2000-2019 in Shanghai [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(12): 3 672-3 680.
- [26] ZHAO D, HANS M, ZHAO D, et al. Pattern and Cause of Acidic Deposition in the Chongqing Region, Sichuan Province, China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1994, 77: 27-48.
- [27] 王建, 韩海东, 许君利, 等. 天山科其喀尔冰川末端降水化学特征及控制因素[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 347-358.
WANG Jian, HAN Haidong, XU Junli, et al. Chemical Characteristics and Their Influencing Factors of Precipitation at the End of the Koxkar Glacier, Tianshan Mountains [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 347-358.
- [28] 石晓非, 牛贺文, 何元庆, 等. 丽江-玉龙雪山地区大气降水化学特征[J]. 环境化学, 2017, 36(5): 994-1 002.
SHI Xiaofei, NIU Hewen, HE Yuanqing, et al. Characteristics of Rainwater Chemistry in Lijiang-Yulong Snow Mountain [J]. Environmental Chemistry, 2017, 36(5): 994-100 2.
- [29] 田晶, 沈振兴, 张琨, 等. 西安市春、夏季大气降水的化学组成和来源分析[J]. 西安交通大学学报, 2011, 45(5): 108-113.
TIAN Jing, SHEN Zhenxing, ZHANG Kun, et al. Chemical Composition and Potential Sources of Water-Soluble Compounds in Atmospheric Precipitation in Xi'an in Spring and Summer [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(5): 108-113.
- [30] 张林静, 张秀英, 江洪, 等. 沈阳市降水化学成分及来源分析[J]. 环境科学, 2013, 34(6): 2 081-2 088.
ZHANG Linjing, ZHANG Xiuying, JIANG Hong, et al. Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang [J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2 081-2 088.
- [31] 鲍阳阳. 上海市浦东新区大气降水化学组分及其相关性分析[J]. 环境监测与预警, 2017, 9(3): 44-48.
BAO Yangyang. Chemical Characteristics of Atmospheric Precipitation and Its Correlation Analysis in Shanghai Pudong New Area [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2017, 9(3): 44-48.
- [32] 徐虹, 毕晓辉, 林丰妹, 等. 杭州市大气降雨化学组成特征及来源分析[J]. 环境污染与防治, 2010, 32(7): 75-81.
XU Hong, BI Xiaohui, LIN Fengmei, et al. Analysis on the Sources and Characteristics of Chemical Composition of Precipitation in Hangzhou [J]. Environmental Pollution & Control, 2010, 32(7): 75-81.
- [33] 孙启斌, 肖红伟, 肖化云, 等. 南昌市大气降水化学特征及来源分析[J]. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1 841-1 848.
SUN Qibin, XIAO Hongwei, XIAO Huayun, et al. Chemical Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Precipitation in Nanchang City [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(12): 1 841-1 848.