

路锦燕,马燕,辛和平,等.天山天池雾凇气象等级指数分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):52-57.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



天山天池雾凇气象等级指数分析

路锦燕¹,马燕¹,辛和平¹,毛炜峰^{2*}

(1.阜康市气象局,新疆 阜康,831500;2.中国气象局乌鲁木齐沙漠研究所,新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:利用天池气象站1981—2018年的雾凇天气现象资料分析天山天池的雾凇特征。用2004—2018年雾凇天气现象出现时的逐小时气温、温度露点差、相对湿度、风等数据,分析雾凇与气象要素的关系。结果表明:天山天池年平均雾凇27.8 d,冬季最多,春季次之;每年11月—翌年3月是雾凇的多发时段,其中3月最多;雾凇出现的开始时间多在夜间,结束时间多在12—17时。年雾凇日数以9.8 d/10 a的速率呈波动减少趋势,冬季减少速率为4.4 d/10 a。天山天池出现雾凇最有利的气象条件是,气温在-4~-10℃,温度露点差≤2.0℃,相对湿度>90%,风速≤3.0 m/s。选取气温、温度露点差、相对湿度、2 min平均风速、雾等对雾凇形成影响较大的气象因子,建立天山天池雾凇气象等级指数并进行典型年份检验,该指数可以作为旅游气象服务业务的一项参考指标。

关键词:雾凇;气象等级;指数分析;天山天池

中图分类号:P426.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)02-0052-06

雾凇是低温时空气中水汽直接凝华,或过冷雾滴直接冻结在物体上的乳白色冰晶沉积物,俗称树挂,是毛茸晶状类。雾凇的出现通常是温度、湿度、气候以及地理环境共同作用的结果。国内很多专家对雾凇进行了分析研究^[1-6]。李文静等^[7]分析了我国1981—2010年雾凇时空分布特征,得出我国的雾凇主要分布在江南中北部、贵州中西部及其以北地区,尤其新疆北部、内蒙古东北部、黑龙江中部、吉林中部等地出现最多,年雾凇日数在10 d以上。马旭红等^[8]研究指出,吉林雾凇年平均出现29.9 d,吉林雾凇旅游资源丰富,有极高的开发利用潜力。新疆天山天池景区是国家5A级风景名胜区,总面积160 km²,是昌吉回族自治州阜康市旅游发展的核心和龙头。

阜康市旅游有明显的淡旺季之分,天山天池夏季高山流水、湖泊丛林相互辉映,景色优美,宛如仙境,旺季年接待游客近200万人次。为消除旅游季节性差异,阜康市大力培育冬季旅游品牌,每年12月—次年3月举办“天山天池冰雪风情节”,欲将天山天池打造为国际性冬季旅游胜地。进入冬季,天山天池景区时常会形成雾凇天气,可谓“榆树结银花,松树绽银菊”,冬季特有的雾凇奇观,是冬季冰雪旅游的一大特色。

雾凇是北方地区很有特色的景观资源,可以通过统计分析当地雾凇出现时的基本气象要素,找出形成雾凇的规律和条件,建立雾凇预报指标。许剑勇等^[9]研究了黄山雾凇的旅游气象指数,为开展黄山旅游气象服务提供了技术支持。丁国香等^[10]用小时观测数据分析了黄山雾凇特征和气象条件的关系。周丽贤等^[11]对比分析了平原与高山雾凇的时空分布特点和形成气象条件,并分别建立了高山型雾凇和平原型雾凇的旅游指数。王正旺等^[12]对长治市雾凇天气进行分析,并根据形成雾凇的气象条件进行检验与试报。天山天池雾凇气象预报还未业务化,相关

收稿日期:2022-01-29;修回日期:2022-04-24

基金项目:昌吉州气象局科研课题(CJ202004);新疆维吾尔自治区气象局重点项目(ZD201804)

作者简介:路锦燕(1979—),女,高级工程师,主要从事气象服务和应用气象工作。E-mail:605988509@qq.com

通信作者:毛炜峰(1969—),男,研究员,主要从事气候诊断、预测、气候变化影响等研究。E-mail:mao6991@vip.sina.com

科研支撑成果极少。加强天山天池雾凇相关的气象要素分析,建立本地化的雾凇旅游气象指数,提升雾凇景观旅游气象服务水平,将为消除旅游季节性差异,推进天池冬季冷资源转为热经济,打造全年旅游品牌提供技术支持和气象服务保障。

1 资料与方法

选取 1981—2018 年天池国家气象站观测到的雾凇天气现象资料,采用气候倾向率等数理统计方法对雾凇的基本特征进行分析。在年度雾凇日数的统计中,将上年 7 月 1 日至当年 6 月 30 日作为 1 a 进行统计。选取 2004—2018 年有自动观测数据以来雾凇日的逐小时气温、温度露点差、相对湿度、2 min 平均风向风速、雾等气象观测资料对雾凇出现时的气象要素进行分析,通过基本要素的分析,找出影响雾凇出现的关键因子,建立雾凇气象等级指数,并对典型年份(2011 年)进行检验。

2 天山天池雾凇基本特征

2.1 雾凇气候特征

1981—2018 年天山天池共出现雾凇 1 056 d,平均每年出现雾凇 27.8 d,雾凇资源丰富。年雾凇日数在 6~56 d,1987 年最多,2008 年最少。1981—2018 年中有 18 a 雾凇日数达到 30 d 以上。雾凇除夏季外其他季节均可出现,由表 1 可知,冬季(12—2 月)最多,1981—2018 年雾凇累计日数为 472 d,占年雾凇累计总数的 44.7%;春季(3—5 月)次之,雾凇累计日数为 296 d,占年雾凇累计总数的 28.0%;秋季(9—11 月)雾凇累计日数为 288 d,占年雾凇累计总数的 27.3%。雾凇初日最早出现在 1993 年 9 月 25 日,终日最晚出现在 1984 年 5 月 20 日。每年 10—12 月随着气温下降,雾凇日数逐渐增多,4—5 月随着气温升高,雾凇日数逐渐减少,6—8 月没有雾凇出现。

表 1 1981—2018 年各季雾凇累计日数

季节	秋季	冬季	春季	合计
累计日数/d	288	472	296	1 056
占比/%	27.3	44.7	28.0	100

由图 1 可知,1981—2018 年天山天池月平均雾凇日数 3 月最多,为 5.9 d;其次是 11 月,为 4.9 d。11 月—次年 3 月出现的雾凇日数占年总日数的 83.5%,其中 1 月雾凇日数最少,月平均雾凇日数为

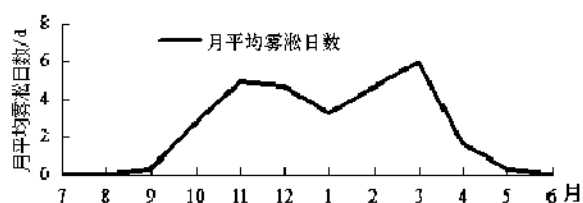


图 1 1981—2018 年天山天池月平均雾凇日数

3.2 d。

2004—2018 年天山天池景区 08—20 时雾凇天气出现 202 次,共计 1 782 h。202 个雾凇日中,出现雾凇现象的起始时间在夜间的占 84%。雾凇现象的结束时间分布较为复杂,由图 2 可知,结束时间出现在 12—17 时居多,占总样本的 89.1%;以 13 时结束最多,占总样本的 25%。



图 2 2004—2018 年天山天池雾凇结束时次分布

1981—2018 年的 1 056 d 雾凇日,可以划分为 426 次雾凇过程(表 2),出现 1 d 的过程只有 126 次,其余 300 次雾凇过程的持续时间均在 2 d 以上。雾凇天气过程持续 2 d 以上的占 70.2%,其中持续 2 d 的最多,占 35.9%;持续 3~4 d 的占 24.2%,持续 5 d 以上的占 10.1%。雾凇持续最长日数达 16 d,出现在 1998 年 3 月 5—20 日。天山天池雾凇形成后有较好的持续性。

表 2 不同持续日数的雾凇过程频数

持续日数/d	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
过程频数/次	126	153	77	26	18	9	9	3	1	1	1	1	0	0	0	1
占比/%	29.6	35.9	18.1	6.1	4.2	2.1	2.1	1.0	0.7	0.2	0.2	0.2	0	0	0	0.2

2.2 雾凇变化特征

2.2.1 年雾凇日数的年际变化特征

通过对天山天池 1981—2018 年雾凇日数进行气候倾向率分析(图 3)可知,1981—2018 年雾凇日数呈波动减少趋势,与我国的年雾凇站次数呈显著减少的变化趋势一致^[7,13],减少速率为 9.8 d/10 a。雾凇日数年际变化大,年雾凇日数最大值和最小值相差 50 d,差值约为天山天池 1981—2018 年雾凇日数平均值的 1.8 倍。天山天池雾凇日数年际间分布不

太稳定、年际间差异明显,1981—2004年,雾凇日数的年变化不大,平均雾凇日数为37.9 d,2005年雾凇日数发生突变,2005—2018年年平均雾凇日数显著减少,为10.4 d。

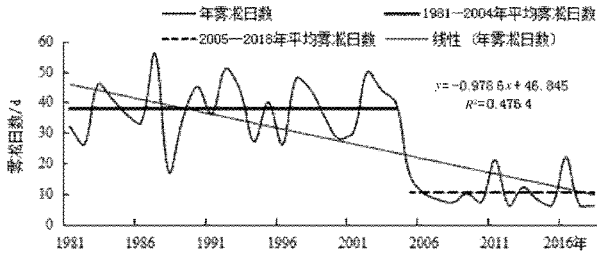


图3 天山天池1981—2018年雾凇日数年变化

2.2.2 月季雾凇日数的年际变化特征

近38年来,天山天池秋、冬、春三季雾凇日数均呈减少趋势,日数减少最显著的是冬季,减少速率为4.4 d/10 a;其次是春季,减少速率为3.2 d/10 a,减少最慢的是秋季,为2.1 d/10 a,对雾凇年日数减少影响最大的是冬季。1981—2018年,天山天池雾凇主要出现在10月—次年4月,月平均日数呈减少趋势,减少速率从大到小依次是3月的2.4 d/10 a、2月的1.7 d/10 a、1月的1.5 d/10 a、12月的1.2 d/10 a、11月的0.8 d/10 a、4月的0.7 d/10 a、10月的0.4 d/10 a。

3 天山天池雾凇形成的气象要素分析

从旅游气象服务的需求出发,着重对天山天池景区旅游期间即每日08—20时雾凇现象的小时数据,包括气温、温度露点差、相对湿度、2 min 风向风速、降水、雾等天气现象进行统计分析。

3.1 雾凇形成时的温度特征

雾凇在气温较低($\leq -3\text{ }^{\circ}\text{C}$),有雾或湿度大时易生成^[4],适宜的温度和水汽条件对雾凇的形成非常重要,周丽贤等^[11]对全国易出现雾凇的平原和高山地区建立的雾凇旅游指数分析可知,温度越低越容易形成雾凇。对天山天池景区1782个时次雾凇天气现象期间的小时正点气温资料进行统计分析发现,天山天池雾凇的出现,并非气温越低越好,而是存在一定的区间限制。由表3可知,气温在 $-1\sim -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 都可形成雾凇,但气温在 $-4\sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时非常容易形成,共出现951个时次,占总次数的53.4%。随着气温的升高或降低,雾凇出现的时次逐渐减少,气温在 $-2.1\sim -3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-10.1\sim -13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时比较容易形成,共出现544个时次,占总次数的30.6%;温度在 $-1\sim -2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-13.1\sim -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可以形成,共出现199个

时次,占总次数的11.1%;当温度 $> -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $< -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时则不易形成,仅占总次数的4.9%。

表3 不同温度条件下雾凇出现小时频数

气温区间/ $^{\circ}\text{C}$	>-1	$-1\sim -2$	$-2.1\sim -3.9$	$-4\sim -10$	$-10.1\sim -13.0$	$-13.1\sim -17$	<-17
小时频数/次	41	45	215	951	329	154	47
占比/%	2.3	2.5	12.1	53.4	18.5	8.6	2.6

3.2 雾凇形成时的湿度特征

3.2.1 雾凇形成时的温度露点差特征

由表4可知,雾凇形成时温度露点差一般 $< 7\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度露点差 $\leq 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时非常容易形成雾凇,共出现1413个时次,占总次数的79.3%;温度露点差在 $2.1\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时比较容易形成雾凇,共出现202个时次,占总次数的11.3%;温度露点差在 $4.1\sim 7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时可以形成雾凇,共出现127个时次,占总次数的10.1%;温度露点差 $> 7.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不易形成雾凇。

表4 温度露点差及雾凇出现时次数

温度露点差/ $^{\circ}\text{C}$	≤ 2.0	$2.1\sim 4.0$	$4.1\sim 7.0$	> 7.0
小时频数/次	1413	202	127	40
占比/%	79.3	11.3	7.1	2.2

3.2.2 雾凇形成时的相对湿度特征

雾凇形成时相对湿度大多在65%~100%,相对湿度 $> 90\%$ 时非常容易形成雾凇,共出现842个时次,占总次数的47.3%;相对湿度在90%~81%时较易形成雾凇,共出现679个时次,占总次数的38.1%;相对湿度在80%~65%时可以形成雾凇,占总次数的10%;湿度 $< 65\%$ 时则不易形成雾凇(表5)。

表5 不同湿度条件下雾凇小时频数

相对湿度区间/%	> 90	$90\sim 86$	$85\sim 81$	$80\sim 76$	$75\sim 71$	$70\sim 65$	< 65
小时频数/次	842	525	154	68	63	49	81
占比/%	47.3	29.5	8.6	3.8	3.5	2.7	4.5

3.3 雾凇形成时风的特征

微风是雾凇形成的重要条件,对雾凇形成期间的2 min 平均风速进行分析,风速在 $0\sim 4.5\text{ m/s}$ 都可以形成雾凇(表6)。风速在 $1.6\sim 3.0\text{ m/s}$ 时非常容易形成雾凇,共出现818个时次,占总次数的45.9%;风速 $\leq 1.5\text{ m/s}$ 出现632个时次,占总次数的35.5%,较易形成雾凇;风速在 $3.1\sim 4.5\text{ m/s}$ 时可以形成雾凇;但风速 $> 4.5\text{ m/s}$ 时不易形成雾凇。

表 6 不同风速条件下雾凇小时频数

风速区间/(m/s)	≤1.5	1.6~3.0	3.1~4.5	>4.5
小时频数/次	632	818	256	76
占比/%	35.5	45.9	14.4	4.3

从雾凇出现期间的风向玫瑰图(图 4)可以看出,天山天池雾凇在偏西风时非常容易形成,占总次数的39%;其次是偏南风易形成雾凇,占总次数的31%。

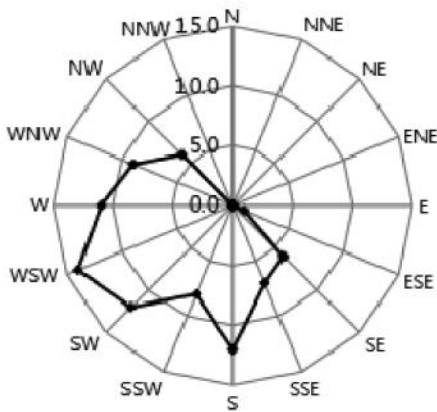


图 4 天山天池 2004—2018 年雾凇风向玫瑰图

3.4 天气现象特征

2004—2018 年出现的 208 次雾凇天气中,当天出现降雪的有 130 次,占 62.5%;雾凇日出现雾的有 158 次,占 75.9%,由此可见,雾是雾凇天气现象出现的有利条件。雾凇日既有雾又有降雪的有 121 次,占 58.2%。雾凇日的降雪量大多为小雪,≤1.0 mm 的有 65 次,占 50%,1.1~3 mm 的有 41 次,占 31.5%。

4 天山天池雾凇气象等级指数

4.1 雾凇气象等级

天山天池雾凇的形成与气温、温度露点差、相对湿度、2 min 风速、雾的关联程度较高,当这些要素达到一定范围时就可以出现雾凇。因此选取这些气象因子,建立雾凇预报气象指数,将建立的预报指数

与未来天气形势相结合就可以做出比较准确的雾凇预报。

雾凇预报气象指数分为 4 级,分别表示非常容易形成雾凇、较易形成雾凇、可以形成雾凇、不易形成雾凇,对应的气象条件也按照由易到难出现雾凇的条件排序^[15]。雾凇指数 1 级对应样本中最有利于出现雾凇所满足的气象条件;雾凇指数 2 级对应样本中较易出现雾凇所满足的气象条件;雾凇指数 3 级对应样本中雾凇出现气象条件的临界值;雾凇指数 4 级对应的气象条件为雾凇出现时不包含的气象条件。各等级条件如表 7 所示。

4.2 雾凇气象等级指数检验

雾凇气象等级指数的检验方案:首先,计算每天的雾凇气象等级指数,当天至少有 1 个时次的气温、温度露点差、相对湿度、2 min 风速、雾等要素同时满足 1 级标准,则当日雾凇气象指数记为 1 级;没有达到 1 级时,再进行 2 级判别,以此类推到 4 级。其次,结合当天是否出现雾凇天气现象,给出当天的评定结果,根据情况分别记为“正确”、“空”和“漏”。如果雾凇气象等级指数为 4,同时当天未记录到雾凇天气现象,则当天不统计。雾凇气象等级分别为 1、2 或者 3 级时,当天实况出现雾凇,检验结果记为“正确”,否则记为“空”;如果雾凇气象等级指数为 4,实况出现雾凇,则记为“漏”。

选取天山天池近 10 年中雾凇日数接近多年平均数的 2011 年,对雾凇气象指数进行检验。2011 年天山天池实际出现雾凇 21 d。将 2011 年逐日逐时的温度、温度露点差、相对湿度、风速、天气现象雾等气象要素按雾凇预报气象指数等级指标进行检验,结果见表 8。2011 年全年满足 1 级指标的日数有 15 d,与实况对比,“正确”13 d,“空”2 d,“漏”2 d,准确率为 76.5%。全年满足 2 级指数的日数有 7 d,与实况对比,“正确”5 d,“空”2 d,“漏”0 d,准确率为 71.4%。全年满足 3 级的日数有 3 d,与实况对比,“正确”1 d,“空”2 d,“漏”0 d,准确率为 33.3%。2011 年雾凇气象等级指数在 1~2 级的日数合计 22 d,

表 7 雾凇气象指数等级和对应的气象要素条件

雾凇气象 指数等级	温度指标/℃	温度露点 差指标/℃	相对湿度 指标/%	风速指标 /(m/s)	天气现象指标(雾)	等级说明
1	-4~-10	≤2.0	>90	1.6~3.0	前一天和当天都有雾	非常容易形成雾凇
2	-2.1~-3.9 或 -10.1~-13.0	2.1~4.0	90~81	≤1.5	前一天和当天都有雾	较易形成雾凇
3	-1~-2 或 -13.1~-17.0	4.1~7.0	80~65	3.1~4.5	当天有雾	可以形成雾凇
4	>-1 或 <-17	>7.0	<65	>4.5	无	不易形成雾凇

“正确”18 d,“空”4 d,“漏”2 d,准确率达到 75%。

表 8 天山天池 2011 年雾凇旅游气象指数检验

雾凇气象指数等级	1 级	2 级	3 级
空次数	2	2	2
漏次数	2	0	0
正确次数	13	5	1

5 结论

(1)天山天池景区雾凇年平均日数为 27.8 d,以 9.8 d/10 a 的速率呈波动减少趋势,年际变化大,年雾凇日数最多达 56 d,年雾凇日数最少为 6 d,最大值和最小值相差 50 d。年雾凇日数达到 30 d 以上的有 18 a,具有丰富的雾凇资源。

(2)天山天池景区雾凇主要出现在 11 月—翌年 3 月,占年累计总数的 83.5%;冬季(12—2 月)出现次数最多,1981—2018 年雾凇冬季累计出现日数为 472 d,占年雾凇累计总数的 44.7%;春、秋季次之,夏季没有雾凇天气出现。

(3)雾凇初日主要出现在 10 月,终日主要出现在 4 月。历年最早出现在 1993 年 9 月 25 日,最晚出现在 1984 年 5 月 20 日。雾凇形成后可以持续 2 d 以上的占 70.2%。雾凇出现的起始时间在夜间的占 84%。雾凇的结束时间分布较为复杂,结束时间出现在 12—17 时的居多,占总样本的 89.1%。

(4)温度、温度露点差、相对湿度、风速、天气现象雾等气象因子对雾凇的预报有很好的指示意义。在预报有雾且小时温度在 $-4\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度露点差 $\leq 2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $>90\%$ 、风速在 $1.6\sim 3.0\text{ m/s}$ 时非常容易形成雾凇。小时温度 $-2.1\sim-3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或 $-10.1\sim-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、温度露点差 $2.1\sim 4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $90\%\sim 81\%$ 、风速 $\leq 1.5\text{ m/s}$ 时较易形成雾凇。

(5)对建立的雾凇气象等级指数进行验证,通过统计方法计算得到的天山天池雾凇气象等级指数准

确度良好,有比较高的参考使用价值,可以作为旅游气象服务业务的一项参考指标。

参考文献:

- [1] 林子伦,杨庆波,童华君,等.九仙山 2019—2020 年两次雨雾凇天气过程对比分析及可预报性评估[J].海峡科学,2021(2):11-19.
- [2] 古明悦,韦晶晶,郑凤琴,等.北部湾典型大雾过程环流特征及气象要素对比分析[J].气象研究与应用,2019,40(3):47-51,67.
- [3] 王绪翔,刘锦超,李杨.黄海冬季雾与夏季雾个例的对比研究[J].气象研究与应用,2022,43(1):96-100.
- [4] 刘伟斌.嵩山地区雨凇、雾凇的气候特征分析[J].农家参谋,2020(15):121.
- [5] 李晔,杨猛,上官大堰,等.基于物理的雾凇生长模拟算法[J].图学学报,2020,41(1):35-43.
- [6] 姜兵,景学义,高梦竹,等.哈尔滨市 2020 年 3 月 2—3 日雾凇形成的气象条件分析[J].黑龙江气象,2020,37(3):34-36.
- [7] 李文静,孙倩倩,黄蔚薇,等.1981—2010 年我国雾凇时空分布特征[J].气象灾害防御,2019,26(4):39-43.
- [8] 马旭红.吉林雾凇环境因素浅析与预报[J].资源节约与环保,2013(12):159-161.
- [9] 许剑勇,陈建春,吴永泽.黄山雾凇气候特征及旅游气象指数预报[J].中低纬山地气象,2020(44):51-55.
- [10] 丁国香,刘安平,杨彬,等.基于逐时资料的黄山雾凇特征及气象条件分析[J].气象科技,2018,46(6):1287-1290.
- [11] 周丽贤,黄蔚薇,章芳,等.平原与高山雾凇景观的旅游气象指数预报[C]//中国气象学会.第 33 届中国气象学会年会论文集.2016:12.
- [12] 王正旺,何庆林.长治市雾凇天气的分析与预报[J].山西气象,1992(4):42-44.
- [13] 寇英杰,张洁.雾凇的时空分布特征和效应研究[J].现代园艺,2021(9):21-23.
- [14] 中国气象局.地面气象观测规范[M].北京:气象出版社,2003.
- [15] 张锴,黄京平,吴文心.三青山雾凇景观资源分析与雾凇旅游指数预报[J].决策探索,2020(2):65.

Analysis on Rime Meteorological Class Index in Tianshan Tianchi

LU Jinyan¹, MA Yan¹, XIN Heping¹, MAO Weiyi²

(1.Fukang Meteorological Bureau, Fukang 831500, China;

2.Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract This paper analyzed the rime characteristics of Tianshan Tianchi by using the rime weather phenomenon data of Tianchi meteorological station during 1981–2018. The relationships between rime and meteorological elements were analyzed by using the data of hourly temperature, temperature dew point difference, relative humidity, wind and other data when the rime weather phenomenon occurred during 2004–2018. The result showed that the annual average days of rime in Tianshan Tianchi was 27.8 d, with the most in winter and the second in spring. November to March of the following year was the most frequent period of rime, and March was the most; rime started at night and ended at 12:00–17:00. Over the past 38 years, the annual rime days showed a fluctuating decreasing trend with a rate of 9.8 d/10 a, and the decreasing rate in winter was 4.4 d/10 a. The most favorable meteorological conditions for the occurrence of rime in Tianshan Tianchi was that the temperature was between -4 and -10 °C, the temperature dew point difference was ≤ 2.0 °C, the relative humidity was $>90\%$, and the wind speed was ≤ 3.0 m/s. Selecting the meteorological factors that had a greater impact on the formation of rime such as temperature, temperature dew point difference, relative humidity, two-minute average wind speed, fog, etc, established rime meteorological class index of Tianshan Tianchi and tested it in typical years. The index could be used as a reference for tourism meteorological service.

Key words rime; meteorological class; index analysis; Tianshan Tianchi