

北疆西部1986~2021年霜冻时空分布特征研究

古丽达娜·俄坦拜^{1*}, 杨明凤^{2#}, 谭月³, 吴思怡³

¹莫索湾气象站, 新疆 石河子

²乌兰乌苏农业气象试验站, 新疆 石河子

³炮台气象站, 新疆 石河子

收稿日期: 2023年1月22日; 录用日期: 2023年2月13日; 发布日期: 2023年2月24日

摘要

基于北疆西部1986~2021年近36a日最低气温数据, 使用线性回归、Mann-Kendall突变检验、空间插值等方法, 对北疆西部霜冻时空分布特征进行研究。结果表明: 北疆西部近36a初霜冻提前0.3 d/10a, 终霜冻提前0.7 d/10a, 无霜期延长5.0 d/10a; 突变检验结果显示初霜冻在1989、2012~2014年呈推迟趋势, 终霜冻在2008~2010、2011年存在突变, 无霜期在2000~2004年存在突变; 霜冻异常发生时间早晚和无霜期异常长短等级在1986~1997年期间发生频次较多。

关键词

霜冻, 时空变化

Temporal and Spatial Distribution of Frost in Western Region of Northern Xinjiang during 1986 to 2021

Gulidana-Etanbai^{1*}, Mingfeng Yang^{2#}, Yue Tan³, Siyi Wu³

¹Mosuowan Bay Weather Station, Shihezi Xinjiang

²Ulan-Ussu Agricultural Meteorological Experiment Station, Shihezi Xinjiang

³Paotai Bay Weather Station, Shihezi Xinjiang

Received: Jan. 22nd, 2023; accepted: Feb. 13th, 2023; published: Feb. 24th, 2023

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

The spatial and temporal distribution characteristics of frost in western North Xinjiang were studied based on the daily minimum temperature data for the last 36a in 1986~2021, using linear regression, Mann-Kendall mutation test and spatial interpolation. The results showed that the first frost was 0.3 d/10a earlier, the last frost was 0.7 d/10a earlier, and the frost-free period was 5.0 d/10a longer in the last 36a in western North Xinjiang. The results of the mutation test showed that the first frost was delayed in 1989 and 2012~2014, the last frost was delayed in 2008~2010 and 2011, and the frost-free period was mutated in 2000~2004; the early and late frost anomalies and frost-free period anomalies were more frequent in the period 1986~1997.

Keywords

Frost, Temporal and Spatial Variation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

霜冻是与人类生产和生活密切相关的农业气象灾害，常出现在春、秋两季农作物生长期，且霜冻的危害较大。在全球气候变暖的背景下，初、终霜冻以及无霜期皆受到影响。国外学者的研究表明：北欧、美国、加拿大过去几十年霜冻日数出现减少的趋势[1] [2] [3]。国内学者也得到相似的变化趋势，叶殿秀等众多学者的研究表明我国大多数地区具有初霜冻日期推迟，终霜冻日期提早，无霜期延长的变化趋势[4] [5] [6] [7] [8]。目前采用的气象指标主要为地面最低温度、日最低气温和日平均气温这三种，也有学者通过以上几种气象指标结合产生新指标，如桑建人等将日最低气温和地面 0 cm 地温数据结合，开展宁夏地区的霜冻研究[9]。气象指标判定霜冻发生日期，还可结合研究区域的气候特征选择适合的标准研究霜冻发生时间的早晚和持续时间的长短，减少霜冻异常发生时间会对农业生产造成严重危害。

北疆西部位于新疆，准噶尔盆地的西侧，地理位置优越，适合种植水果、粮食、经济作物及发展畜牧业[10] [11]，这些作物易受霜冻影响，对该地区造成较大的经济损失。如 2008 年，北疆产区的酿酒葡萄由于霜冻减产约 8 万吨，损失将近 1.6 亿元，2009 年，由于霜冻使新疆博乐的鲜食葡萄减产 50%，对棉花、加工番茄和瓜果蔬菜等造成危害[12]。2014 年 10 月 8 至 9 日伊犁州发生霜冻，导致伊犁州葡萄种植基地受到损失，葡萄种植总面积 11.67 万亩，受灾就达 6 万亩，损失将近 3 亿元。由此可见在全球变暖背景下[12]，虽然众多地区出现霜冻减弱的趋势，但在北疆西部霜冻仍是影响农业的主要气象灾害之一，为防御霜冻造成重大损失，有必要开展北疆西部霜冻时空变化特征的研究。

2. 资料与方法

2.1. 资料

使用的站点及数据资料选取范围为 1986~2021 年北疆西部 11 个气象站的 36 年日最低气温数据[4] [9] [13] [14] [15] [16]。以北疆西部作为研究区域，该研究区域气候类型多样，地形地貌较复杂，有高山、山

间平原盆地、河谷地等类型，为了排除站点间海拔差距过大的影响，使用海拔差距比较平均的站点进行分析。研究区域及气象站点分布情况如图 1。

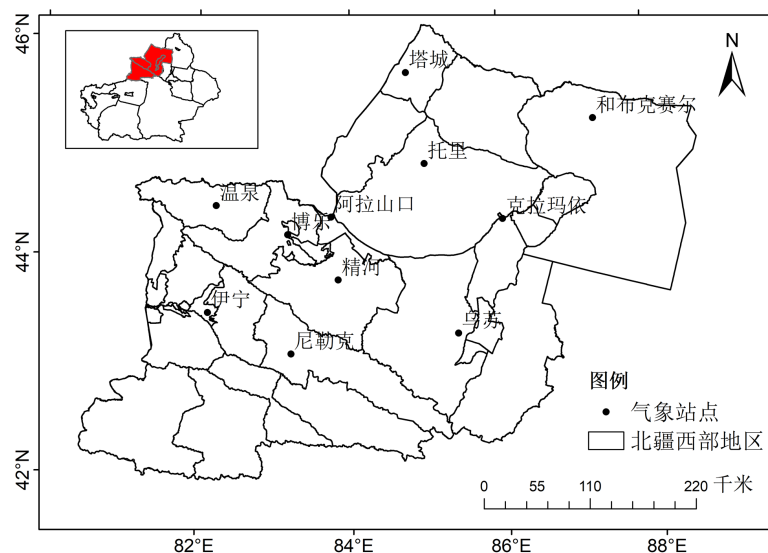


Figure 1. Study area site distribution (review map number GS (2016) 2556))

图 1. 研究区域站点分布(审图号 GS (2016) 2556 号)

2.2. 研究方法

2.2.1. 线性回归分析

以线性回归方程分析初、终霜冻及无霜期近 36a 的变化趋势，判断气候序列的趋势变化及其显著性。用北疆西部近 36a 平均初霜冻、终霜冻日序，平均无霜期天数与对应时间建立方程 $y = b_0 + bt_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$)，分析气候序列的趋势。

2.2.2. Mann-Kendall 突变检验法

使用 Mann-Kendall 突变检验方法对气候序列进行突变检验，判断北疆西部近 36a 初、终霜冻及无霜期是否存在突变、突变开始时间以及突变区域。根据时间序列的上升或下降趋势来判断该时间序列的变化趋势[17]。

2.2.3. 霜冻异常发生时间早晚和无霜期异常长短等级

陈乾金、张旭辉等人认为霜冻同大气温度一样具有正态分布特征，判断霜冻异常发生时间和异常持续时间时，认为小于 0.05 和大于 0.95 的概率范围发生特早初霜冻、特晚终霜冻、极长、极短无霜期，在 0.05~0.11、0.89~0.95 的概率范围发生偏早初霜冻、偏晚终霜冻、偏长、偏短无霜期[18] [19] [20]。

3. 结果与分析

3.1. 霜冻的时间变化特征

3.1.1. 初霜冻时间变化特征

北疆西部初霜冻年际变化如图 2，初霜冻以 0.3 d/10a 的速率提早。1986~1997、1998~2009、2010~2021 年的年代际特征较显著，呈先增加后下降的趋势。各站点的气候倾向率相比较，和布克赛尔气候倾向率最大，尼勒克气候倾向率最小，大部分站点为推迟趋势，除尼勒克、博乐、温泉、阿拉山口，分别以 0.0、

0.2、6.8、8.4 d/10a 的速率提前(表 1)，据分析以上站点海拔高度相对较高，可考虑因地理位置因素呈现不同的局地变化趋势[15] [21]。

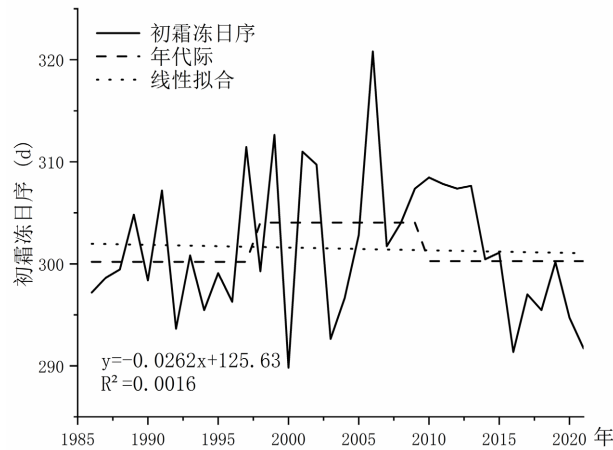


Figure 2. Map of interannual variation in first frosts in the western part of the Northern Territory
图 2. 北疆西部初霜冻年际变化图

Table 1. Climatic propensity to first frost (d/10a) at stations in western Northland
表 1. 北疆西部各站点初霜冻气候倾向率(d/10a)

站点	伊宁	尼勒克	阿拉山口	博乐	温泉	精河	塔城	和布克赛尔	托里	乌苏	克拉玛依
气候倾向率	3.1	-0.0	2.1	-0.2	-6.8	1.8	1.2	-8.4	0.8	1.7	1.9

3.1.2. 终霜冻的时间变化特征

北疆西部终霜冻年际变化如图 3，终霜冻以 0.7 d/10a 的速率提前。1986~1997、1998~2009、2010~2021 年的年代际特征明显，呈逐渐下降的趋势。各站点的气候倾向率相比较，尼勒克、温泉、托里的气候倾向率较大，终霜冻提前的趋势更明显，和布克赛尔和克拉玛依的气候倾向率最小，提前的趋势较弱(表 2)。局地影响变化趋势的可能性较大[14] [22]。

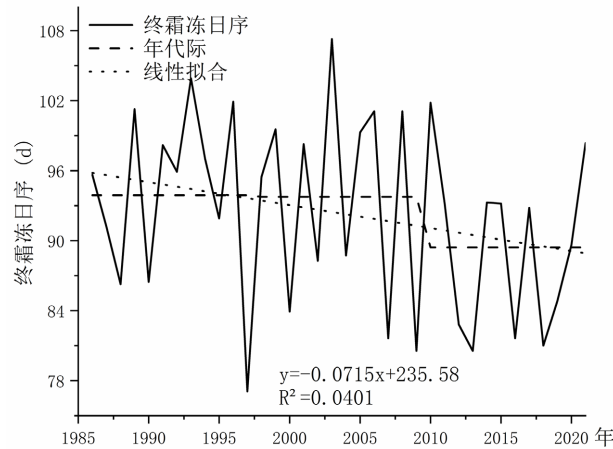


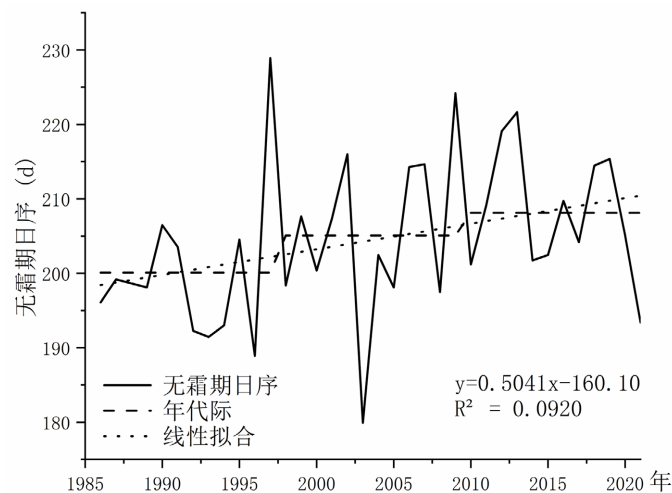
Figure 3. Map of inter-annual variation of terminal frost in the western part of the Northern Territory
图 3. 北疆西部终霜冻年际变化图

Table 2. Climatic propensity for terminal frost (d/10a) at stations in western Northland**表 2.** 北疆西部各站点终霜冻气候倾向率(d/10a)

站点	伊宁	尼勒克	阿拉山口	博乐	温泉	精河	塔城	和布克赛尔	托里	乌苏	克拉玛依
气候倾向率	-1.8	-2.5	-1.4	-1.7	-4.2	-2.1	-1.6	-0.7	-3.5	-1.3	-0.9

3.1.3. 无霜期的时间变化特征

北疆西部无霜期年际变化如图 4，无霜期以 5.0 d/10a 的速率延长。1986~1997、1998~2009、2010~2021 年的年代际特征明显，呈阶段性增加的趋势。各站点的气候倾向率相比较，伊宁、温泉、托里的气候倾向率最大，无霜期延长趋势显著，博乐气候倾向率最小，每 10 年延长 1.5 d (表 3)。

**Figure 4.** Map of interannual variation in frost-free periods in the western part of the Northern Territory**图 4.** 北疆西部无霜期年际变化图**Table 3.** Frost-free climatic propensity of stations in the western part of the Northern Territory (d/10a)**表 3.** 北疆西部各站点无霜期气候倾向率(d/10a)

站点	伊宁	尼勒克	阿拉山口	博乐	温泉	精河	塔城	和布克赛尔	托里	乌苏	克拉玛依
气候倾向率	4.9	2.5	3.5	1.5	4.3	5.2	2.7	3.2	4.7	2.2	2.8

3.2. 霜冻的突变分析

3.2.1. 初霜冻的突变分析

北疆西部初霜冻无明显突变，整体曲线呈小幅度波动上升。1989、2012~2014 年呈显著增长趋势，说明该时期初霜冻推迟，2020 年后呈下降趋势(图 5)。

3.2.2. 终霜冻的突变分析

北疆西部终霜冻在 2008~2010、2011 年发生突变。1990 年后曲线呈上升趋势，2014~2021 年呈下降趋势，说明 1986~1990 年、2014 年后终霜冻呈提前趋势(图 6)。

3.2.3. 无霜期的突变分析

北疆西部无霜期在 2000~2004 年发生突变。1993~1998 年曲线呈下降趋势，该阶段无霜期呈缩短趋势，其他阶段呈上升趋势，2012 年~2021 年达到 0.05 的显著水平，该时期无霜期显著增加(图 7)。

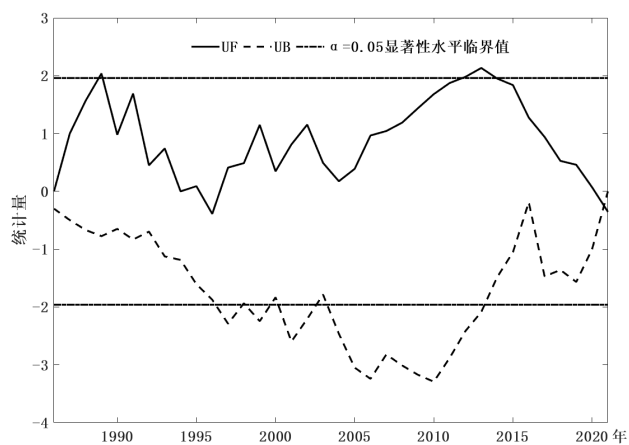


Figure 5. M-K mutation test map for early frosts in western Northern Territory

图 5. 北疆西部初霜冻的 M-K 突变检验图

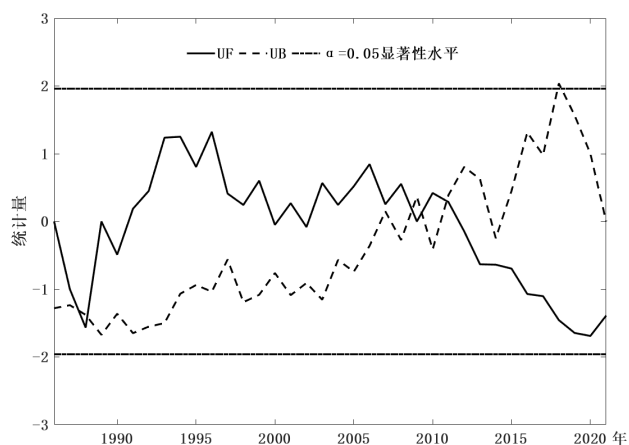


Figure 6. M-K mutation test map for terminal frost in the western part of the Northern Territory

图 6. 北疆西部终霜冻的 M-K 突变检验图

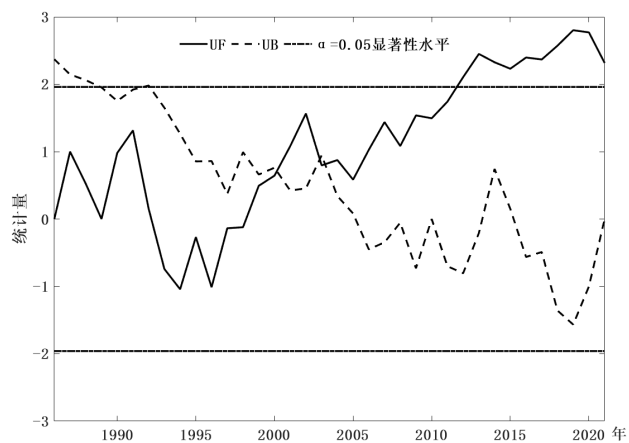


Figure 7. M-K mutation test map for frost-free periods in the western part of the Northern Territory

图 7. 北疆西部无霜期的 M-K 突变检验图

3.3. 霜冻的时空变化特征

3.3.1. 初霜冻的空间分布特征

图 8 是北疆西部初霜冻空间分布图，西北部、南部发生日期较早，西部、东北部发生日期较晚。最早发生日期为 10 月上旬，最晚发生日期为 11 月上旬。空间上未明显表现出北方小于南方，东部小于西部的趋势[4] [22]，局地变化趋势较明显。

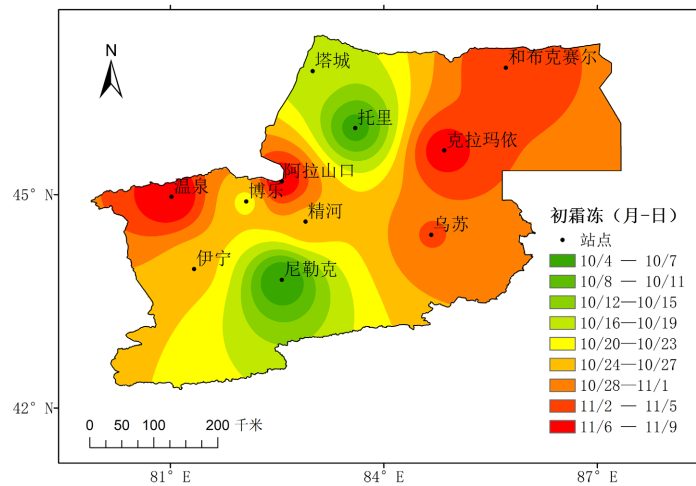


Figure 8. Spatial distribution of first frosts in the western part of the Northern Territory

图 8. 北疆西部初霜冻空间分布图

3.3.2. 终霜冻的空间分布特征

图 9 是北疆西部终霜冻空间分布图，中部、东部、南部地区发生日期较早，位于 3 月下旬，东北、西部地区发生日期最晚，位于 4 月下旬。东部小于西部的趋势较明显，北方小于南方的趋势较微弱[4] [22]，随纬度的增加发生日期较晚[19]，局地变化趋势更明显。

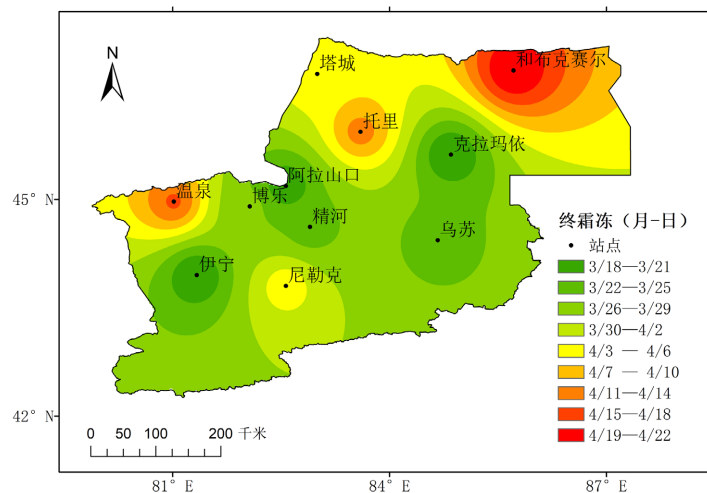


Figure 9. Spatial distribution of terminal frosts in the western part of the Northern Territory

图 9. 北疆西部终霜冻空间分布图

3.3.3. 无霜期的空间分布特征

图 10 是北疆西部无霜期空间分布图，西部、东北部无霜期天数较少，为 170~177 d，中部地区无霜期天数较多，其中克拉玛依是无霜期最长的地方，是 221~226 d。随纬度增加无霜期天数有延长的趋势，局地趋势更明显。

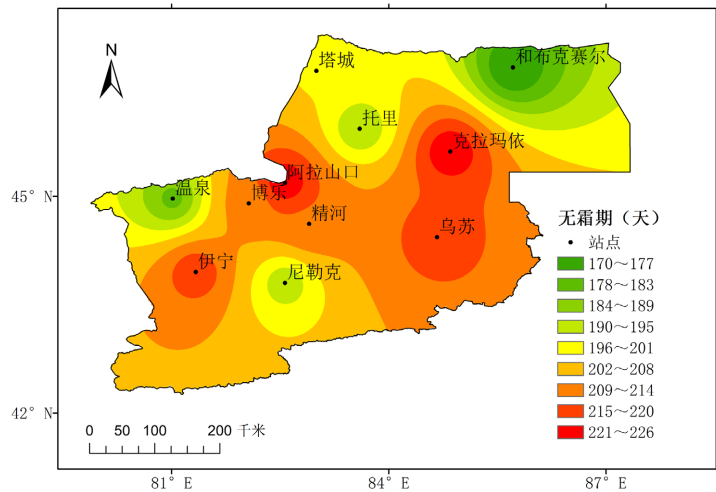


Figure 10. Spatial distribution of frost-free periods in the western part of the Northern Territory
图 10. 北疆西部无霜期空间分布图

3.4. 霜冻发生时间等级特征

3.4.1. 初霜冻发生时间提早等级特征

根据陈乾金等人对初霜冻异常发生时间的划分标准[20] [23] [24] [25] [26]，初霜冻划分结果如表 4，特早初霜冻的发生频次为 0~7 次，其中温泉发生频次最多，2010~2021 年发生的概率达 55%；偏早初霜冻的发生频次为 1~9 次，其中阿拉山口发生频次最多，1986~1997 年发生的概率达 51%。

Table 4. Early and delayed onset of first and last frosts in the western part of the northern border (frequency)
表 4. 北疆西部初、终霜冻发生时间提早、推迟等级(频次)

	伊宁	尼勒克	阿拉山口	博乐	温泉	精河	塔城	和布克赛尔	托里	乌苏	克拉玛依
特早初霜冻	0	1	1	3	7	1	1	4	0	3	1
偏早初霜冻	6	7	9	2	4	4	7	1	7	2	6
特晚终霜冻	2	3	1	1	2	1	1	0	2	2	2
偏晚终霜冻	5	4	6	6	3	5	3	3	3	4	4

3.4.2. 终霜冻发生时间推迟等级特征

终霜冻发生时间推迟，对粮食和经济作物造成的危害最严重。终霜冻划分结果如表 4 (见上表)，特晚终霜冻发生频次为 0~3 次，其中尼勒克发生频次最多，1998~2009 年发生的概率达 47%；偏晚终霜冻发生频次为 3~6 次，其中阿拉山口、博乐发生频次最多，1986~1997 年发生的概率达 43%。

3.4.3. 无霜期发生时间长短等级特征

无霜期发生时间长短的划分结果如表 5，各站点极长、偏长、偏短、极短无霜期发生频次为 1~4、2~8、

0~4、1~7 次。极长无霜期在 2010~2021 年发生的概率达 64%，偏长无霜期在 1998~2009 年发生的概率达 51%，极短无霜期在 1998~2009 年发生的概率达 44%，偏短无霜期在 1986~1997 年发生的概率达 52%。

Table 5. Length of frost-free period occurrence rating (frequency) in the western part of the Northern Territory

表 5. 北疆西部无霜期发生时间长短等级(频次)

	伊宁	尼勒克	阿拉山口	博乐	温泉	精河	塔城	和布克赛尔	托里	乌苏	克拉玛依
极长	3	3	3	1	1	1	2	4	2	1	1
偏长	4	3	3	4	5	8	4	2	2	5	5
极短	2	3	3	2	3	1	2	0	3	2	4
偏短	1	3	1	4	4	3	4	7	3	2	1

4. 结论

本文通过分析 1986~2021 年北疆西部 11 个气象观测站的日最低气温数据，获得初、终霜冻及无霜期时空变化特征，结论如下：

1) 北疆西部初霜冻提早 0.3 d/10a，无明显突变，1989、2012~2014 年初霜冻呈现推迟趋势；终霜冻提早 0.7 d/10a，2008~2010、2011 年存在突变，1986~1990 年、2014 年终霜冻呈提前趋势；无霜期延长 5.0 d/10a，2000~2004 年存在突变，2012 年后呈显著增加；整体的霜冻变化趋势除初霜冻外，与国内学者研究结论一致。

2) 空间分布上，初霜冻局地变化较明显；终霜冻呈东部小于西部的趋势，北方小于南方的趋势不明显；无霜期有随纬度增加而减少的趋势。基于地理位置因素对初、终霜冻和无霜期产生的局地差异，可在该研究方法上结合更多海拔高度等地理因素进行拓展分析。

3) 北疆西部特早、偏早初霜冻的发生频次为 0~7、1~9 次；特晚、偏晚终霜冻发生频次为 0~3、3~6 次；极长、偏长、偏短、极短无霜期的发生频次为 1~4、2~8、0~4、1~7 次，1986~1997 年期间以上各等级发生频次相对较多。

基金项目

新疆维吾尔自治区自然科学基金：基于多参数的棉花干旱胁迫光谱诊断模型研究(2021D01B13)。

参考文献

- [1] Heino, R., Brázdil, R., Førland, E., Tuomenvirta, H., Alexandersson, H., Beniston, M., Pfister, C., Rebetez, M., Rosenhagen, G., Rösner, S. and Wibig, J. (1999) Progress in the Study of Climatic Extremes in Northern and Central Europe. *Climatic Change*, **42**, 151-181. <https://doi.org/10.1023/A:1005420400462>
- [2] Easterling, D.R. (2002) Recent Changes in Frost Days and Frost-Free Season in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 1327-1332. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.9.1327>
- [3] Bonsal, B.R., Zhang, X., Vincent, L.A. and Hogg, W.D. (2001) Characteristics of Daily and Extreme Temperatures over Canada. *Journal of Climate*, **14**, 1959-1976. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1959:CODAET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2)
- [4] 叶殿秀, 张勇. 1961-2007 年我国霜冻变化特征[J]. 应用气象学报, 2008, 19(6): 661-665.
- [5] 唐帅, 孟振雄, 邸秀秀, 于亚薇, 周丽娜. 1964-2013 年葫芦岛地区霜冻气候特征分析[J]. 农技服务, 2015, 32(9): 119-120.
- [6] 胡玲, 李凤霞, 周秉荣, 徐维新, 王力, 李晓东. 青海高原主要农业区 50 年初、终霜冻日变化分析及分布规律[J]. 青海气象, 2012(2): 36-37.
- [7] 唐晶, 张文煜, 赵光平, 白庆梅, 王建英, 张智. 宁夏近 44a 霜冻的气候变化特征[J]. 干旱气象, 2007, 25(3): 39-43.
- [8] 张山清, 普宗朝, 李景林, 徐文修, 王命全, 赵书琴. 气候变暖背景下新疆无霜期时空变化分析[J]. 资源科学,

- 2013, 35(9): 1908-1916.
- [9] 桑建人, 舒志亮, 邱旺. 近 44a 宁夏霜冻特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(12): 97-102.
- [10] 郑博华, 李斌, 黄秋霞, 李如琦, 赵克明. 新疆伊犁河谷冷暖季降水时空分布特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(3): 80-87.
- [11] 井立红, 高婧, 周斌, 杨国辉, 陈瑶, 井立军. 1960~2018 年塔城地区霜冻天气变化特征[J]. 气候变化研究快报, 2019, 8(5): 602-609.
- [12] 陈武. 2008 年新疆北疆地区终霜冻对酿酒葡萄的影响[D]: [硕士学位论文]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- [13] 国家科学技术委员会, 编. 中国科学技术蓝皮书第 5 号: 气候[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1990.
- [14] Erlat, E. and Türkeş, M. (2011) Analysis of Observed Variability and Trends in Numbers of Frost Days in Turkey for the Season 1950-2010. *International Journal of Climatology*, **11**, 1889-1898. <https://doi.org/10.1002/joc.2403>
- [15] 胡桂杰, 于栋阁, 王雨婷, 李超, 王利平. 近 55a 赤峰地区霜冻的时空分布及其异常性、影响分析评估[J]. 黑龙江气象, 2016, 33(4): 21-23.
- [16] 郑玉萍, 宫恒瑞, 曹兴, 蒲洁. 近 53a 乌鲁木齐农区霜冻变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(1): 52-57.
- [17] 马琼. 1980-2014 年黄土高原霜冻时空变化及冬小麦晚霜冻危险性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2016.
- [18] 林良勋, 薛登智, 梁健, 吕晋文, 毛绍荣. 近二十年广东的霜冻气候及其变化特征[J]. 广东气象, 2000(4): 7-9.
- [19] 李芬, 张建新, 武永利, 周晋红, 程艳芳. 近 50 年山西终霜冻的时空分布及其影响因素[J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1472-1480.
- [20] 陈乾金, 夏洪星, 张永山. 我国江淮流域近 40 年异常初终霜冻的分析[J]. 应用气象学报, 1995, 6(1): 50-55.
- [21] 张旭晖, 居为民, 霍金兰, 杨建全, 谢小萍. 江苏省近 48 年无霜期时空演变特征[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 454-457.
- [22] 王炳赞, 范广洲, 魏鸣, 华维, 赵衍斌. 横断山脉地区霜冻时空分布变化特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2014, 34(2): 17-21.
- [23] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 秦耀辰. 1951 年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1811-1822.
- [24] 韩荣青, 贾小龙. QX/T456-2018 初霜冻期早晚等级[S]. 北京: 中国气象局, 2018.
- [25] 张霞, 钱锦霞. 气候变暖背景下太原市霜冻发生特征及其对农业的影响[J]. 中国农业气象, 2010, 31(1): 111-114.
- [26] 韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻期变化及其对农业的影响[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 525-532.