

# 伊犁河谷东段复杂地形下的温度与降水差异研究

姜彩莲<sup>1</sup>, 李 娜<sup>2\*</sup>, 刘 勇<sup>3</sup>, 石江花<sup>1</sup>, 白煦謙<sup>1</sup>

<sup>1</sup>兵团第六师气象局, 新疆 五家渠

<sup>2</sup>新疆维吾尔自治区气象台, 新疆 乌鲁木齐

<sup>3</sup>新疆尼勒克县气象局, 新疆 尼勒克

收稿日期: 2025年12月6日; 录用日期: 2026年1月7日; 发布日期: 2026年1月15日

## 摘要

本文基于2021年9月1日至2022年8月31日新源国家气象站与伊犁野果林自动气象站的逐小时气温和降水观测数据, 分析了伊犁河谷东段地形气象要素的时空分布特征, 重点探讨了地形和海拔对局地气候的影响。结果表明: (1) 新源站大陆性气候显著, 夏季高温突出、年温差与日较差大; 野果林站受山地逆温影响, 冬季气温较高, 气候更为稳定, 日较差小。(2) 野果林站年降水量大、降水强度高、极端性强, 呈典型山地降水特征, 峰值多见于凌晨至上午; 新源站降水强度弱、分布均匀, 更多受午后热对流影响。(3) 地形与海拔是导致两站气候差异的主导因子。野果林站地处迎风坡, 地形抬升增雨效应显著; 新源站地势平坦, 降水机制以热对流为主。两地气候变化趋势一致, 但地形加剧了局地气候分异。本研究揭示了小尺度地形对局地气候的显著影响, 对新疆区域农业生产、生态保护和防灾减灾具有重要参考价值。

## 关键词

伊犁, 温度, 降水, 地形, 海拔

# A Study on Temperature and Precipitation Differences under Complex Topography in the Eastern Ili Valley

Cailian Jiang<sup>1</sup>, Na Li<sup>2\*</sup>, Yong Liu<sup>3</sup>, Jianghua Shi<sup>1</sup>, Yunxuan Bai<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Meteorological Bureau of the Sixth Division of the Production and Construction Corps, Wujiaqu Xinjiang

<sup>2</sup>Xinjiang Weather Observatory, Urumqi Xinjiang

<sup>3</sup>Meteorological Bureau of Nilka County, Nilka Xinjiang

\*通讯作者。

Received: December 6, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 15, 2026

## Abstract

Based on hourly temperature and precipitation observation data from the Xinyuan National Meteorological Station and the Yili Wild Fruit Forest Automatic Weather Station from September 1, 2021, to August 31, 2022, this study analyzes the spatiotemporal distribution characteristics of meteorological elements in the eastern section of the Ili River Valley, with a focus on the influence of topography and elevation on the local climate. The results indicate that: (1) Xinyuan Station exhibits significant continental climate features, with prominent high summer temperatures, large annual temperature range, and considerable diurnal temperature variation; influenced by mountain temperature inversion, the Wild Fruit Forest Station experiences relatively higher winter temperatures, greater climatic stability, and smaller diurnal temperature variation. (2) The Wild Fruit Forest Station has higher annual precipitation, greater precipitation intensity, and stronger extremes, showing typical mountain precipitation characteristics, with peaks mostly occurring from early morning to noon; Xinyuan Station has weaker precipitation intensity and more uniform distribution, primarily influenced by afternoon thermal convection. (3) Topography and elevation are the dominant factors causing climatic differences between the two stations. The Wild Fruit Forest Station, located on the windward slope, shows significant terrain uplift and rainfall enhancement effects; with relatively flat terrain, Xinyuan Station has a precipitation mechanism mainly driven by thermal convection. Although the climatic trends at both sites are consistent, topography exacerbates local climate differentiation. This study reveals the significant impact of small-scale topography on local climate, providing important reference value for agricultural production, ecological protection, and disaster prevention and mitigation in the Xinjiang region.

## Keywords

Ili, Temperature, Precipitation, Topography, Elevation

Copyright © 2026 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

地形作为影响气候的关键因子，其导致的局地气候差别一直是气象学、地理学及生态学研究的热点问题。国内外学者围绕地形对温度、降水等气象要素的再分配作用开展了大量研究。研究表明，海拔高度是决定温度空间分布的首要地形因子，除了气温直减率，地形对降水的影响更为复杂[1]。山脉的迎风坡因气流抬升产生的“增雨效应”和背风坡的“雨影效应”是造成降水空间分布极度不均的主要原因[2]。此外，山地地形还能通过触发或组织中小尺度对流系统，影响降水的日变化相位和极端性[3]。

国内复杂的多山地形为相关研究提供了丰富的案例，如青藏高原[4]、秦岭[5]、太行山[6]、黄土高原[7]、祁连山[8]，相关研究系统揭示了地形引起的降水差异、逆温现象等规律及其对区域水热格局的控制作用。

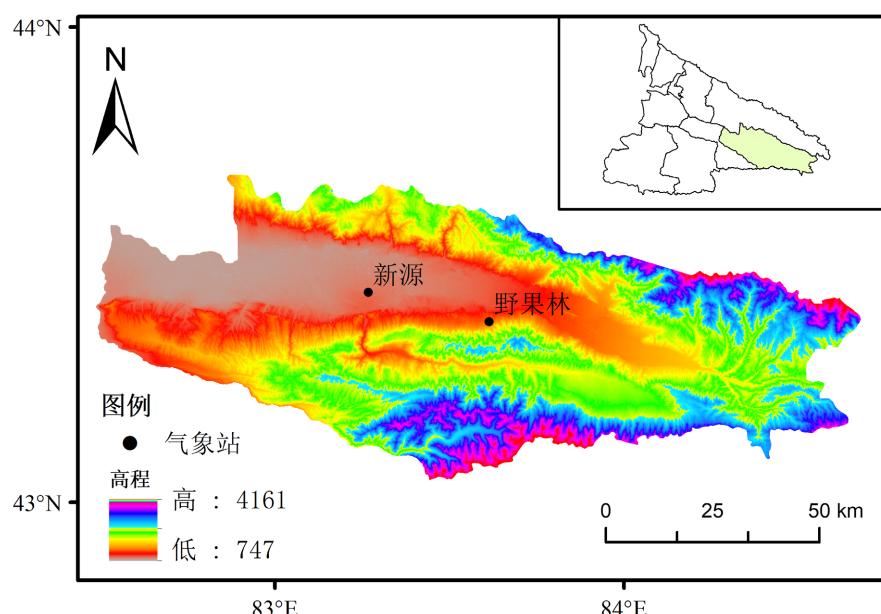
伊犁河谷位于新疆维吾尔自治区天山山脉西段，地形复杂，总体呈东高西低格局，导致其东段与西段存在显著的气候差异。众多学者已从不同角度揭示了该区域的气候变化背景与特征。研究表明，在全球气候变化背景下，伊犁河谷乃至整个新疆地区呈现出显著的“增温增湿”趋势[9]-[14]。另外，利用长

时序数据分析了该地区气温和降水的水汽来源[15]-[17]、时空变化规律[18][19]、极端气候事件的变化特征及其与大气环流的关系[20]-[22]，为理解区域气候提供了坚实的宏观背景。

以上研究多集中于长时间序列和大范围空间尺度的分析，对短时序、小尺度地形引发的精细气候分异关注较少，尤其在相距甚近但海拔和下垫面不同的站点之间的对比实证研究方面较为缺乏。本文在前人工作基础上，选取水平距离仅 29.3 km 但海拔高差约 411 m 的新源国家气象站与伊犁野果林自动气象站进行对比分析，旨在弥补以往大尺度研究的不足。通过高时间分辨率观测数据，精细揭示伊犁河谷东段复杂地形对局地温度、降水的具体影响机制，从而为理解该区域复杂的气候系统提供新的、更细致的科学证据。

### 1.1. 研究区概况

新源县位于伊犁河谷东部，三面环山，地势东高西低，属温带大陆性气候区，四季分明。受西来湿润气流影响，气候冬暖夏凉。新源国家气象站(83.26°E, 43.45°N, 海拔 928.3 m)位于县城附近，下垫面为天然草地。伊犁野果林自动气象站(83.61°E, 43.39°N, 海拔 1340 m)地处伊犁河谷南部界山的浅山区，下垫面为低矮的灌木和茂密的草本植物，海拔较高。两站地貌差异显著，为研究地形对局地小气候的影响提供了理想场所。伊犁河谷东部地形及自动站分布如图 1 所示。



**Figure 1.** The topography and meteorological stations in the eastern Ili valley area  
**图 1.** 伊犁河谷东部地形及自动站分布

### 1.2. 资料来源及分析方法

本研究数据来源于新疆维吾尔自治区气象局提供的新源国家气象站与伊犁野果林自动气象站 2021 年 9 月 1 日至 2022 年 8 月 31 日的逐小时气温和降水观测资料。该资料经过范围检查、内部一致性以及时空一致性等质控，连续性较好，可信度较高。分析中季节采用春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12~翌年 2 月)划分标准。文中的降水日数是指日降水量  $\geq 0.1 \text{ mm}$  的降水总日数。对两站的逐日最高、最低气温以及逐小时、逐月降水量开展对比分析，以揭示其时空分布特征及差异。本文所用时间为北京时间(BJT)。

## 2. 结果与分析

### 2.1. 温度变化特征

分析表明，两地温度变化和日较差均存在明显差异。野果林站受冷空气侵袭影响较小，日较差相对较小；而新源站地形开阔，日较差更大。

由表1可见，野果林站夏季平均最高温度 $25.6^{\circ}\text{C}$ ，冬季仅 $3.2^{\circ}\text{C}$ 。新源站夏季 $28.8^{\circ}\text{C}$ ，冬季 $3.3^{\circ}\text{C}$ 。野果林站与新源站四季温度变化趋势基本一致，均呈现夏季最高、冬季最低、春秋过渡的特点。但新源站各季节温度普遍略高于野果林站，尤其夏季，平均最高温度高出 $3.2^{\circ}\text{C}$ ，冬季最低温度则低 $2.4^{\circ}\text{C}$ ，表明新源站年温差更大。两站秋季平均温度完全相同(均为 $8.6^{\circ}\text{C}$ )，春季和冬季平均温度差异较小，说明两地气候在过渡季节较为接近。

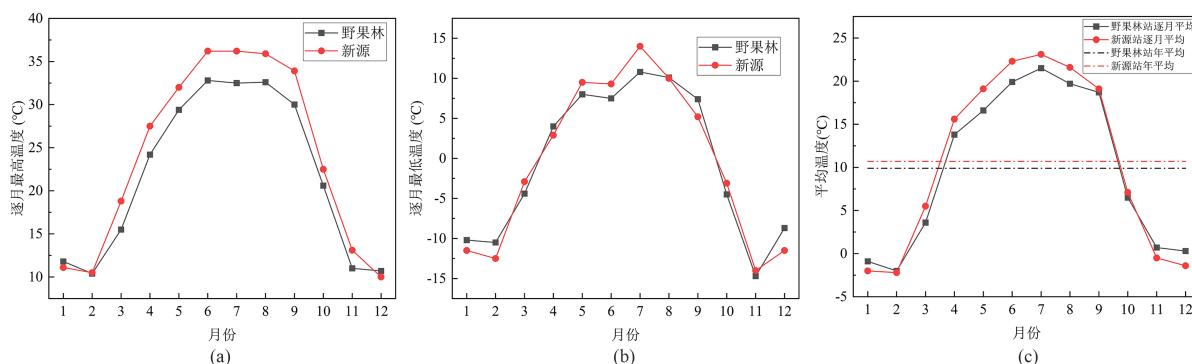
**Table 1.** Seasonal average maximum, average minimum, and average temperature between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological stations (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

**表 1.** 新源和野果林站季节平均最高、平均最低温度，季节平均温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

	野果林站				新源站			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
平均最高温度	15.9	25.6	13.8	3.2	18.6	28.8	15.3	3.3
平均最低温度	7.6	15.9	4.8	-3.6	8.2	16.1	2.8	-6.0
季平均温度	11.4	20.4	8.6	-0.8	13.4	22.3	8.6	-1.9

从月际气温变化看，野果林站各月的平均温度均高于新源站，两站各月的温差(野果林 - 新源)均为负值，表明野果林站整体上较冷。两站温度的季节性变化趋势高度一致，均在夏季达到峰值，冬季降至低谷。温度差异在一年中并非恒定，春季和夏季的温差较大，尤其是在5~6月差异最为明显；而秋季和冬季的温差则相对较小。从全年的稳定性来看，野果林站温度的标准差(9.3)小于新源站(10.5)，说明野果林站的气温年际波动相对更小，气候更为稳定。两站年平均气温接近。10~翌年2月野果林温度较高，3~10月温度相对较低(图2(a), 图2(b))。

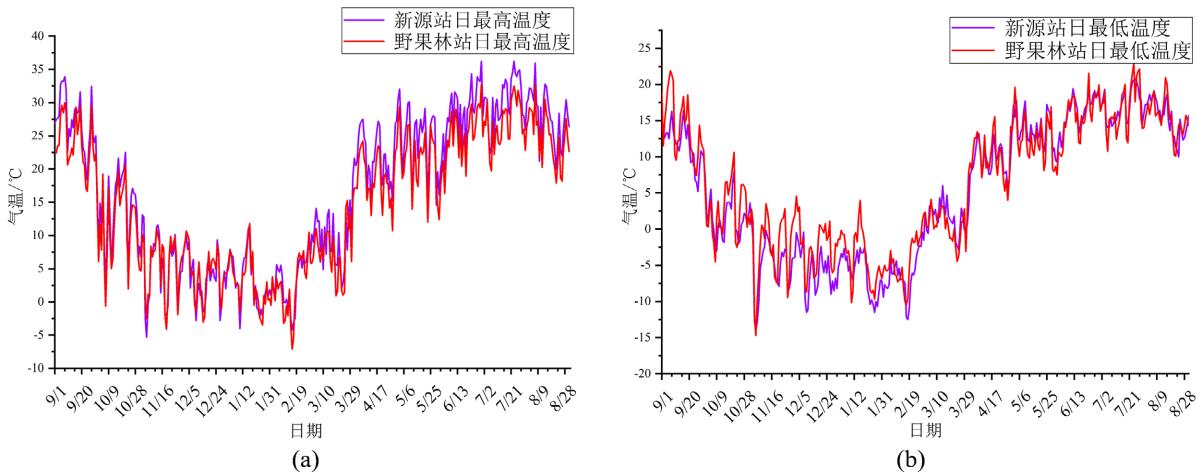
从两站的最高和最低月温度看，新源站的极端温度更为显著，其最高温度在全年中有9个月高于野果林站，尤其在6~7月均达到 $36.2^{\circ}\text{C}$ ，显著高于野果林站；而其冬季最低温度也更低。这说明新源站的年温差更大，大陆性气候特征更为明显。野果林站冬季最低温度在多数月份高于新源站，温度则相对温和(图2(c))。



**Figure 2.** Monthly maximum, minimum and average temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological Stations

**图 2.** 新源和野果林站逐月最高(a)、最低(b)和平均气温(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

在大部分时间里，野果林站的日最高温度和日最低温度都略高于新源站。这种差异在冬季尤为明显，野果林站的最低温度比新源站高约 $5^{\circ}\text{C}$ ~ $10^{\circ}\text{C}$ ，而在夏季，两站之间的温差相对较小。从日较差的趋势看，新源站温差较大，最高达 $12^{\circ}\text{C}$ ~ $15^{\circ}\text{C}$ ，野果林站温差相对较小(图3)。



**Figure 3.** (a) Daily maximum temperature (b) Daily minimum temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological Stations

**图3.** 新源和野果林站, (a) 逐日最高温度, (b) 逐日最低温度(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

从以上分析可知，新源站与野果林站因地形与海拔差异，呈现出显著的温度特征对比。新源站海拔较低，夏季极端高温更显著，日较差大；野果林站受山地地形影响，冬季存在明显逆温现象，因此冬季气温略高于新源站，低温频率更高，且日较差较小。两站夏季高温均集中于7~8月，冬季低温则较为接近；秋季新源站降温更快，而春季气温波动频繁。总体而言，地形导致的辐射差异和逆温效应是造成两站温度差异的主要原因。

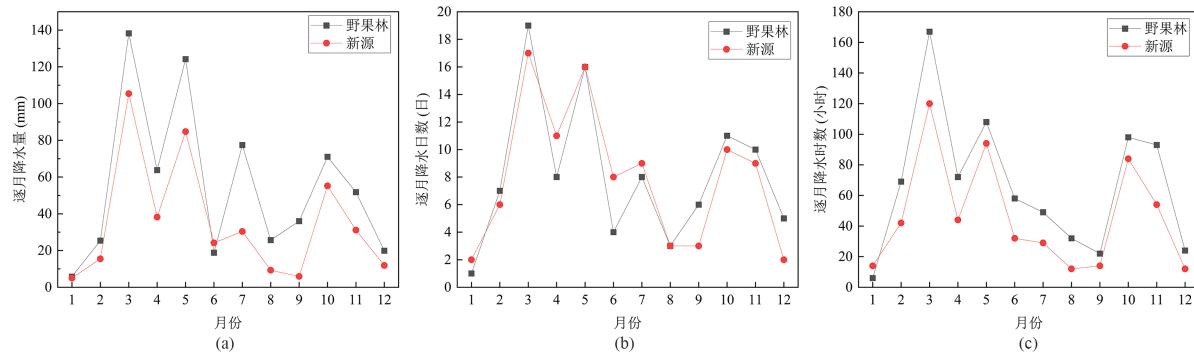
## 2.2. 降水变化

从两站逐月和年累计降水量可以看出，野果林站的年降水量(657.9 mm)高于新源站(416.8 mm)约240 mm，整体更为湿润。从季节降水分析，两站均呈现出明显的春季和秋季降水集中的特点，而夏季降水相对较少。野果林站在其春季和秋季峰值均远高于新源站，这是造成年降水量差异的主要原因。两站在冬季和夏季的降水量均处于全年较低水平，但野果林站的降水量在绝大多数月份仍高于新源站。这表明，地形对降水的增强效应在雨季更为显著，野果林站于伊犁河谷山地的迎风坡，水汽受力抬升，造成其降水量随着海拔升高而逐渐增大，从而放大了两站之间的降水差异。

野果林站与新源站的年总降水日数非常接近，但两站的降水日数在年内分配上存在显著差异。野果林站的降水日数主要集中在春季，其中3月为19天，达到全年峰值，其次为5月16天，这与其降水量集中的季节完全吻合，表明春季多持续性降水。相比之下，新源站的降水日数分布则相对均匀，其在夏季6~7月的降水日数甚至超过野果林站同期，表明新源站的夏季降水频率更高。此外，野果林站在秋季的降水日数也明显多于新源站。综合两站的年降水量，可以看出野果林站在降水日数与新源站基本相同的情况下，产生了更多的降水量，其降水强度远大于新源站，这可能是由于其山地地形更易触发强降水过程；而新源站的降水则表现出频率稍高但强度较弱的特征(图4(a)，图4(b))。

两站各月降水时数也可以看出野果林站的年总降水时数(798小时)显著多于新源站(551小时)，其在春季和秋季降水时数，这与其降水量和降水日数的峰值季节完全吻合。两站在1月和9月的降水时数差

距最小，但新源站产生的降水量却相对较少，说明其降水过程更为和缓、强度较弱(图 4(c))。



**Figure 4.** Comparison of (a) monthly precipitation (unit: mm), (b) monthly precipitation days (unit: day) and monthly precipitation duration (unit: hour) between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological stations

**图 4.** 新源和野果林站逐月，(a) 降水量(单位: mm)，(b) 降水日数(单位: 日)和(c) 降水时数(单位: 小时)对比

野果林站的极端降水强度显著高于新源站，每月单日最大降水量值均大于新源站，在春季和秋季尤为突出。这表明野果林站发生强降水事件的能力和频次远高于新源站。此外，两站多次在 1 月 19 日、4 月 9 日、6 月 24 日同一天出现日降水极值，表明大范围的天气系统是两站降水的主要共同触发机制。但野果林站的地形对降水起到了巨大的增强作用，使得同样的天气系统能在该站产生强度大得多的降水(表 2)。

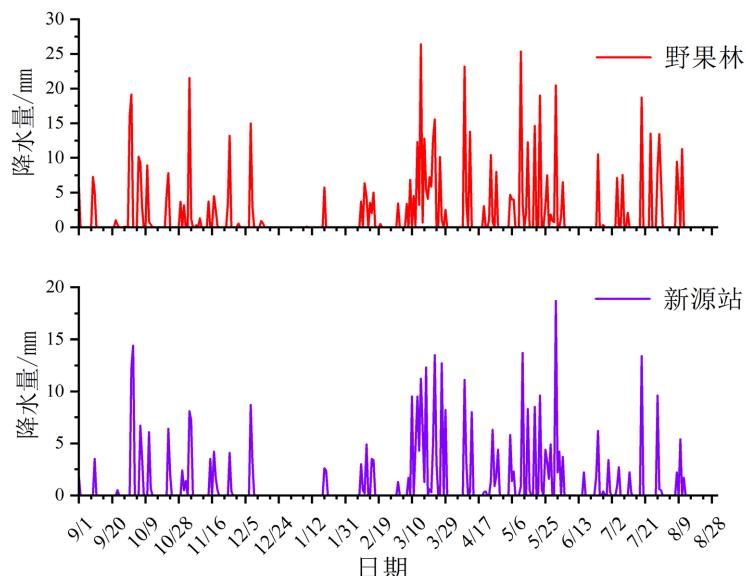
**Table 2.** Monthly maximum daily and hourly precipitation between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological Stations  
**表 2.** 新源和野果林站逐月最高日、小时降水量对比

月份	野果林站				新源站			
	日期	最大日降水 (mm)	时段	最大小时雨强 (mm/h)	日期	最大日降水 (mm)	时段	最大小时雨强 (mm/h)
1	01.19	5.7	03:00~04:00	1.0	01.19	2.6	21:00~22:00	0.8
2	02.11	6.3	11:00~12:00	1.1	02.12	4.9	16:00~17:00	1.1
3	03.15	26.4	02:00~03:00	4.3	03.23	13.5	04:00~05:00	3.3
4	04.09	23.1	16:00~17:00	7.5	04.09	11.1	20:00~21:00	3.6
5	05.11	25.3	12:00~13:00	10.1	05.31	18.7	16:00~17:00	4.6
6	06.24	10.5	21:00~22:00	4.4	06.24	6.2	18:00~19:00	6.0
7	07.19	18.7	19:00~20:00	7.1	07.19	13.4	13:00~14:00	4.5
8	08.11	11.3	09:00~10:00	4.1	08.10	5.4	14:00~15:00	1.8
9	09.30	15.9	20:00~21:00	2.3	09.10	3.5	13:00~14:00	1.4
10	10.01	19.1	08:00~09:00	3.7	10.02	14.4	00:00~01:00	2.2
11	11.03	21.5	22:00~23:00	2.3	11.03	8.1	19:00~20:00	1.7
12	12.08	15.0	12:00~13:00	3.9	12.08	8.7	02:00~03:00	2.7

野果林站最大小时降水强度值都大于新源站，这一优势在暖季(4~7 月)尤为突出。两站最大小时雨强的发生时间存在系统性差异。野果林站的极值更频繁地出现在凌晨至上午时段，这可能与山地地形在夜间至清晨的冷却作用触发或增强对流性降水有关。而新源站的极值出现时间则更为分散，在下午至傍晚

以及夜间均有发生，更典型地体现了平原地区受午后热对流影响的降水日变化特征(表2)。

野果林站的日降水量波动幅度远大于新源站，其出现的强降水事件显著多于且强于新源站。这表明野果林站的降水具有更强的不均匀性和极端性。相比之下，新源站的日降水量变化则相对平缓，高值事件较少、强度较弱。野果林站因其特殊地形的影响，降水效率极高，更易触发和增强强对流天气过程，导致其短时强降水和极端日降水事件的发生频率和强度都远高于位于平原地带的新源站(图5)。



**Figure 5.** Comparison of daily precipitation between Xinyuan and the Wild Fruit Forest Meteorological Stations (unit: mm)

**图 5.** 新源和野果林站的逐日降水量对比(单位: mm)

从以上分析可以看出，野果林站因其位于伊犁河谷山地迎风坡，地形抬升作用显著，年降水量大，降水集中在春季和秋季，且多由短时强降水过程贡献；降水日数虽与新源站接近，但降水时数更长、小时雨强和日最大降水量极大，表明其降水过程更为剧烈；受山地热力效应触发，降水日变化峰值多出现在凌晨至上午。其降水呈现出高强度、高效率、强极端性的典型山地特征。相比之下，新源站地形相对平坦，年降水量少，降水在夏季频率稍高但强度弱，降水日变化更多受午后热对流影响，日雨量波动平缓。其降水表现为低强度、频率均匀、弱极端性的平原特征。

### 3. 结论与讨论

#### 3.1. 结论

本文通过对伊犁河谷距离相近的新源站和野果林站的温度和降水数据，得出以下结论：

- (1) 新源站海拔较低，地形开阔，夏季极端高温更显著，冬季最低温度更低，年温差和日较差较大，表现出明显的大陆性气候特征。野果林站海拔较高，受山地地形影响，日较差较小。冬季存在明显逆温现象，冬季气温略高于新源站，温度年际波动更小，气候更为稳定。新源站各季节温度普遍略高于野果林站，但两站四季温度变化趋势一致。
- (2) 野果林站年降水量较新源站大，气候较湿润，降水具有高强度、高效率、强极端性的典型山地特征。新源站则表现为低强度、频率均匀、弱极端性的平原特征。两站均呈现春季和秋季降水集中的特点，但野果林站在春季和秋季的降水量和降水日数均远高于新源站。野果林站降水日变化峰值多出现在凌晨

至上午，而新源站则更多受午后热对流影响，降水日变化峰值出现在下午至傍晚。

(3) 地形和海拔是导致两站气候差异的关键因素。野果林站位于河谷迎风坡，地形抬升作用增强降水效率。新源站地形相对平坦，降水更多受午后热对流影响。两地气候要素变化趋势一致，但地形放大局地气候分异。

### 3.2. 讨论

本研究基于新源国家气象站与伊犁野果林自动气象站 2021 年 9 月至 2022 年 8 月逐小时气温与降水数据，揭示了伊犁河谷东段地形与海拔对局地气候的显著影响。尽管两站水平距离仅 29.3 km，但气候差异明显，表现为温度、降水及其日变化、季节分配等多方面的显著分异。这一结果与前人关于伊犁河谷“增暖增湿”趋势的研究相呼应，但进一步揭示了小尺度地形因子在局地气候形成中的关键作用，弥补了以往大尺度研究中存在的不足。

从温度来看，野果林站因海拔较高，冬季逆温效应使山谷中上部因冷空气下沉而相对温暖，导致气温年际波动小。新源站地处相对开阔的河谷平原，地形遮蔽作用弱，昼夜温差大，年温差显著。另外，野果林站夏季最高气温低于新源站，说明海拔升高对高温具有抑制作用。但值得注意的是，两站秋季平均气温完全一致(均为 8.6°C)，说明在季节转换期，地形差异对温度的调节作用可能减弱，气候趋于一致。

从降水来看，野果林站年降水量比新源站高出约 57%，降水强度、降水时数、极端降水事件频率均显著高于后者，充分体现了山地迎风坡对降水的增强作用。这种地形效应在春季和秋季尤为突出，这与西风气流携带的水汽在山地迎风坡被迫抬升、形成持续性降水或强对流降水有关。野果林站降水日变化峰值多出现在凌晨至上午，这与山地夜间辐射冷却触发局地热力对流或锋面抬升机制有关，反映出山地降水过程的热力驱动特征。而新源站降水峰值多出现在下午至傍晚，更符合平原地区午后热对流主导的降水日变化模式。此外，两站在部分日期出现同步极端降水事件，说明大尺度天气系统仍是区域降水的主要驱动因素，但地形对降水强度具有显著放大作用。这一发现对理解区域极端降水机制、评估山洪地质灾害风险具有重要启示。

总的来讲，本研究仅基于一年逐小时数据，时间序列相对较短，可能无法充分捕捉气候年际变率对局地气候差异的影响。未来可延长观测时段，结合高分辨率数值模拟或卫星遥感数据，进一步揭示地形对气候的调控机制。此外，引入坡向、坡度、植被覆盖等更精细的地形因子，将有助于构建更完整的局地气候分异模型，为区域气候资源利用与生态保护提供科学依据。

### 基金项目

本文由自治区重点研发计划项目(2022B03027-1); 新疆气象局科学研究重点项目(ZD202505); 新疆气象局科技创新发展基金项目(MS202505)共同资助。

### 参考文献

- [1] Barry, R.G. (2008) Mountain Weather and Climate. 3rd Edition, Cambridge University Press, 1-506.  
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511754753>
- [2] Houze, R.A. (2012) Orographic Effects on Precipitating Clouds. *Reviews of Geophysics*, **50**, 1-47.  
<https://doi.org/10.1029/2011rg000365>
- [3] Roe, G.H. (2005) Orographic Precipitation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **33**, 645-671.  
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122541>
- [4] 陈权亮, 刘皓, 胡淼, 等. 青藏高原东侧复杂地形区极端降水研究进展[J]. 暴雨灾害, 2024, 43(3): 255-265.
- [5] 孟清, 白红英, 赵婷, 等. 秦岭山地气候变化的地形效应[J]. 山地学报, 2020, 38(2): 180-189.
- [6] 王坚红, 张萌, 任淑媛, 等. 太行山脉地形坡度对下山锋面气旋暴雨影响模拟研究[J]. 地球科学进展, 2019, 34(7):

- 717-730.
- [7] 李志, 郑粉莉, 刘文兆. 1961-2007 年黄土高原极端降水事件的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 291-299.
- [8] 刘和斌, 李育, 张新中, 徐玲梅. 祁连山东西段不同时间尺度气候差异研究[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2020, 56(6): 724-732.
- [9] 毛永昌. 近 50 年来新疆新源县降水变化趋势分析[J]. 中国西部科技, 2013, 12(7): 74-75.
- [10] 闫玲, 夏依木拉提·艾依达尔艾力. 近 50a 来新疆新源县气温变化趋势分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(7): 52-53.
- [11] 闫俊杰, 闫敏, 崔东, 刘海军, 陈晨, 夏倩倩. 近 55 年新疆伊犁河谷气温和降水变化趋势分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10): 12-16.
- [12] 李聪, 曹占洲, 丁林, 石玉, 杨志华. 新疆伊犁河谷地区 50a 来气候变化特征分析[J]. 山西农业科学, 2012, 40(5): 508-514.
- [13] 马建勇, 潘婕, 姜江, 闫彩霞, 许吟隆. 北疆地区 1955-2009 年气温、降水变化特征的时间序列分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(2): 18-24.
- [14] 殷剑虹, 徐予洋. 伊犁河谷气候变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2007(6): 20-23.
- [15] 刘晶, 周雅蔓, 杨莲梅, 张迎新. 2016 年伊犁河谷大气可降水量变化特征及其与降水的关系[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 565-576.
- [16] 刘晶, 曾勇, 刘雯, 杨莲梅. 伊犁河谷和天山北坡暴雨过程水汽特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(3): 65-71.
- [17] 杨莲梅, 刘晶. 新疆水汽研究若干进展[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 1-13.
- [18] 祝小梅, 朱弋. 1961-2009 年新疆伊犁地区暴雨日时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(5): 63-68.
- [19] 徐娇媚, 徐文修, 张富纬, 等. 近 50a 伊犁河谷  $\geq 0^{\circ}\text{C}$  和  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  期间降水量的时空变化特征分析[J]. 新疆农业科学, 2013, 50(10): 1806-1813.
- [20] 江友飞, 祝小梅, 覃家秀, 等. 伊犁一次极端暴雨成因分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(3): 679-689.
- [21] 张云惠, 于碧馨, 王智楷, 等. 伊犁河谷夏季两次极端暴雨过程的动力机制与水汽输送特征[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(5): 435-444.
- [22] 黄昕. 新疆伊犁河谷极端降水的环流特征及发生发展机理分析[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2025.