

DOI: 10.13866/j.azr.2024.06.16

新疆西天山峡谷不同坡位野核桃冻害特征

柳华清¹, 王博², 贾妍妍¹, 解欣然¹, 张维^{1,3}

(1. 伊犁师范大学生物科学与技术学院, 新疆 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学资源与环境学院, 新疆 伊宁 835000; 3. 新疆伊犁河谷资源植物保护与利用重点实验室, 新疆 伊宁 835000)

摘要: 严重的冻害影响核桃生长发育甚至导致植株死亡。采用样方法调查新疆西天山峡谷野核桃自然保护区不同坡位野核桃的冻害情况, 分析了野核桃冻害的分布特征, 树高、冠幅和坡位对野核桃冻害的影响。结果表明: (1) 野核桃总冻害率 87.1%, 其中, 2 级冻害株的比例最大 (43.4%), 其次为 1 级 (22.5%)、3 级 (17.5%), 4 级最少 (3.7%)。(2) 野核桃冻害株以坡中比例最大 (46.5%), 其次坡底 (35.9%), 坡顶最少 (4.7%); 未受冻害株以坡顶比例最大 (7.4%), 其次坡底 (3.3%), 坡中 (2.2%)。(3) 6 个树高级 (H) 冻害株的比例依次为: $H_1(43.4%) > H_4(19.5%) > H_6(17.0%) > H_5(15.7%) > H_3(4.3%) > H_2(0.1%)$ 。(4) 6 个冠幅级 (CW) 冻害株的比例依次为: $CW_1(43.4%) > CW_4(22.1%) > CW_3(20.3%) > CW_5(9.5%) > CW_2(2.9%) > CW_6(1.8%)$ 。(5) 同一坡位不同树高级和冠幅级冻害株比例差异显著 ($P < 0.05$); 1 级和 2 级冻害株主要发生在坡中和坡底, 3 级和 4 级冻害株主要发生在坡中。(6) 冻害株与胸径呈显著相关 ($P < 0.05$), 与冠幅呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。保护区的野核桃植株大部分遭受冻害, 野核桃植株冻害等级比例在不同坡位、不同树高级和不同冠幅级之间差异较大。本研究结果为保护区的管理和野核桃冻害的预防提供科学参考。

关键词: 野核桃; 冻害; 树高; 冠幅; 坡位; 新疆

在森林生态系统中, 冻害是重要的非生物干扰因子, 它使森林群体更新和建立变得困难, 加剧森林次生灾害发生的风险, 严重影响林业的生产和发展^[1-2]。树高是树木获取光资源最重要的构型补偿方式之一^[3], 树冠能将太阳能转化为生产力, 是树木与土壤、大气层进行热量、水分和其他物质交换的能量转换场所, 它们共同决定树木的生活力和生产力水平, 同时也是反映树木在整个生长过程中竞争水平的重要指标^[4-5], 当树木遭受冻害时, 树高和树冠直接影响其抵御冻害的能力^[6]。坡位是重要的地形因子, 同一地区不同坡位因坡面位置差异, 造成光照强度、水分和土壤养分空间分布的差异性, 使植物受冻害程度差异明显, 进而影响植物生长发育^[7-8]。核桃是重要的经济树种, 冻害是核桃生存和生长发育的主要气象灾害^[9], 冻害程度与核桃品种、核桃树的个体生长特征、立地条件等有关^[10]。研究树高、冠幅和坡位对野核桃冻害的影响, 将有助于为野核

桃冻害的预防提供科学参考。

新疆野核桃 (*Juglans regia*) 属于胡桃科胡桃属落叶乔木, 是珍贵的第三纪温带阔叶林的残遗成分, 为我国具有生物多样性国际意义的优先保护物种^[11]。在亚洲仅成片分布于新疆西天山峡谷的野核桃自然保护区^[12], 其天然种群对研究栽培核桃的起源、演化、古植物区系的变迁及第三、第四纪气候变化均具有特殊重要的科学价值, 对保护伊犁河谷生物多样性、维护和改善生态系统功能有重要作用^[13]。目前, 关于新疆野核桃的研究主要集中在资源分布现状^[12,14]、生物生态学特性^[11,15]、群落学特征^[16-17]、种群结构和动态^[18-19]、分子遗传学特性^[20-21]等。关于新疆野核桃冻害的研究鲜见报道, 冬季低温和寒潮侵袭, 尤其在极端低温 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 新疆野核桃枝条 (幼苗枝梢) 易受冻害侵袭^[12], 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下, 其枝干等部位会产生严重冻害^[22]。关于树高、冠幅和坡位对新疆野核桃冻害的影响更是鲜见报

收稿日期: 2023-09-26; 修订日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560095, 31160072) 资助

作者简介: 柳华清 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事植物种群生态学方面的研究。E-mail: 11390529722@163.com

通讯作者: 张维。E-mail: 343956580@qq.com

道。本文以新疆西天山峡谷野核桃自然保护区的野核桃为研究对象,对野核桃种群冻害情况,不同坡位、不同树高级、不同冠幅级野核桃冻害的比例分布,冻害和冻害等级与野核桃个体生长特征(胸径、树高、冠幅)及坡位的相关性进行调查和统计分析,为保护区的管理和野核桃冻害的预防提供科学参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

新疆野核桃自然保护区位于西天山峡谷伊犁州巩留县城南部(距巩留县城13 km)的凯特明山深峡谷(43°22'56"~43°25'40"N,82°15'28"~82°17'23"E),总面积1180 hm²,野核桃分布面积约45 hm²,其主要分布在海拔1200~1670 m的沟谷、山坡^[17]。保护区年均降水量580 mm,年均蒸发量1200 mm,相对湿度70.0%~80.0%,年均温7.6℃,≥10℃积温1865.4~2338.9℃,最冷月1月均温-3.3℃,最热月7月均温19.7℃^[19]。据巩留县气象局数据,巩留县城区(海拔800 m)在2020年12月14—22日,最低气温有5 d在-24~-28℃;2021年1月3—17日,最低气温有8 d在-24~-30℃,1月30日最低气温-26℃(图1)。保护区土壤腐殖质含量高,土体湿润,土层深厚,富含

有机质和养分,肥力较高,pH值6.4~8.9^[18,22]。新疆野核桃为保护区植物的建群种,其伴生乔木主要有野杏(*Prunus armeniaca*)、新疆野苹果(*Malus sieversii*)、天山桦(*Betula tianschanica*)、欧洲山杨(*Populus tremula*)、山柳(*Salix pseudotangii*)等;灌木主要有截萼忍冬(*Lonicera humilis*)、金丝桃叶绣线菊(*Spiraea hypericifolia*)、欧洲木莓(*Rubus caesius*)、异果小檗(*Berberis heteropoda*)、新疆方枝柏(*Juniperus pseudosabina*)等;草本植物主要有阿尔泰金莲花(*Trollius altaicus*)、白番红花(*Crocus alatavicus*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、密丛雀麦(*Bromus beneckenii*)、短距凤仙花(*Impatiens brachycentra*)等。

1.2 野外调查

参考徐少君等^[23]对坡向的划分方法,结合保护区地形因子,利用罗盘获取地理坡向,以正北方向为0°,将坡向划分为阳坡(157.5°~247.5°)、半阳坡(112.5°~157.5°、247.5°~292.5°)、阴坡(0°~67.5°、337.5°~360°)、半阴坡(67.5°~112.5°、292.5°~337.5°)4个生境。2021年4月中旬,在野核桃自然保护区的阳坡、半阳坡、阴坡、半阴坡选取野核桃分布的典型地段各设置1 hm²样地,以每个样地野核桃分布的垂直海拔下限和上限来划分坡位,野核桃分布的垂直海拔下1/3为坡底、中间1/3为坡中、上1/3为坡顶。在4个坡向生境选取的样地中,阳坡样地野核

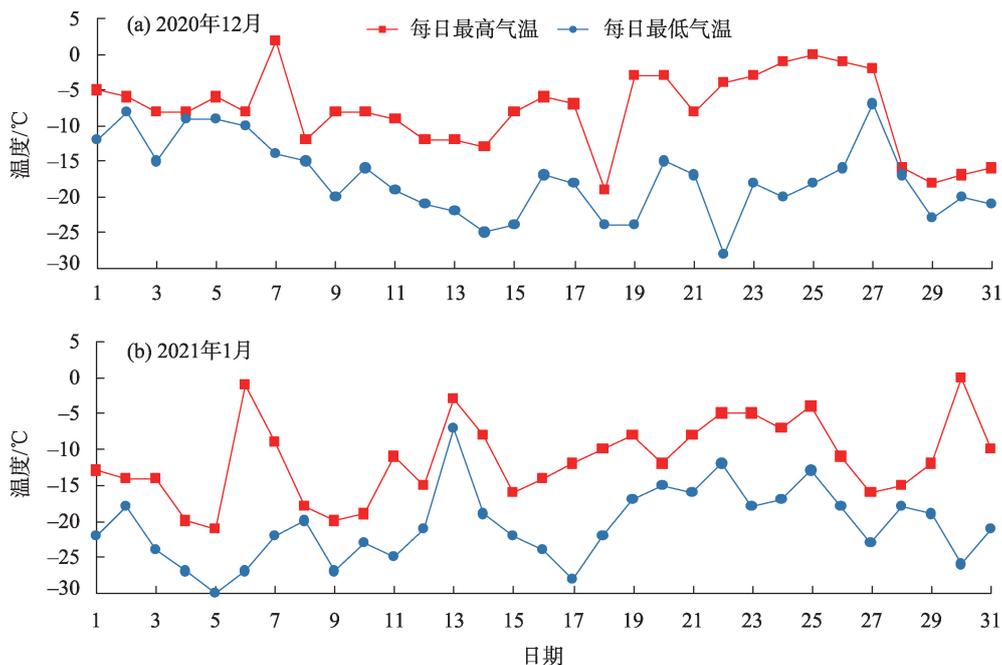


图1 巩留县城区2020年12月和2021年1月每日气温

Fig. 1 Daily temperature in December 2020 and January 2021 in Gongliu County urban area

桃分布的垂直海拔下限和上限为 1280~1640 m,即海拔 1280~1390 m 为坡底,海拔 1390~1500 m 为坡中,海拔 1500~1640 m 为坡顶;半阳坡样地野核桃分布的垂直海拔下限和上限为 1300~1600 m,即海拔 1300~1400 m 为坡底,海拔 1400~1500 m 为坡中,海拔 1500~1600 m 为坡顶;阴坡样地野核桃分布的垂直海拔下限和上限为 1240~1660 m,即海拔 1240~1380 m 为坡底,海拔 1380~1520 m 为坡中,海拔 1520~1660 m 为坡顶;半阴坡样地野核桃分布的垂直海拔下限和上限为 1280~1660 m,即海拔 1280~1400 m 为坡底,海拔 1400~1520 m 为坡中,海拔 1520~1660 m 为坡顶。为便于调查,将每个样地划分为 25 个 20 m×20 m 样方,每个样方利用相邻格子法^[24]分成 16 个 5 m×5 m 的小样方,对每个小样方内的野核桃进行逐株调查,记录植株的胸径(幼苗记录基径)、树高(幼苗记录株高)、冠幅、冻害等级、坡位、坡向等指标。其中,胸径以离地面 1.2 m 为基准,用钢卷尺测定野核桃树干周长,再换算为树干直径(幼苗基径以离地面 0.1 m 为基准,用游标卡尺测量);树高采用激光测距仪(得力 DL331050L)测量(幼苗株高用钢卷尺测量);冠幅取东西向和南北向野核桃树冠垂直投影宽度的平均值,用皮尺测量。

1.3 树高级划分

参考 Lieberman 等^[25]对乔木树种树高级的划分方法,将坡顶、坡中、坡底野核桃种群划分为 6 个树高级,第 1 树高级(H_1)0~1.4 m(胸径 DBH<2.0 cm),第 2 树高级(H_2)1.4~3.0 m(胸径 DBH≥2.0 cm),第 3 树高级(H_3)3.0~6.0 m(胸径 DBH≥2.0 cm),以后树高每间隔 3.0 m 划作一个树高级。

1.4 冠幅级划分

参考张志祥等^[1]对乔木树种冠幅级的划分方法,将坡顶野核桃种群划分为 5 个冠幅级,坡中、坡底野核桃种群划分为 6 个冠幅级,第 1 冠幅级(CW_1)0~1.0 m(胸径 DBH<2.0 cm),第 2 冠幅级(CW_2)1.0~2.0 m(胸径 DBH≥2.0 cm),第 3 冠幅级(CW_3)2.0~4.0 m(胸径 DBH≥2.0 cm),以后冠幅每间隔 2.0 m 划作一个冠幅级。

1.5 冻害等级划分

参考樊江斌等^[26]、薛恒新等^[27]的方法,采用目测法,结合野核桃的生长特征,对每株野核桃选取下、中、上 3 个部位,东西南北 4 个方向进行观察。根据观测结果,将野核桃冻害等级划分为 5 级。

0级:未遭受冻害

1级:轻度冻害,芽受冻干枯比例≤1/5,1年生枝条冻死比例≤1/10,树干无冻伤

2级:中度冻害,1/5<芽受冻干枯比例≤1/2,1/10<1年生枝条冻死比例≤3/10,树干冻伤比例≤1/10

3级:重度冻害,1/2<芽受冻干枯比例≤4/5,3/10<1年生枝条冻死比例≤1/2,1/10<树干冻伤比例≤3/10

4级:严重冻害,芽受冻干枯比例>4/5,1年生枝条冻死比例>1/2,树干冻伤比例>3/10

1.6 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析和作图。所有数据在分析之前进行正态分析和方差齐性检验,采用单样本 t 检验和单因素方差分析比较野核桃冻害比例的差异性($\alpha=0.05$),运用 Spearman 相关系数对野核桃冻害株与个体生长特征及坡位的相关性进行分析。其中,保护区野核桃总体、不同坡位野核桃冻害和未受冻害比例分布以实际调查的野核桃总株数为基数进行统计,1~4 级冻害在野核桃不同树高级和不同冠幅级的比例分布以冻害野核桃(100.0%)为基数进行统计,0 级冻害在野核桃不同树高级和不同冠幅级的比例分布以未受冻害野核桃(100.0%)为基数进行统计。

2 结果与分析

2.1 种群的冻害等级分布

野核桃自然保护区 3 个坡位共调查野核桃种群个体总数为 1285 株。其中,有 1119 株受到不同程度冻害,占 87.1%,仅有 166 株(12.9%)未受到冻害;在不同冻害等级中,2 级冻害的数量最多,占个体总数的 43.4%,分别是 1 级的 1.93 倍、3 级的 2.48 倍和 4 级的 11.73 倍(表 1)。经单样本 t 检验,0~4 级冻害野核桃的比例差异显著($P<0.05$)。由此表明,2020—2021 年冬季的极端低温天气过程,使保护区野核桃大部分受到冻害侵袭,以中度冻害(2 级)为主,达到严重冻害(4 级)野核桃的株数较少。

2.2 不同坡位的冻害分布

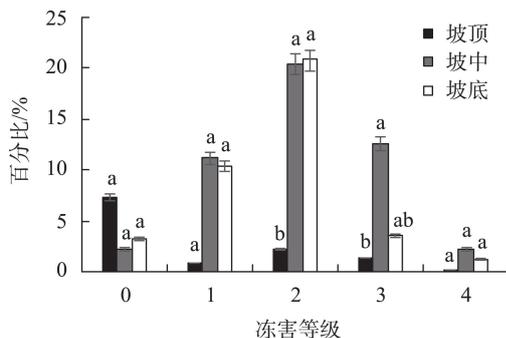
3 个坡位冻害和未受冻害野核桃的株数分布不同,冻害个体以坡中株数最多,有 597 株(46.5%),其次坡底,有 462 株(35.9%),坡顶株数最少,有 60 株(4.7%);未受冻害个体以坡顶株数最多,有 95 株

表1 野核桃种群冻害等级的统计

Tab. 1 Statistics of freezing injury grade in *Juglans regia* population

等级	株数	比例/%
0	166	12.9
1	289	22.5
2	558	43.4
3	225	17.5
4	47	3.7
合计	1285	100.0

(7.4%),其次坡底,有42株(3.3%),坡中株数最少,有29株(2.2%)(图2)。在不同坡位中,1级和2级冻害株主要发生在坡中和坡底,其中,坡中分别有144株(11.2%)、262株(20.4%),坡底分别有134株(10.4%)、268株(20.9%);3级和4级冻害株主要发生在坡中,分别有162株(12.6%)、29株(2.3%)。不同坡位0级、1级和4级冻害株的比例差异均不显著($P>0.05$),2级冻害株的比例在坡顶与坡中、坡底之间差异显著($P<0.05$),3级冻害株的比例在坡中与坡顶之间差异显著($P<0.05$)。表明保护区的野核桃易遭受冻害,轻度冻害和中度冻害株主要发生在坡中和坡底,重度冻害和严重冻害株主要发生在坡中。



注:不同小写字母表示不同坡位同一冻害等级差异显著($\alpha=0.05$)。

图2 不同坡位野核桃不同冻害等级

Fig. 2 Different freezing injury grades of *Juglans regia* in different slope positions

2.3 不同树高级的冻害分布

在6个树高(H)级中,冻害株数从多到少为: $H_1>H_4>H_6>H_5>H_3>H_2$;未受冻害株数从多到少为: $H_2>H_3>H_4>H_5>H_6>H_1$ (表2)。3个坡位冻害株均以树高级 H_1 比例最大,坡顶和坡底均以树高级 H_3 比例最

小,坡中以树高级 H_2 比例最小,坡顶和坡底树高级 H_2 均无冻害株;3个坡位未受冻害株均以树高级 H_2 比例最大,坡顶树高级 H_1 和坡中树高级 H_1 、 H_4 、 H_6 及坡底树高级 H_1 、 H_5 均无未受冻害株。1级、2级和4级冻害株均以树高级 H_1 比例最大,3级冻害株以树高级 H_6 比例最大;树高级 H_2 均无1级和3级冻害株,树高级 H_2 和 H_4 均无4级冻害株。不同坡位,树高级 H_1 冻害株的比例在坡中与坡顶之间差异显著($P<0.05$),其他5个树高级冻害株的比例差异均不显著($P>0.05$)。同一坡位,坡顶树高级 H_1 分别与 $H_2\sim H_5$ 冻害株的比例均差异显著($P<0.05$),坡中树高级 H_1 分别与 $H_2\sim H_4$ 冻害株的比例均差异显著($P<0.05$),坡底树高级 H_1 与 H_2 冻害株的比例差异显著($P<0.05$)。表明保护区的野核桃在树高级 H_1 最易遭受冻害,在树高级 H_2 一般不易遭受冻害;轻度冻害、中度冻害和严重冻害株主要发生在树高级 H_1 ,重度冻害株主要发生在树高级 H_6 。

2.4 不同冠幅级的冻害分布

在6个冠幅(CW)级中,冻害株数从多到少为: $CW_1>CW_4>CW_3>CW_5>CW_2>CW_6$;未受冻害株数从多到少为: $CW_2>CW_3>CW_4>CW_5>CW_6>CW_1$ (表3)。在3个坡位上,坡顶、坡中和坡底冻害株均以冠幅级 CW_1 比例最大,坡顶无冠幅级 CW_2 冻害株;坡顶、坡中和坡底的未受冻害株均以冠幅级 CW_2 比例最大,坡顶和坡底冠幅级 CW_1 及坡中冠幅级 CW_1 、 CW_4 、 CW_5 均无未受冻害株。1~4级冻害株均以冠幅级 CW_1 比例最大,冠幅级 CW_6 无1级冻害株,冠幅级 CW_2 、 CW_6 无4级冻害株。在不同坡位,冠幅级 CW_1 冻害株的比例在坡中与坡顶之间差异显著($P<0.05$),其他5个冠幅级冻害株的比例差异均不显著($P>0.05$)。在同一坡位,坡中冠幅级 CW_1 分别与 CW_2 、 CW_3 、 CW_5 、 CW_6 冻害株的比例均差异显著($P<0.05$),坡底冠幅级 CW_1 与 CW_6 冻害株的比例差异显著($P<0.05$)。表明保护区的野核桃在冠幅级 CW_1 最易遭受冻害,其中,从轻度、中度、重度和严重冻害均易于发生;在冠幅级 CW_2 和 CW_6 不易遭受冻害;在冠幅级 CW_4 也相对易于发生重度冻害。

2.5 冻害与个体生长特征及坡位的相关性

经相关性分析及其显著性检验,全部冻害株与胸径呈显著相关($P<0.05$),与冠幅呈极显著负相关($P<0.01$)(表4)。1级冻害株与胸径、树高及冠幅均呈极显著负相关($P<0.01$),与坡位呈显著相关($P<$

表2 不同树高(H)级野核桃种群冻害等级的数量及其比例

Tab. 2 Number of individuals and the proportion of freezing injury grade with different height classes in *Juglans regia* population

坡位	树高级	0级		1级		2级		3级		4级		合计	
		数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%
坡顶	H ₁	0	0.0	11	1.0	9	0.8	4	0.4	2	0.2	26	2.3Ba
	H ₂	48	28.9	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0Ab
	H ₃	29	17.5	0	0.0	2	0.2	0	0.0	0	0.0	2	0.2Ab
	H ₄	8	4.8	0	0.0	6	0.5	2	0.2	0	0.0	8	0.7Ab
	H ₅	5	3.0	0	0.0	3	0.3	4	0.3	0	0.0	7	0.6Ab
	H ₆	5	3.0	0	0.0	8	0.7	8	0.7	1	0.1	17	1.5Aab
	合计	95	57.2	11	1.0	28	2.5	18	1.6	3	0.3	60	5.3
坡中	H ₁	0	0.0	118	10.5	86	7.7	36	3.2	19	1.7	259	23.1Aa
	H ₂	22	13.3	0	0.0	1	0.1	0	0.0	0	0.0	1	0.1Ab
	H ₃	5	3.0	6	0.5	6	0.5	2	0.2	0	0.0	14	1.3Ab
	H ₄	0	0.0	12	1.1	44	3.9	20	1.8	0	0.0	76	6.8Ab
	H ₅	2	1.2	4	0.4	67	6.0	35	3.1	4	0.4	110	9.8Aab
	H ₆	0	0.0	4	0.4	58	5.2	69	6.2	6	0.5	137	12.2Aab
	合计	29	17.5	144	12.9	262	23.4	162	14.5	29	2.6	597	53.4
坡底	H ₁	0	0.0	95	8.5	66	5.9	27	2.4	13	1.2	201	18.0ABa
	H ₂	24	14.5	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0Ab
	H ₃	16	9.6	2	0.2	24	2.1	4	0.4	2	0.2	32	2.9Aab
	H ₄	1	0.6	20	1.8	110	9.8	4	0.4	0	0.0	134	12.0Aab
	H ₅	0	0.0	11	1.0	44	3.9	4	0.4	0	0.0	59	5.3Aab
	H ₆	1	0.6	6	0.5	24	2.1	6	0.5	0	0.0	36	3.2Aab
	合计	42	25.3	134	12.0	268	23.9	45	4.0	15	1.4	462	41.3

注:不同大写字母表示不同坡位同一树高级差异显著,不同小写字母表示同一坡位不同树高级差异显著($\alpha=0.05$)。

0.05);2级和3级冻害株与胸径、树高、冠幅及坡位均呈极显著相关($P<0.01$),3级冻害株与坡位呈极显著负相关($P<0.01$);4级冻害株与树高呈显著负相关($P<0.05$)。表明无论在整体冻害还是在冻害等级上,大多均与野核桃个体生长特征和坡位呈显著相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 保护区野核桃种群总体冻害情况及抗冻性分析

低温冻害是核桃生长发育和产业发展的重要影响因素^[9]。巩留县2020年12月—2021年1月有9 d最低气温在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,2021年1月还发生了2次寒潮和暴雪(巩留县气象局数据)。野核桃自然保护区所处位置的海拔比县城高且气温比县城更低,长时间持续极端低温必然使新疆野核桃遭受冻害,其总冻害率高达87.1%(表1)。受到冻害的野核桃,树芽失水干缩,一年生枝条发生生理干旱,树干

在冻融交替过程中皮层细胞死亡,树势整体减弱,易引发病虫害等次生灾害,严重时出现植株死亡^[27]。因此,新疆野核桃自然保护区应建立长期固定观察、研究样地,采取有效措施预防野核桃冻害的发生,以保护这一珍稀野生植物资源。植物的抗冻性是植物在长期适应环境过程中通过自身变异和自然选择获得的一种适应低温的能力^[28]。植物在温暖季节或冬季,通过活跃生长或休眠来调节生命期变化,以降低冻害的风险^[29-30]。野核桃自然保护区此次经历极端低温天气持续时间长,但野核桃种群以轻度冻害和中度冻害为主(65.9%),严重冻害仅占3.7%。有研究表明,新疆野核桃的抗冻性优于新疆核桃和陕西核桃^[31],且保护区处于天山北麓冬季逆温层中部,因此,新疆野核桃自身抵御低温冻害能力较强,并在长期演化过程中形成了抵抗极端低温冻害的机制。

不同乔木树种抵御冻害的能力不同,同一树种抵御冻害的能力又与树龄、树高、树冠大小及形状

表3 不同冠幅(CW)级野核桃冻害等级的株数及其比例

Tab. 3 Number of individuals and the proportion of freezing injury grade with different crown width classes in *Juglans regia* population

坡位	冠幅级	0级		1级		2级		3级		4级		合计	
		数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%	数量	比例/%
坡顶	CW ₁	0	0.0	11	1.0	9	0.8	4	0.4	2	0.2	26	2.3Ba
	CW ₂	50	30.1	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0Aa
	CW ₃	19	11.5	0	0.0	3	0.3	1	0.1	0	0.0	4	0.4Aa
	CW ₄	14	8.4	0	0.0	4	0.4	11	1.0	0	0.0	15	1.3Aa
	CW ₅	12	7.2	0	0.0	12	1.1	2	0.2	1	0.1	15	1.3Aa
	合计		95	57.2	11	1.0	28	2.5	18	1.6	3	0.3	60
坡中	CW ₁	0	0.0	118	10.5	86	7.7	36	3.2	19	1.7	259	23.1Aa
	CW ₂	21	12.7	3	0.3	6	0.5	4	0.4	0	0.0	13	1.2Ab
	CW ₃	6	3.6	13	1.2	46	4.1	36	3.2	0	0.0	95	8.5Ab
	CW ₄	0	0.0	8	0.7	77	6.9	54	4.8	6	0.5	145	13.0Aab
	CW ₅	0	0.0	2	0.2	38	3.4	25	2.2	4	0.4	69	6.2Ab
	CW ₆	2	1.2	0	0.0	9	0.8	7	0.6	0	0.0	16	1.4Ab
合计		29	17.5	144	12.9	262	23.4	162	14.5	29	2.6	597	53.4
坡底	CW ₁	0	0.0	95	8.5	66	5.9	27	2.4	13	1.2	201	18.0ABa
	CW ₂	26	15.7	2	0.2	15	1.3	2	0.2	0	0.0	19	1.7Aab
	CW ₃	10	6.0	15	1.3	100	8.9	11	1.0	2	0.2	128	11.4Aab
	CW ₄	4	2.4	14	1.3	71	6.3	2	0.2	0	0.0	87	7.8Aab
	CW ₅	1	0.6	8	0.7	13	1.2	2	0.2	0	0.0	23	2.1Aab
	CW ₆	1	0.6	0	0.0	3	0.3	1	0.1	0	0.0	4	0.4Ab
合计		42	25.3	134	12.0	268	23.9	45	4.0	15	1.4	462	41.3

注:不同大写字母表示不同坡位同一冠幅级差异显著,不同小写字母表示同一坡位不同冠幅级差异显著(α=0.05)。

表4 野核桃全部冻害和等级与个体生长特征及坡位的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between total freezing injury and the grade of *Juglans regia* and both individual growth characters and slope position

	合计	1级	2级	3级	4级
胸径/cm	0.058*	-0.450**	0.264**	0.220**	-0.038
树高/m	0.034	-0.423**	0.225**	0.230**	-0.057*
冠幅/m	-0.096**	-0.461**	0.217**	0.157**	-0.034
坡位/(°)	-0.002	0.060*	0.113**	-0.197**	-0.036

注:*表示α=0.05;**表示α=0.01。

及环境因子等有关^[6-7]。本次调查统计结果显示,坡位、树高和冠幅均对新疆野核桃抵御冻害的能力有影响。不同坡位中,坡中野核桃冻害率最高(46.5%),而坡顶野核桃冻害率最低(4.7%)(图2);同一坡位中,树高和冠幅最小的野核桃对冻害抵抗能力最弱,即冻害率最高,均为37.8%(表2和表3);不同坡位野核桃冻害比例和冻害等级并不随坡底、坡中、

坡顶梯度规律变化,不同树高级和不同冠幅级野核桃冻害比例和冻害等级也不按照树高级和冠幅级大小规律变化,而是呈现交叉复杂多样的特征,揭示新疆野核桃冻害比例和冻害等级是多种因子共同作用的结果,其他因素如胸径、坡向、海拔、林分密度、林木空间分布格局等对树木抵御冻害也有重要影响^[1]。

3.2 坡位对野核桃冻害的影响

坡位是影响太阳辐射和降水分布的重要地形因子,在局部空间上通过对光照、温度、水分等再分配,使植物受到冻害时会有不同的响应机制^[32-33]。在同一区域,一般来讲,从坡顶到坡底,海拔逐渐降低,植物受到冻害程度也逐渐减弱^[7],但野核桃自然保护区冻害野核桃株数以坡中最多,坡底次之,坡顶最少(图2),这与陈波涛等^[34]研究的小桐子(*Jatropha curcas*)受低温危害程度中上坡位高于中下坡位的结论不同,是因为不同坡位的生境条件有所差异,坡顶水资源较少,同时空气流通好、光照好,所

以土壤相对干燥,秋季核桃树生长缓慢、但枝条成熟度好;坡中和坡底水资源较为丰富、流通性差,土壤湿润^[35],秋季贪青,枝条成熟度差,一旦冬季遇到低温,便产生了坡顶温度低却冻害轻、坡中和坡底温度高却冻害严重的情况。野核桃自然保护区未受冻害野核桃株数为:坡顶>坡底>坡中(图2),表明坡中和坡底比坡顶更易受冻害侵袭,也证实了坡位是野核桃抵御冻害的重要影响因子之一。因此,保护区工作人员可及时排除坡中和坡底处的低洼积水,从而减少野核桃体内组织结冰的可能性,提高坡中和坡底的野核桃抵御极端低温的能力。统计显示,不同坡位野核桃受到轻度冻害、重度冻害及严重冻害(1级、3级和4级)的比例以坡中最大,中度冻害(2级)的比例以坡底最大(图2),说明保护区野核桃受冻害的程度(等级)不仅仅是温度的影响,应该还受光照、土壤水分等多种因素的综合作用,这需要在不同坡位设置固定样地多年持续观察监测并通过生理控制实验进一步验证。

3.3 树高对野核桃冻害的影响

树高是乔木树种抵御冻害能力强弱的重要影响因素^[7]。陈杰^[36]研究桉树遭受冻害后受损比例随树高增大而减小,而野核桃自然保护区野核桃冻害株数以第1树高级最多,第2树高级最少;未受冻害株数以第2树高级最多,第1树高级最少(表2),是因为野核桃在第1树高级属于幼龄期,植株细弱,木质化程度较低,加之成年野核桃和其伴生乔木(如欧洲山杨、野杏等)枝繁叶茂^[15],群落郁闭度大,获取的光资源较少,因此,抵御冻害能力较弱;野核桃生长发育到第2树高级,生活力强,生长旺盛,产生的果实少,有充足的养分来抵御冻害的侵袭,因此,冻害率低。不同树高级野核桃遭受冻害程度不同,轻度冻害、中度冻害和严重冻害以第1树高级株数最多,重度冻害以第6树高级株数最多(表2),这与黄山松(*Pinus taiwanensis*)种群受低温冻害程度不是随树高的增加而增加^[1]的研究结果类似,揭示野核桃不同生长发育阶段,其抵御冻害的能力是不同的,后续应持续对野核桃抵御冻害的机制进行研究,为保护区野核桃种群持久健康发展提供科技支撑。

3.4 冠幅对野核桃冻害的影响

冠层是乔木树种进行光合作用最直接的部分,冠幅的大小决定其与外界自然资源的接触面积,直

接影响光照、水分及其他营养物质的吸收能力,同时对野核桃遭受冻害程度有很大影响^[37]。朱鸿伟^[7]研究表明,林木冠幅越大受低温冻害程度越高,而野核桃自然保护区野核桃冻害株数以第1冠幅级最多,第2冠幅级和第6冠幅级最少;未受冻害株数以第2冠幅级最多,第1冠幅级最少(表3)。植物遭受冻害程度是天气条件、地理因素、林分特征及树种等多种因素共同作用的结果^[6],同样是因为冠幅级CW_i野核桃处于幼龄期,木质化程度较低,抗冻能力弱,其遭受冻害后接收不到适量的光照和热量,野核桃体内细胞、组织、器官在长时间低温的影响下必然损坏严重;第2冠幅级野核桃(几乎未结核桃)生殖分配能量少,且处于生长旺盛期,抗冻能力强;第6冠幅级野核桃冻害率低,是因为野核桃属喜温暖的植物,冠幅越大,其受到光照的范围越大,光合作用越强,且野核桃生长到第6冠幅级,其抗冻机制已经完善并达到一种平衡,抵御低温冻害的能力强。

4 结论

(1) 2020—2021年冬季的强冷冻气候过程,新疆西天山峡谷野核桃自然保护区的野核桃大部分遭受不同程度的冻害,总冻害率达到87.1%,以中度冻害(2级)为主(43.4%),但达到严重冻害(4级)的冻株占比仅为3.7%。

(2) 坡中和坡底野核桃相对易遭受冻害,冻株比例分别为46.5%和35.9%,坡顶野核桃相对不易遭受冻害,冻株比例仅为4.7%;轻度冻害(1级)和中度冻害(2级)冻害株主要发生在坡中和坡底,重度冻害(3级)和严重冻害(4级)冻害株主要发生在坡中。

(3) 树高级H_i和冠幅级CW_i均易遭受冻害,冻株比例均为43.4%,树高级H₂和冠幅级CW₂均不易遭受冻害,冻株比例分别为0.1%和2.9%。同一坡位不同树高级和冠幅级冻害株比例差异显著($P<0.05$)。

(4) 全部冻害株与胸径和冠幅有较强的关联性,均达到显著相关水平($P<0.05$);冻害等级与野核桃个体生长特征(胸径、树高、冠幅)和坡位大多呈显著相关($P<0.05$)。

参考文献(References):

- [1] 张志祥,刘鹏,邱志军,等.浙江九龙山自然保护区黄山松种群冰雪灾害干扰及其受灾影响因子分析[J].植物生态学报,

- 2010, 34(2): 223–232. [Zhang Zhixiang, Liu Peng, Qiu Zhijun, et al. Factors influencing ice and snow damage to *Pinus taiwanensis* in Jiulongshan Nature Reserve, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(2): 223–232.]
- [2] Bojorquez A, Martinez-Yrizar A, Alvarez-Yepiz J C. A landscape assessment of frost damage in the north most Neotropical dry forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2021, 308: 108562.
- [3] 杨晓东, 阎恩荣, 张志浩, 等. 浙江天童常绿阔叶林演替阶段共有种的树木构型[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7): 611–619. [Yang Xiaodong, Yan Enrong, Zhang Zhihao, et al. Tree architecture of overlapping species among successional stages in evergreen broad-leaved forests in Tiantong region, Zhejiang Province, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 37(7): 611–619.]
- [4] 李宗英, 罗庆辉, 许仲林. 西天山雪岭云杉林分密度对森林生物量分配格局和异速生长的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 545–552. [Li Zongying, Luo Qinghui, Xu Zhonglin. Effects of stand density on the biomass allocation and tree height-diameter allometric growth of *Picea schrenkiana* forest on the northern slope of the western Tianshan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 545–552.]
- [5] 符利勇, 孙华, 张会儒, 等. 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2434–2443. [Fu Liyong, Sun Hua, Zhang Huiru, et al. Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese Fir under different canopy density conditions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2434–2443.]
- [6] 徐雅雯, 吴可可, 朱丽蓉, 等. 中国南方雨雪冰冻灾害受损森林植被研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1485–1494. [Xu Yawen, Wu Keke, Zhu Lirong, et al. A review of freezing rain and snow impacts on forests in southern China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6): 1485–1494.]
- [7] 朱鸿伟. 森林生态系统的抗冰冻灾害能力研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011. [Zhu Hongwei. The Research of the Anti Freeze Disaster Ability of Forest Ecosystem[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.]
- [8] 鲁元波, 严成, 宋春武, 等. 天山南坡山前荒漠草地植物群落分布对环境因子的响应——以拜城县为例[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1346–1357. [Lu Yuanbo, Yan Cheng, Song Chunwu, et al. Response of plant community distribution in the pre-montane desert grassland on the southern slope of Tianshan Mountain to environmental factors: A case study in Baicheng County[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1346–1357.]
- [9] 周红, 雷晓英, 袁晓霞, 等. 蓝田核桃种植气候适宜性和气象灾害研究[J]. 陕西气象, 2021(5): 63–67. [Zhou Hong, Lei Xiaoying, Yuan Xiaoxia, et al. Study on climate suitability and meteorological disasters of walnut planting in Lantian[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2021(5): 63–67.]
- [10] 王一峰, 赵淑玲, 庞世伟, 等. 2018年成县核桃晚霜冻害调查与分析[J]. 陕西林业科技, 2018, 46(3): 32–35. [Wang Yifeng, Zhao Shuling, Pang Shiwei, et al. Investigation on freezing damage to walnut tree in Cheng County in 2018[J]. Shaanxi Forst Science and Technology, 2018, 46(3): 32–35.]
- [11] 张新时. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题[J]. 植物学报, 1973, 15(2): 239–253. [Zhang Xinshi. On the eco-geographical characters and the problems of classification of the wild fruit tree forest in the Yili valley of Xinjiang[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1973, 15(2): 239–253.]
- [12] 曾斌. 新疆野生核桃资源的现状与发展[J]. 北方果树, 2005(4): 1–3. [Zeng Bin. Status and development of wild walnut resources in Xinjiang[J]. Northern Fruits, 2005(4): 1–3.]
- [13] 王博, 巴雪瑞, 黎一阳, 等. 坡向与龄级对新疆野核桃自然保护区野核桃病害的影响[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 39–46. [Wang Bo, Ba Xuerui, Li Yiyang, et al. Effects of slope aspect and age class on diseases of *Juglans regia* in Wild Walnut Nature Conservation Area of Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 39–46.]
- [14] 董玉芝, 朱小虎, 陈虹, 等. 新疆巩留野核桃林调查及其分析[J]. 植物遗传资源学报, 2012, 13(3): 386–392. [Dong Yuzhi, Zhu Xiaohu, Chen Hong, et al. Investigation and analysis on the wild walnut in Gongliu, Xinjiang[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13(3): 386–392.]
- [15] 张维, 李海燕, 崔东, 等. 新疆野核桃自然保护区不同坡向野核桃幼苗种群年龄结构及生长特征[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 382–390. [Zhang Wei, Li Haiyan, Cui Dong, et al. Age structure and growth characteristics of *Juglans cathayensis* seedling populations at different slope aspects in Wild Walnut Natural Conservation Area of Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(2): 382–390.]
- [16] 张维, 努尔买买提, 焦子伟, 等. 新疆野核桃自然保护区被子植物的生态结构分析[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 76–86. [Zhang Wei, Nuer Maimaiti, Jiao Ziwei, et al. Analysis of the ecological structure of angiosperm composition in *Juglans cathayensis* in the Natural Conservation Area of Xinjiang, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(4): 76–86.]
- [17] 张维, 李海燕, 赖晓辉, 等. 新疆天山峡谷不同坡向野核桃种群分布格局[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3105–3113. [Zhang Wei, Li Haiyan, Lai Xiaohui, et al. Distribution patterns of *Juglans cathayensis* populations at different slope aspects in Tianshan valley in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(10): 3105–3113.]
- [18] Zhang W, Yang Y F, Li J D. Static life table and growth analysis of seedlings of *Juglans mandshurica* in Xinjiang, China[J]. Austrian Journal For Science, 2015, 132(3): 131–144.
- [19] 魏海英, 黎一阳, 尚天翠, 等. 新疆野核桃自然保护区不同坡向分枝成株野核桃种群结构与动态[J]. 生态学杂志, 2023, 42(2): 266–273. [Wei Haiying, Li Yiyang, Shang Tiancui, et al. Population structure and quantitative dynamics of *Juglans regia* individu-

- als generating from branches in different slope directions in Wild Walnut Natural Conservation Area in Xinjiang, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(2): 266–273.]
- [20] 张捷. 新疆野核桃 SRAP 遗传多样性分析与核心种质的构建[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015. [Zhang Jie. Research on Genetic Diversity and Construction of Core Germplasm by SRAP in Xinjiang *Juglans regia*[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.]
- [21] 李勤霞, 张萍. 新疆野核桃 F1 表型性状与 SSR 标记连锁分析[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(9): 41–45. [Li Qinxia, Zhang Ping. Linkage analysis of F1 phenotypic traits and SSR labeling in Xinjiang *Juglans regia*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(9): 41–45.]
- [22] 徐德炎. 新疆野核桃生态气候特征的研究[J]. 生态学杂志, 1989, 8(4): 24–27. [Xu Deyan. Study on the ecological and climatic characteristics of *Juglans regia* in Xinjiang[J]. Chinese Journal of Ecology, 1989, 8(4): 24–27.]
- [23] 徐少君, 曾波, 苏晓磊, 等. 基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究[J]. 生态学报, 2012, 32(7): 2174–2184. [Xu Shaojun, Zeng Bo, Su Xiaolei, et al. Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2174–2184.]
- [24] Diaz S, Mercado C, Alvarez-Cardenas S. Structure and population dynamics of *Pinus lagunae* MF. Passini[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 134: 249–256.
- [25] Lieberman M, Lieberman D. Age-size relationships and growth behavior of the palm *Welfia georgii*[J]. Biotropica, 1988, 20(4): 270–273.
- [26] 樊江斌, 张金龙, 许新平, 等. 陕西 2013 年核桃晚霜冻害发生情况调查与分析[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(5): 120–124. [Fan Jiangbin, Zhang Jinlong, Xu Xinping, et al. An investigation on frozen damage of walnut trees in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(5): 120–124.]
- [27] 薛恒新, 罗静贤, 霍春平, 等. 秦岭山区核桃晚霜冻害与预防[J]. 林业实用技术, 2014(6): 41–45. [Xue Hengxin, Luo Jingxian, Huo Chunping, et al. Late frost damage and prevention of walnut in Qinling mountains[J]. Forestry Practical Technology, 2014(6): 41–45.]
- [28] Vitasse Y, Lenz A, Korner C. The interaction between freezing tolerance and phenology in temperate deciduous trees[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 541.
- [29] Lenz A, Hoch G, Vitasse Y. Fast acclimation of freezing resistance suggests no influence of winter minimum temperature on the range limit of European beech[J]. Tree physiology, 2016, 36: 490–501.
- [30] Vitra A, Lenz A, Vitasse Y. Frost hardening and dehardening potential in temperate trees from winter to budburst[J]. New Phytologist, 2017, 216(1): 113–123.
- [31] 张敏欢, 王建成, 杨红兰, 等. 新疆野核桃种质对低温胁迫的生理响应[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2558–2566. [Zhang Minhuan, Wang Jiancheng, Yang Honglan, et al. Physiological response of Xinjiang wild walnut germplasm to low temperature stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2558–2566.]
- [32] Auslander M, Nevo E, Inbar M. The effects of slope orientation on plant growth, developmental instability and susceptibility to herbivores[J]. Journal of Arid Environments, 2003, 55(3): 405–416.
- [33] 金一兰, 朱羚, 燕亚媛, 等. 坡位对群落系统发育多样性的影响——以锡林郭勒典型草原为例[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 363–369. [Jin Yilan, Zhu Ling, Yan Yayuan, et al. Effect of slope position on phylogenetic diversity of plant community: A case study in the Xilingol typical steppe[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 363–369.]
- [34] 陈波涛, 张国腾, 李昆. 贵州小桐子特大雨雪冰冻低温灾害调查研究报告[J]. 林业科学研究, 2008, 21(4): 506–509. [Chen Botao, Ou Guoteng, Li Kun. Investigation report on the damage of *Jatropha curcas* in Guizhou Province caused by the extraordinarily freezing rain and snow weather[J]. Forest Research, 2008, 21(4): 506–509.]
- [35] 石建周, 刘贤德, 田青, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 594–604. [Shi Jianzhou, Liu Xiande, Tian Qing, et al. Rainfall response of soil water content on a slope of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid Liupan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 594–604.]
- [36] 陈杰. 冰冻灾害对黄冕林场桉树人工林影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. [Chen Jie. Research on the Effect of Freezing Disaster on Eucalyptus Plantation[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.]
- [37] 史元春, 赵成章, 宋清华, 等. 兰州北山侧柏株高与冠幅、胸径异速生长关系的坡向差异性[J]. 生态学杂志, 2015, 34(7): 1879–1885. [Shi Yuanchun, Zhao Chengzhang, Song Qinghua, et al. Allometric relationship between height and crown width or diameter of *Platycladus orientalis* on different slope aspects of Lanzhou northern mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(7): 1879–1885.]

Characterization of the freezing injury to *Juglans regia* at different slope positions in the West Tianshan valley of Xinjiang, China

LIU Huaqing¹, WANG Bo², JIA Yanyan¹, XIE Xinran¹, ZHANG Wei^{1,3}

(1. College of Biological Science and Technology, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China;

2. College of Resources and Environment, Yili Normal University, Yining 835000, Xinjiang, China; 3. Key

Laboratory of Plant Resources Protection and Utilization in Xinjiang Yili Valley, Yining 835000, Xinjiang, China)

Abstract: Severe freezing injury has a significant impact on the growth and development of walnuts (*Juglans regia*), even leading to plant death in some cases. This study employed the sample method to examine the freezing injury to *J. regia* in the Wild Walnut Nature Reserve located in the West Tianshan valley in Xinjiang. The distribution characteristics of freezing injury among *J. regia* were analyzed, and the influence of tree height, crown width, and slope position on the extent of freezing injury was investigated. The results indicated that (1) the total freezing injury rate of *J. regia* was 87.1%. Among these, the proportion of plants with grade 2 freezing injury was the largest (43.4%), followed by grade 1 (22.5%), grade 3 (17.5%), and grade 4 (3.7%). (2) the proportion of freezing injury in *J. regia* plants was the largest in the middle of slope (46.5%), followed by the bottom (35.9%), and the top (4.7%); the proportion of uninjured plants was the maximum at the top of slope (7.4%), followed by the bottom (3.3%), and the middle (2.2%). (3) the proportion of freezing injured plants in the six height classes (H) was most prominent in H₁ (43.4%), followed by H₄ (19.5%), H₆ (17.0%), H₅ (15.7%), H₃ (4.3%), and H₂ (0.1%). (4) the proportion of freezing injured plants in the six crown width classes (CW) was most extensive in CW₁ (43.4%), followed by CW₄ (22.1%), CW₃ (20.3%), CW₅ (9.5%), CW₂ (2.9%), and CW₆ (1.8%). (5) the proportion of freezing injured plants in different H and CW classes at the same slope position differed significantly ($P < 0.05$). Plants with grade 1 and 2 freezing injuries were mainly restricted to the middle and bottom of the slope, and those with grade 3 and 4 injuries to the middle. (6) freezing injury in plants was markedly correlated with diameter at breast height ($P < 0.05$) and extremely negatively correlated with CW ($P < 0.01$). Most *J. regia* plants in the Reserve suffered from freezing injury, and the proportions of freezing injury grades varied conspicuously among the different slope positions and different H and CW classes. The results of this study provide a scientific reference for the management of the Wild Walnut Nature Reserve and the prevention of freezing injury in *J. regia*.

Keywords: *Juglans regia*; freezing injury; tree height; crown width; slope position; Xinjiang