广西植物 Guihaia Jan. 2026, 46(1): 86-97 http://www.guihaia-journal.com

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202501006

陈文龙, 依里帆·艾克拜尔江, 张雨思, 等, 2026. 环境因子与新疆野苹果幼苗生长和存活的相关性分析 [J]. 广西植物, 46(1): 86-97.

CHEN W L, AKBERJAN Erfan, ZHANG Y S, et al., 2026. Correlation analysis of environmental factors with the growth and survival of *Malus sieversii* seedlings [J]. Guihaia, 46(1): 86-97.

环境因子与新疆野苹果幼苗生长和存活的相关性分析

陈文龙[1], 依里帆·艾克拜尔江[2,3], 张雨思[1], 米尔卡米力·麦麦提[4], 依米热尼·艾米尔[1], 李冬红[1], 田中平[1*]

(1. 新疆师范大学 生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆西天山国家级自然保护区管理中心, 新疆 伊宁 835000; 3. 新疆西天山森林生态系统定位观测研究站, 新疆 巩留 835400; 4. 喀什大学 生命与地理科学学院, 新疆 喀什 844000)

摘 要: 幼苗期是资源植物整个生活史中最脆弱的时期,也是对外界环境变化最敏感的时期。然而,以往的研究在探讨植物幼苗的生长和存活时,主要依赖于气象站提供的宏观气候数据,未能充分考虑林下微气候的动态变化对幼苗生长的潜在影响。该研究以国家二级重点保护野生植物新疆野苹果(*Malus sieversii*)为研究对象,通过连续 3 年和监测其幼苗和微气候,并结合林下土壤酸碱度、草本盖度和林冠郁闭度等环境因子的调查,探究生物和非生物环境因子对新疆野苹果幼苗生长和存活的影响。结果表明:(1) 生长季平均温度和土壤湿度的增加,有助于提高幼苗存活率并促进生长,并且生长季平均温度与新疆野苹果幼苗的叶片数呈显著的正效应。(2) 土壤酸碱度是影响新疆野苹果幼苗的死亡率与存活率最重要的环境因子,其贡献率均是 47.6%。(3) 林冠郁闭度作为影响幼苗株高、基径和叶片数的关键因子,其贡献率分别达到了 32.5%、61.0%和 52.4%,并且幼苗性状随着郁闭度的增加而呈现出下降的趋势。(4) 生长季平均温度是影响幼苗盖度的最重要环境因子,其贡献率是 39.5%。综上认为,新疆野苹果幼苗的生长和存活主要受林冠郁闭度及其林下温度和土壤酸碱度的影响,在后期的保护与管理中应重点关注这些环境因子。该研究为新疆野苹果资源的科学保护与管理提供了理论依据。

关键词: 野果林, 新疆野苹果, 幼苗, 微气候, 土壤酸碱度

中图分类号: Q948.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2026)01-0086-12

Correlation analysis of environmental factors with the growth and survival of *Malus sieversii* seedlings

CHEN Wenlong[1], AKBERJAN Erfan[2,3], ZHANG Yusi[1], MAIMAITI Mierkamili[4], AIMIER Yimireni[1], LI Donghong[1], TIAN Zhongping[1*]

收稿日期: 2025-04-29 **接受日期:** 2025-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(31901096); 新疆维吾尔自治区高校科研计划自然科学项目(XJEDU2019Y034); 新疆师范大学青年拔尖人才项目(XJNUQB2023-11); 新疆师范大学博士科研启动基金(XJNUZBS2427)。

第一作者: 陈文龙(2000—),硕士研究生,主要从事植物生态学研究,(E-mail)cwl18574468713@163.com。

*通信作者: 田中平,博士,副教授,主要从事保护生态学研究,(E-mail)zhongping006@xjnu.edu.cn。

(1. *Xinjiang Key Laboratory of Special Species Conservation and Regulatory Biology*, *College of Life Sciences*, *Xinjiang Normal University*, Urumqi 830017, China; 2. *Xinjiang Administration Center of West Tianshan National Nature Reserve*, Yining 835000, Xinjiang, China; 3. *Xinjiang West Tianshan Forest Ecosystem Observation and Research Station*, Gongliu 835400, Xinjiang, China; 4. *College of life and Geographic Sciences*, *Kashi University*, Kashi 844000, Xinjiang, China)

Abstract: The seedling stage is the most vulnerable and environmentally sensitive period in the life history of plant resources. However, previous studies on the growth and survival of plant seedlings mainly relied on the macroclimate data provided by meteorological stations, but failed to fully consider the potential impacts of dynamic changes in the understory microclimate on seedling growth. In this study, *Malus sieversii*, the second-class key protected wild plants in China, was used as the research object. The effects of biotic and abiotic environmental factors on the growth and survival of seedlings for *M. sieversii* were investigated by monitoring their seedlings and microclimate for three consecutive years, and combining with the investigation of environmental factors such as soil pH, herbaceous coverage and canopy cover. The findings provide a theoretical foundation for the scientific conservation and management of this wild plant resource. The results were as follows: (1) The increase of mean temperature and mean soil moisture of growing season was helpful to improve the survival rate and promote the growth of seedlings, and the mean temperature of growing season had a significant positive effect on leaf number of seedlings for *M. sieversii*. (2) Soil pH was the most important environmental factor for the death rate and survival rate of seedlings for *M. sieversii*, and the contribution rate was 47.6%. (3) Canopy cover was the key factor affecting the height, basal diameter and leaf number of seedlings, and the contribution rates were 32.5%, 61.0% and 52.4%, respectively. Furthermore, the seedling traits had a downward trend with the increase of canopy cover. (4) The mean temperature of growing season was the most important environmental factor affecting seedling coverage, and its contribution rate was 39.5%. In all, canopy cover, understory temperature and soil pH mainly affect the growth and survival of *M. sieversii* seedlings, which should be focused on in the later protection and management. This study provides a theoretical basis for the scientific protection and management of *M. sieversii* in Xinjiang.

Key words: wild fruit forest, *Malus sieversii*, seedling, microclimate, soil pH

资源植物的保护需要理解植物每一个生活史阶段对环境的响应(Bialic-Murphy et al., 2024)。幼苗期是资源植物整个生活史中最脆弱的时期,也是对外界环境变化最敏感的时期(Clark & Clark, 1989)。幼苗的建立和存活在群落演替和多样性以及分布方面起着重要作用(Kuang et al., 2017)。有研究表明,生物因子对幼苗的生长和存活起着决定性作用(Harms et al., 2000)。在温带和亚热带的研究表明,气候因子对幼苗的生长存在较大影响,并有助于预测群落对不断变化环境的响应(Song et al., 2018; Uriarte et al., 2018)。此外,幼苗是林下植被的组成部分,通常受林冠层的保护,并与林下微气候紧密相连(图 1)(de Frenne & Verheyen, 2016; de Frenne et al., 2019; Sanczuk et al., 2023)。微气候可以缓冲宏气候的变化,忽视它可能会高估物种对气候变暖的响应(Scherrer et al., 2011)。若仅依赖宏观数据,可能低估林下温度的季节性波动,导致对幼苗热胁迫风险的误判。反之,若林冠郁闭度过高,林下长期低温可能抑制光合作用,而宏观数据无法捕捉此类局部低温效应。然而,以往的研究在探讨植物幼苗的生长和存活时,主要依赖于气象站提供的宏观气候数据,而未能充分考虑林下微气候的动态变化对幼苗生长的潜在影响(de Frenne & Verheyen, 2016)。关于微气候是如何影响幼苗的生长和存活,特别是微气候相对于其他环境因子的作用知之甚少。

植物幼苗的生长和存活受到生物和非生物因素的综合作用。林下的温度和湿度通过形成特有的微气候条件来调节幼苗的生长(Zellweger et al., 2020)。对长白山阔叶红松林的研究表明,红松幼苗的生物量和非结构性碳水化合物在春季和秋季显著增加,而在夏季降低,表明林下的温湿度条件会影响幼苗的生长速率和生物量的分配(周光等, 2021)。不同的土壤温度和水分条件对川西云杉幼苗的氮磷含量产生了影响,尤其是在低温干旱条件下,幼苗的氮磷含量不足,限制川西云杉的垂

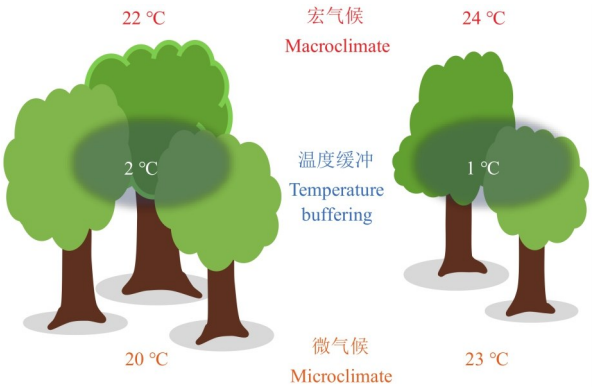


图 1 林上宏气候和林下微气候的温度差异（改自 Zellweger 等，2020）

Fig. 1 Temperature difference between overstory macroclimate and understory microclimate (modified from Zellweger et al., 2020)

直分布(申静霞等,2019)。此外,林冠郁闭度通过影响光照进而导致微环境的变化,光照是幼苗更新的主要环境因素,其对幼苗生长的影响在很大程度上决定了幼苗能否在森林中存活(Yin et al., 2023)。再则,适宜的土壤 pH 值促进了养分的有效利用和根系的健康扩展。在紫金山的研究表明,土壤 pH 值在微生物群落构建中发挥着关键作用(Liu et al., 2021),其通过影响微生物群落来间接影响植物生长。除了非生物环境因素,生物间相互作用,尤其是草本植物与幼苗之间的竞争关系,对幼苗的存活与生长产生重要影响。草本植物与幼苗竞争光照、水分和土壤养分,这些竞争在资源有限的环境中尤为显著(Chen & Nelson, 2020)。因此,理解生物和非生物环境因子如何单独及共同影响幼苗的生长和存活,对于理解种群更新机制至关重要。

天山野果林是世界果树资源的天然基因库,也是国家珍贵的战略生物资源,具有较高的繁育价值、经济价值和生态系统服务的功能(张新时, 1973; Velasco et al., 2010)。新疆野苹果(*Malus sieversii*)、野核桃(*Juglans Regia*)和野杏(*Prunus armeniaca*)等野果树种既是中亚野果林的建群种,也是现代栽培苹果、核桃和杏等的祖先种(Lapeña et al., 2014),具有高产、优质、抗病虫、抗逆境等优质基因,对培育安全、高产和营养充足的栽培品种有着重要的繁育价值(Eastwood et al., 2019)。因而,天山野果林被认为是沧海桑田世代变迁的一颗“遗珠”,在果木品种改良方面有着无可替代的作用。天山野果林地处中亚生物多样性热点区域(Tian et al., 2022),在地貌格局上呈现独特的“逆温带”现象:冬季受西风环流带来的湿润气流影响,在山体中部形成稳定逆温层,显著缓解了极端低温对植物的胁迫;夏季则依托坡地地形,形成昼夜温差显著、光照充足的局地气候特征。这种特殊的气候环境与黄土母质发育的灰钙土共同构成了全球独特的果树适生区。近 30 年来,人类活动和气候变化的双重影响(如林下放牧与农田开垦、病虫害暴发、气候干旱等),使得天山野果林生态系统受损严重,新疆伊犁新源县的野果林出现了成片、大量的衰败和死亡现象,局部地区死亡率高达 80%,成为近现代有名的生态灾难事件(米尔卡米力·麦麦提等,2021)。鉴于天山野果林重大的生态与经济价值,对其优势种及其幼苗采取合理且有效的保护对我国乃至中亚的生态安全与可持续发展具有重要意义。

新疆野苹果作为资源植物,其自然生境遭受了严重退化,干旱气候的持续影响使得新疆野苹果的生长和自然更新面临重重挑战,自我恢复能力显著下降(米尔卡米力·麦麦提等,2021)。新疆野苹果已被列为国家二级重点保护野生植物(国家林业和草原局,中华人民共和国农业农村部,2021),并被国际自然保护联盟(IUCN)评为“易危”种(IUCN, 2007)。有研究表明,新疆野苹果对环境适应的主要压力来自气温条件的变化,该地区气温在夏季和冬季显著上升,到 21 世纪末,这两个季节的气温分别上升 5.0 ℃ 和 5.4 ℃(Liu et al., 2020),对新疆野苹果的生长影响较大(Tian et al., 2022)。生理适应可能是其响应环境胁迫的主要机制(张宏祥等,2022)。若仅依赖宏气候数据,可能低估林下温度的季节性波动,导致对幼苗热胁迫风险的误判(de Frenne & Verheyen, 2016)。此外,不同水平的氮添加对新疆野苹果幼苗的枝叶大小有显著影响,中氮处理可以促进小枝茎的伸长,而高氮处理则会降低出叶强度(华兆晖等,2022)。再则,新疆野苹果幼苗的生长及生物量分配也会对降水量和降水间隔时间产生响应(张宗芳等,2023)。然而,限制新疆野苹果幼苗生长和存活的关键环境因子仍不清楚。鉴于此,本研究拟探讨:(1)影响新疆野苹果幼苗生长特征的

环境效应；(2)影响新疆野苹果幼苗生长特征环境效应的相对重要性；(3)新疆野苹果幼苗生长特征随关键生物和非生物环境因子的变化趋势。

1　材料与方法

1.1 研究区概况

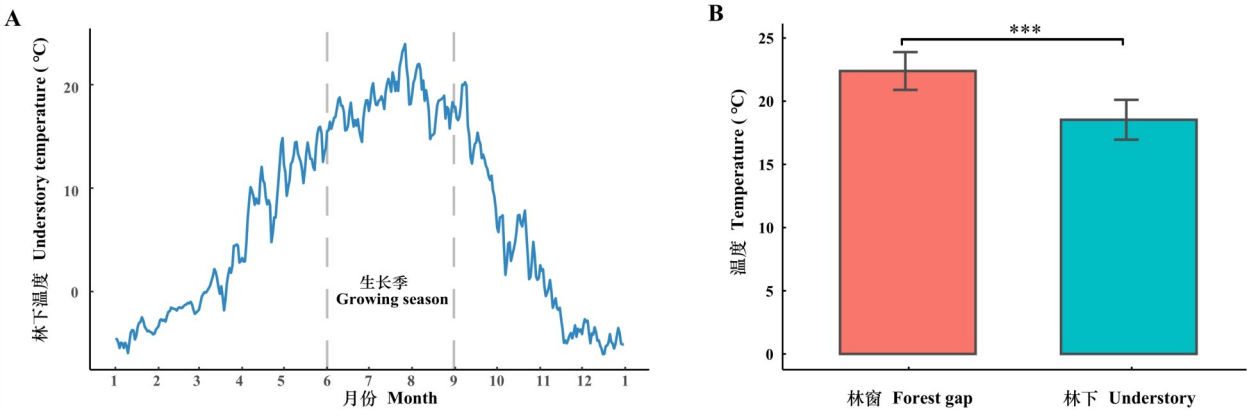
研究区(82°15′—82°17′E、43°03′—43°23′N)位于新疆伊犁巩留县境内的野核桃沟自然保护区和西天山国家级自然保护区。该区域属于温带大陆性气候，夏季较热，冬少严寒，气候温和，空气湿润，年均气温 7.4 ℃，年均降水量 256 mm，无霜期约为 145 d(张苹等，2019；石亚丹等，2022)。新疆野苹果主要分布于山地阴坡及河流两岸，林内还伴生其他树种、灌木及草本植物，包括野核桃、野杏、天山花楸(*Sorbus tianschanica*)、天山桦(*Betula tianschanica*)、樱桃李(*Prunus cerasifera*)、异果小檗(*Berberis heteropoda*)、准噶尔山楂(*Crataegus songarica*)、新疆忍冬(*Lonicera tatarica*)等木本植物，以及荨麻(*Urtica fissa*)、鸭茅(*Dactylis glomerata*)等草本植物(张宗芳，2022；买苏旦·买苏提等，2023)。

1.2 样地设置和调查

于 2020 年 9 月沿海拔梯度建立新疆野苹果种群动态监测样地，共设置 13 个 20 m × 20 m 样地，其中 4 个位于西天山国家级自然保护区，9 个位于野核桃沟自然保护区。将每个样地划分为 4 个 10 m × 10 m 的木本样方，并在样地内设置 4 个 2 m × 2 m 的草本样方，调查草本植物盖度(herbaceous coverage，HC)。对样地内木本植物开展每木调查并挂牌编号，测量株高小于 1.3 m 的植株幼苗性状(株高、基径、叶数和盖度)。2020 年至 2023 年对新疆野苹果林下幼苗生长情况共进行 3 次复查，记录幼苗的生长和死亡情况，并对新生幼苗挂牌标记并测量株高、基径、叶数和盖度。记录和测定样地三类非生物环境因子：(1)林冠郁闭度(canopy cover，CC)；(2)土壤因子，包括土壤酸碱度(pH)；(3)微气候，包括生长季平均温度(mean temperature of growing season，MTGS)和生长季平均土壤湿度(mean soil moisture of growing season，MMGS)。郁闭度主要通过鱼眼镜头拍摄，并通过 Canopeo 软件提取郁闭度。关于土壤样品，将每个 10 m × 10 m 的样方的中心作为 1 个土壤取样点，在每个取样点取 3 份表层土壤(0 ~ 20 cm)混合为 1 个样品，取回的土壤过 2 mm 的筛后进行土壤养分分析。通过在土壤中安装温湿度传感器(TMS)，连续 3 年监测微气候数据。每隔 15 min 记录地下 6 cm 处土壤的温度和湿度、地面温度以及地上 12 cm 处的温度(Wild et al.，2019)。根据林下微气候在 1 年中的波动变化和林下与林窗生长季平均温度的差异(图 2)，发现林下与林窗的温度差异表现为极显著，因此选择适宜幼苗生长的生长季林下微气候进行分析，最终选取 2020 年 9 月至 2023 年 9 月的生长季平均温度和生长季平均土壤湿度等环境因子用于分析(表 1)。

1.3 数据处理分析

对幼苗的每个生长特征建立 1 个单独模型，用于理解生物(草本植物盖度)和非生物因子(林下微气候、林冠郁闭度以及土壤因子)对新疆野苹果幼苗存活、死亡、株高、基径、叶片数和盖度的影响。广义加性模型(generalized additive models，GAM)是广义线性模型的扩展，无需对响应函数的形状有先验知识，可以较好地拟合自变量与因变量之间的非线性关系(Pedersen et al.，2019)。因此，本研究使用 GAM 来理解新疆野苹果幼苗随环境因子的变化趋势。广义线性混合效应模型(generalized linear mixed models，GLMM)是 1 种用于分析具有复杂数据结构的统计方法，结合了固定效应和随机效应，扩展了标准线性模型的应用范围，能够有效地处理分组数据中的内部相关性(Bolker et al.，2009；Bates et al.，2015)。考虑到样地之间的随机变异，本研究使用广义线性混合效应模型来理解环境变量对幼苗生长特征的影响。幼苗的存活率、死亡率和生长特征为响应变量，5 种环境因子(草本植物盖度、郁闭度、土壤酸碱度、生长季平均温度和生长季平均土壤湿度)为固定效应，样地作为随机效应。此外，为了理解影响新疆野苹果幼苗生长特征环境因子的相对重要性，本研究使用“glmm.hp”(hierarchical partitioning of marginal R^2 for generalized mixed-effect models，glmm.hp)包来评估广义线性混合模型中预测变量的相对重要性。计算每个固定效应对广义线性混合效应模型的边际 R^2 的单独贡献，用于计算广义线性混合效应模型中预测变量的个体效应，边际 R^2 能够反映固定效应在解释因变量变异中的独立贡献，有助于评估每个环境因子对幼苗生长和存



A. 1 年中林下温度的变化趋势；**B**. 林下与林窗生长季平均温度的差异。*** 表示 $P<0.001$。

A. The change trend of understory temperature in one year; **B**. The difference between understory and forest gap of mean temperature of growing season. *** indicates $P<0.001$.

图 2 林下微气候特征

Fig. 2 Characteristics of understory microclimate

表 1 样地环境因子基本特征

Table 1 Basic characteristics of environmental factors in plots

样地编号 Plot No.	草本植物盖度 Herbaceous coverage	林冠郁闭度 Canopy cover	土壤酸碱度 Soil pH	生长季平均温度 Mean temperature of growing season (℃)	生长季平均土壤湿度 Mean soil moisture of growing season (%)
P1	104.25	0.18	6.97	21.21	26.15
P2	144.50	0.18	7.32	20.87	25.15
P3	86.50	0.33	7.39	19.36	31.28
P4	163.15	0.04	7.20	20.40	17.93
P5	182.98	0.35	7.14	17.77	27.76
P6	132.55	0.28	7.06	17.53	34.54
P7	137.00	0.05	7.37	19.06	32.64
P8	156.00	0.44	7.22	16.64	35.42
P9	92.08	0.17	6.68	17.73	27.55
WTM10	141.28	0.04	6.59	16.86	34.49
WTM11	160.05	0.20	6.91	17.04	32.78
WTM12	142.75	0.33	7.67	17.29	34.49
WTM13	173.88	0.12	7.66	19.17	28.82

注：**P**. 野核桃沟保护区样地；**WTM**. 西天山保护区样地。

Note: **P**. The plot in the Wild Walnut Valley Reserve; **WTM**. The plot in the West Tianshan Reserve.

活的重要性(Lai et al., 2022)。以上数据处理和分析使用 R 语言中的“lme4”(Bates et al., 2015)、“glmm.hp”(Lai et al., 2022)和“mgcv”(Pedersen et al., 2019)包完成。使用“ggplot2”(Villanueva & Chen, 2019)包完成制图。所有统计分析与制图均在 R 4.4.1 中完成。

2　结果与分析

2.1 影响新疆野苹果幼苗生长特征的环境效应

分析环境因子对新疆野苹果幼苗生长特征的影响结果(图 3)发现,土壤酸碱度、生长季平均温度、生长季平均土壤湿度与幼苗死亡率呈负效应,与幼苗存活率呈正效应,而草本植物盖度和林冠郁闭度与幼苗死亡率呈正效应,与幼苗成活率呈负效应。在非生物环境因子当中,林冠郁闭度对幼苗生长特征呈负效应;生长季平均温度对幼苗叶片数有显著的促进作用,对幼苗的株高、基径和盖度存在一定的正效应关系;生长季平均土壤湿度对幼苗的株高、基径、叶片数存在正效应关系,而对幼苗盖度存在负效应关系;土壤酸碱度对幼苗的株高、基径存在一定的抑制效应,对幼苗叶片数和盖度几乎没有影响。生物环境因子的草本植物盖度对新疆野苹果幼苗生长特征的影响不显著。

2.2 影响新疆野苹果幼苗生长特征环境因子的相对重要性

分析影响新疆野苹果幼苗生长特征环境因子的相对重要性,结果(图 4)发现,土壤酸碱度对新疆野苹果幼苗的死亡率与存活率是最重要的,其贡献率均是 47.6%;林冠郁闭度是影响新疆野苹果幼苗株高、基径和叶片数的最重要环境因子,其贡献率分别是 32.5%、61.0%和 52.4%;生长季平均温度是影响幼苗盖度的最重要环境因子,其贡献率是 39.5%。

2.3 新疆野苹果幼苗生长特征随关键环境因子变化的趋势

通过模型拟合新疆野苹果幼苗生长特征随关键环境因子的变化趋势,结果(图 5)发现,土壤 pH 与幼苗死亡率呈负相关,与幼苗存活率呈正相关。随着林冠郁闭度的增加,幼苗的株高、基径和叶片数呈减小的趋势。幼苗盖度随着生长季平均温度的增加而增加。

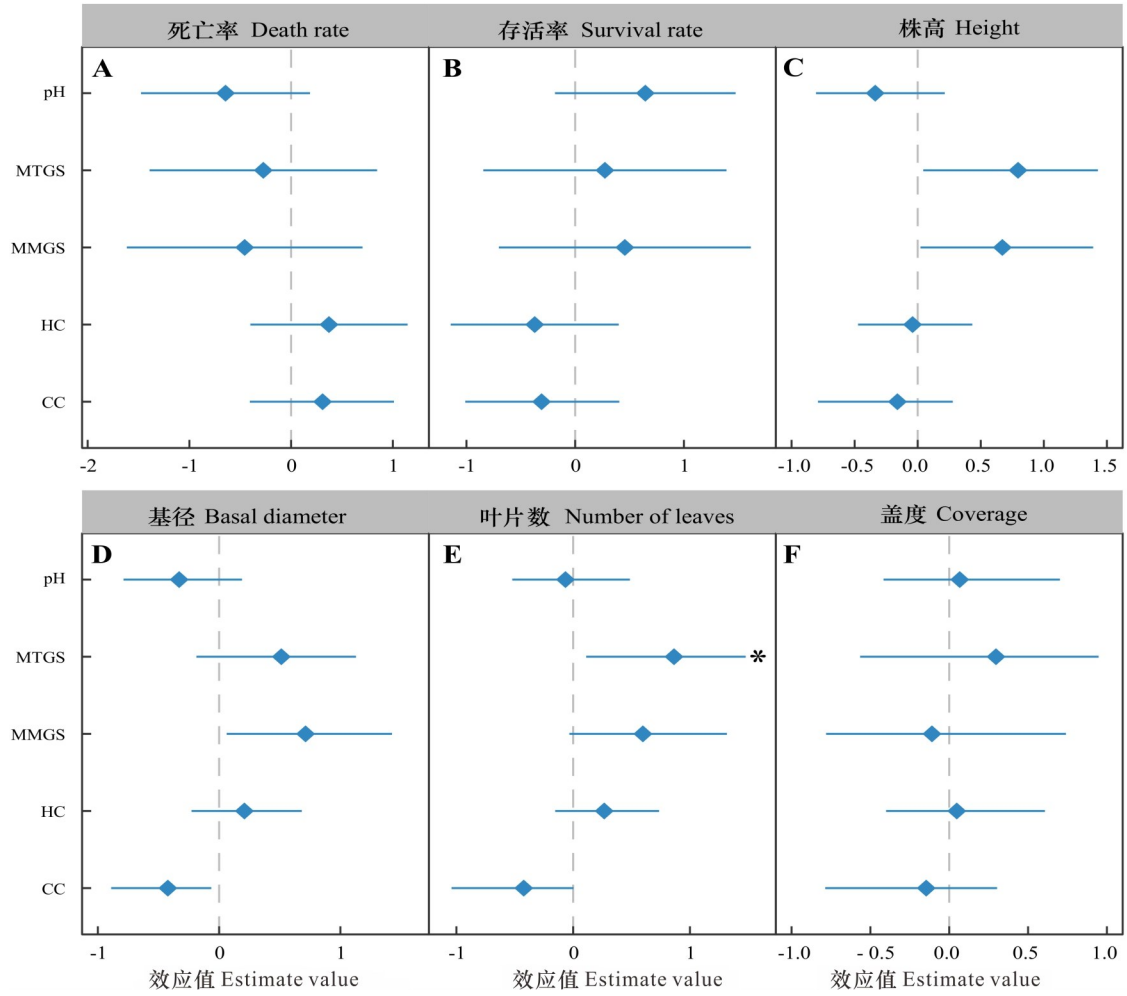
3　讨论

3.1 草本植物对幼苗生长和存活的影响

新疆野苹果幼苗的生长和存活受非生物因子与生物因子的协同调控,草本植物作为生物因子对幼苗的影响围绕着两种相互作用——促进和抑制(Loranger et al., 2017)。草本植物对木本幼苗的抑制作用机制主要包括:(1)光资源竞争。草本层通过截获林下有限的光照抑制幼苗生长(邱华等,2020)。(2)生境资源竞争。当草本植物占据优势生态位时,剩余资源(如水分、养分)的减少会限制幼苗更新(Gilliam et al., 1995)。(3)化感作用。部分草本植物通过释放化感物质抑制幼苗的形态建成(Cummings et al., 2012)。本研究发现草本植物盖度与新疆野苹果幼苗的存活率和株高呈负效应。这与 Franco 等(2022)的研究结果一致,即优势草本植物盖度会抑制原生木本植物幼苗的生长。值得注意的是,本研究中草本植物盖度对幼苗存活率的负效应未达到显著性水平,这与温带湿润森林的研究结果存在差异。这种差异与研究区域的植被分布特征和植物本身的生长特征有关。在伊犁河谷,草本层盖度较高,能降低土壤蒸发速率,在干旱条件下形成局部水分缓冲,从而部分抵消水资源竞争的压力(邹慧等,2016;买苏旦·买苏提等,2023)。本研究还发现草本植物盖度与新疆野苹果幼苗的死亡率、基径、叶片数和幼苗盖度呈正效应。在干旱和半干旱区的大背景下,密集的草本层通过降低土壤温度和减少蒸发,维持土壤水分,形成有利于幼苗水分保持的微气候环境(Loranger et al., 2017)。本研究样地内的草本植物较高,能有效降低地表风速和阳光直射,从而支持幼苗叶片的生长和扩展。此外,草本植物通过凋落物分解,向土壤中释放有机质和养分,促进幼苗茎的加粗(Liu et al., 2021)。再则,新疆野苹果幼苗根系发达,其可通过深层根系获取水分,从而规避与浅根性草本植物的表层资源竞争,进而对幼苗的生长与存活起到相应的促进作用(Parker et al., 2009)。

3.2 非生物环境因子对幼苗生长的影响

幼苗期是植物生活史中对环境胁迫最敏感的发育阶段,幼苗的生长会受其所在生境条件的影响(Yao et al., 2020)。在全球变暖的大环境下,林冠层减缓了气候变暖对幼苗的影响(Zellweger et al., 2020)。本研究发现,生长季平均温度和生长季平均土壤湿度与幼苗存活率、株高、基径和叶片数均呈现出正效应,并且生长季平均温度是影响幼苗盖度的最重要环境因子。在现有的微气候条件下, 新疆野苹果幼苗呈现出良好的生长趋势。



pH. 土壤酸碱度；**MTGS**. 生长季平均温度；**MMGS**. 生长季平均土壤湿度；**HC**. 草本植物盖度；**CC**. 林冠郁闭度。A-F 分别为死亡率、存活率、株高、基径、叶片数、盖度。下同。* 表示 $P<0.05$。

pH. Soil pH; **MTGS**. Mean temperature of growing season; **MMGS**. Mean soil moisture of growing season; **HC**. Herbaceous coverage; **CC**. Canopy cover. A-F are the death rate, survival rate, height, basal diameter, number of leaves and coverage, respectively. The same below. * indicates $P<0.05$.

图 3 环境因子对新疆野苹果幼苗生长的影响

Fig. 3 Effects of environmental factors on the growth of *Malus sieversii* seedlings

该结果与温度通过增强光合速率(Du et al., 2019)从而促进生物量积累(杜英军等,2024)的生理机制相吻合。适宜温度能够增强植物的光合速率,从而提高幼苗的生物量积累。温度的升高可以提高光合作用相关酶的活性,促进碳同化过程,为幼苗的生长提供更多的能量和物质基础(张礼宏等,2020)。同时,在降水充足的伊犁河谷区域,土壤湿度能保持在一定的范围,适宜的土壤湿度能提高植物对水分的利用效率,降低幼苗水分亏损,减少水分胁迫对幼苗的负面影响,从而支持幼苗根系的发育(Korell et al., 2021;杨慧,2024)。

土壤酸碱度是评估土壤健康和肥力的重要指标之一,在本研究的 13 个样地中,土壤酸碱度的范围为 6.59~7.67,土壤酸碱度与新疆野苹果幼苗的死亡率、株高、基径和叶片数呈负效应。可能的原因是土壤酸碱度会限制新疆野苹果幼苗的分布,幼苗适合生长在偏中性的环境,这与新疆伊犁河谷野果树种的研究结果相似,新疆野苹果幼苗的多度会随着 pH 值的上升而增加(田中平,2023)。此外,有研究表明,在中性至微碱性土壤中,氮和磷的溶解度较高,有助于植物的吸收和利用(连旭东等,2023),进而促进根系发展,提高幼

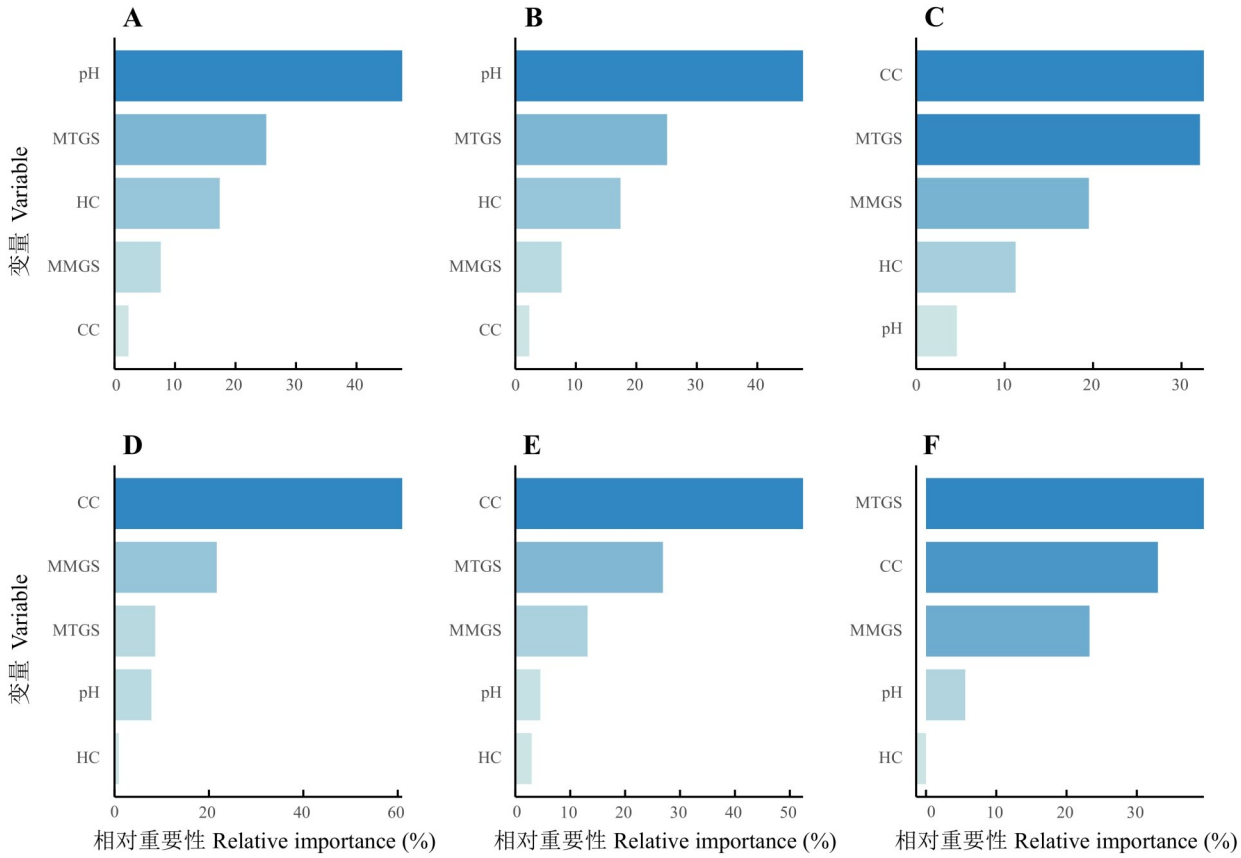


图 4　影响新疆野苹果幼苗生长特征环境变量的相对重要性

Fig. 4　Relative importance of environmental variables on the growth characteristics of *Malus sieversii* seedlings

苗存活率(Bai et al., 2012)。再则,土壤 pH 是影响微生物群落构建的关键因素(Liu et al., 2021),微生物群落的变化可进一步影响植物的养分吸收和抗逆性,从而影响植物的存活和生长。然而,本研究并未对土壤微生物群落进行分析,这为未来研究提供了一个重要方向。这些结果表明,迫切需要对新疆野苹果分布区域土地利用变化进行评估,并对土壤和幼苗进行长期监测,以揭示土壤酸碱度变化对新疆野苹果幼苗生长的综合影响机制。

林冠郁闭度会影响到达地面的直射光,从而影响幼苗的受光照面积、光照强度和光质量(de Lombaerde et al., 2020),林冠还可以通过调节光照来影响林下空气和土壤的温湿度(周光等,2021)。本研究中,林冠郁闭度与幼苗的死亡率、株高、基径、叶片数和盖度都呈负效应,并且林冠郁闭度是影响野苹果幼苗株高(贡献率 32.5%)、基径(贡献率 61.0%)和叶片数(贡献率 52.4%)的关键环境因子,但对于幼苗存活的相对贡献最低。当前的林冠环境不适合野苹果幼苗的生长,产生这种负效应的原因是多方面协同作用的结果,其内在生理机制与光资源竞争策略密切相关,林冠郁闭度的增加会导致光合作用减弱,尽管林冠层通过调节空气温湿度及缓冲极端气候事件为幼苗提供了相对稳定的微气候条件(Meeussen et al., 2021),但林冠郁闭度增加引发的光资源衰减效应,对幼苗光合生理产生了系统性制约,当冠层透光率低于幼苗光补偿点时,其净光合速率将显著下降,进而影响幼苗的生长速度和生物量分配(McIntire et al., 2016; Xu et al., 2023)。此外,本研究通过野外调查发现,大部分新疆野苹果幼苗存在病虫害现象。除光资源限制外,较高的林冠郁闭度可能导致林下空气流通性降低,加剧病原菌的危害(张宗芳等,2023)。

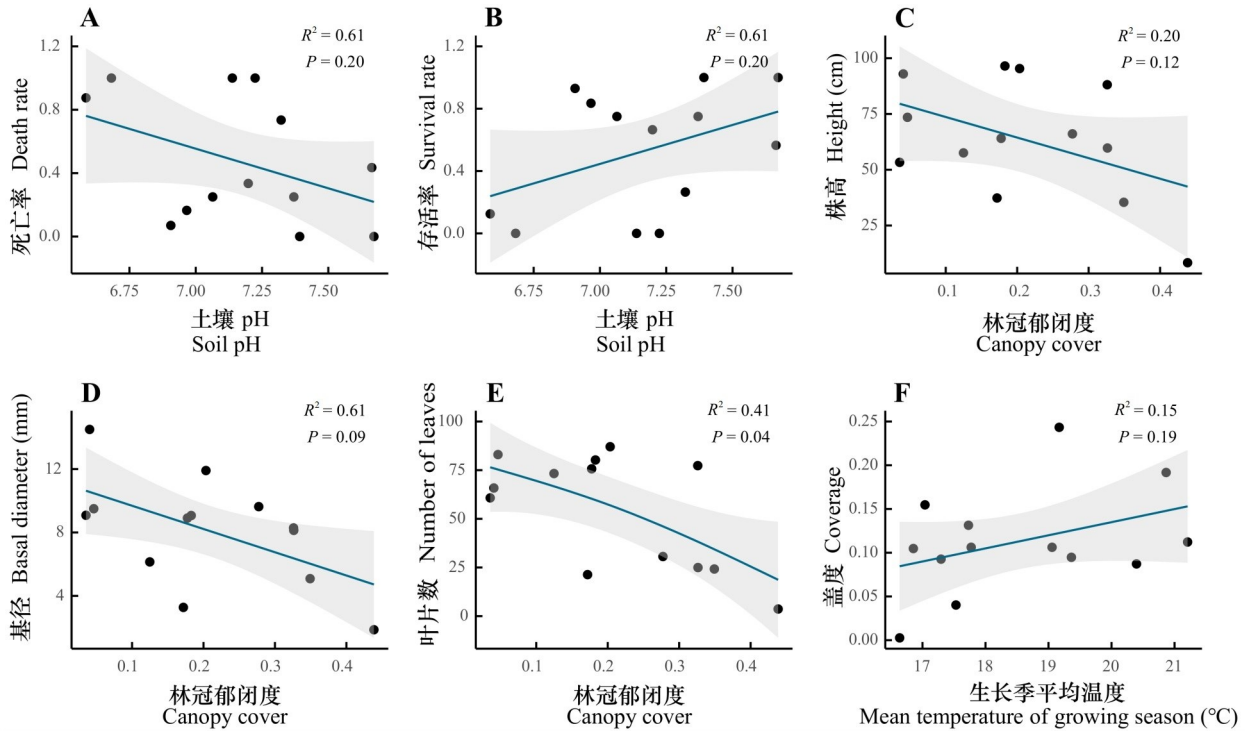


图 5 新疆野苹果幼苗生长特征随环境因子变化的趋势

Fig. 5 Change trends of the growth characteristics of *Malus sieversii* seedlings with environmental factors

3.3 对未来新疆野苹果幼苗管理的建议

本研究通过对新疆野苹果幼苗生长环境因子的深入分析,发现生物因子、土壤因子、光照和微气候在不同方面不同程度上影响着新疆野苹果幼苗的生存和生长。特别是林冠郁闭度、生长季平均温度、生长季平均土壤湿度、草本植物盖度及土壤酸碱度等因子对幼苗的存活和生长产生影响。基于此,我们提出以下针对新疆野苹果林恢复及其幼苗管理的具体建议:(1)在幼苗抚育阶段,应合理控制林冠郁闭度,建议将郁闭度控制在 40%以下。通过间伐、修剪等措施调节林分结构,确保适量的光照穿透林冠,从而避免高郁闭度导致的光抑制效应,同时维持林下空气流通,降低病原菌侵染概率(杨旭等,2013)。(2)在人工补植新疆野苹果幼苗时,应选择适宜的季节,将土壤湿度控制在 30%左右,温度控制在 19 ℃左右,通过合理灌溉保持土壤湿润,有效减少土壤温度的波动,进而增强幼苗对环境的适应能力,降低幼苗的死亡风险。(3)新疆野苹果适宜生长在近中性(pH 6.8~7.8)的环境,在人工补植幼苗时,应选择近中性的土壤进行补植,并且长期观测土壤 pH 值的变化,当 pH 值偏移适生范围时,可通过施加腐殖酸进行缓冲调节。(4)在幼苗定居初期,应合理规划草本植物与幼苗的空间布局,避免资源的过度竞争,适当减少草本植物盖度,可以为幼苗提供更加多样化的微环境,从而促进幼苗的存活和生长。

本研究对环境因子和幼苗的监测时间有限,无法完全反映长期的环境变化对新疆野苹果幼苗生长的影响。虽然本研究考虑了多种环境因子,但是仍有其他未被考虑的因素,如母树的制约效应(Harms et al., 2000)、土壤营养(文艺瑶等,2024)、地形地貌(赵雪等,2013;徐耀粘等,2020)、放牧干扰(López-Sánchez et al., 2014)等,这些因素也可能对幼苗的生长产生重要影响。同时,影响新疆野苹果幼苗生长的因素并不是某一个单一因素,而是多种因素共同作用的结果,环境因素的交互作用对幼苗生长的影响有待于进一步研究。未来的研究可以进一步扩大样本量,结合长期定位观测与控制实验,考虑更多的环境因子,

以期获得更全面、更准确的研究结果，为新疆野苹果的保护和管理提供科学依据。

致谢　感谢所有调查人员在野外调查和数据收集方面提供的帮助。感谢海拔梯度生物多样性网络（BEST，https://BEST-mountains.org）的支持。

参考文献：

BAI X J, QUEENBOROUGH S A, WANG X G, et al., 2012. Effects of local biotic neighbors and habitat heterogeneity on tree and shrub seedling survival in an old-growth temperate forest [J]. Oecologia, 170(3): 755-765.

BATES D, MÄCHLER M, BOLKER B, et al., 2015. Fitting linear mixed-effects models using lme4 [J]. Journal of Statistical Software, 67(1): 1-48.

BIALIC-MURPHY L, MCELDERRY R M, ESQUIVEL-MUELBER A, et al., 2024. The pace of life for forest trees [J]. Science, 386(6717): 92-98.

BOLKER B M, BROOKS M E, CLARK C J, et al., 2009. Generalized linear mixed models: a practical guide for ecology and evolution [J]. Trends in Ecology & Evolution, 24(3): 127-135.

CHEN C, NELSON A S, 2020. Growth and mortality of planted interior Douglas-fir and western larch seedlings during the establishment phase in Idaho, USA [J]. Forest Ecology and Management, 474: 118386.

CLARK D B, CLARK D A, 1989. The role of physical damage in the seedling mortality regime of a neotropical rain forest [J]. Oikos, 55: 225-230.

CUMMINGS J A, PARKER I M, GILBERT G S, 2012. Allelopathy: a tool for weed management in forest restoration [J]. Plant Ecology, 213(12): 1975-1989.

DE FRENNE P, VERHEYEN K, 2016. Weather stations lack forest data [J]. Science, 351(6270): 234.

DE FRENNE P, ZELLWEGER F, RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ F, et al., 2019. Global buffering of temperatures under forest canopies [J]. Nature Ecology & Evolution, 3(5): 744-749.

DE LOMBAERDE E, BLONDEEL H, BAETEN L, et al., 2020. Light, temperature and understorey cover predominantly affect early life stages of tree seedlings in a multifactorial mesocosm experiment [J]. Forest Ecology and Management, 461: 117907.

DU J, LI K, HE Z B, et al., 2019. Age-mediation of tree-growth responses to experimental warming in the northeastern Tibetan Plateau [J]. Ecology and Evolution, 9(4): 2242-2254.

DU Y J, LI S J, WANG L, et al., 2024. Responses of radial growth of *Fraxinus mandshurica* from different provenances to climate at Maoershan in Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 35(5): 1159-1168. [杜英军，李士杰，王丽，等，2024. 东北地区帽儿山种源实验林区不同种源水曲柳径向生长对气候的响应 [J]. 应用生态学报，35(5)：1159-1168.]

EASTWOOD A, LAZKOV G, NEWTON A C, 2019. The red list of trees of central Asia [M]. Cambridge: Fauna and Flora International.

FRANCO J R A, PATERNO G B, GANADE G, 2022. The influence of herbaceous vegetation on the colonization of native and invasive trees: consequences for semiarid forest restoration [J]. Restoration Ecology, 30(5): e13595.

GILLIAM F S, TURRILL N L, ADAMS M B, 1995. Herbaceous-layer and overstory species in clear-cut and mature central Appalachian hardwood forests [J]. Ecological Applications, 5(4): 947-955.

HARMS K E, WRIGHT S J, CALDERON O, et al., 2000. Pervasive density-dependent recruitment enhances seedling diversity in a tropical forest [J]. Nature, 404: 493-495.

HUA Z H, TAO Y, YAN J M, et al., 2022. Effects of different levels of nitrogen addition on leaf-stem sizes of *Malus sieversii* seedlings [J]. Arid Zone Research, 39(1): 210-219. [华兆晖，陶冶，闫景明，等，2022. 氮添加对新疆野苹果幼苗枝叶大小的影响 [J]. 干旱区研究，39(1)：210-219.]

IUCN, 2007. *Malus sieversii* The IUCN Red List of Threatened Species [OL]. (2007-03-01) [2024-12-15]. https://www.iucnredlist.org/species/32363/9693009.

KORELL L, AUGE H, CHASE J M, et al., 2021. Responses of plant diversity to precipitation change are strongest at local spatial scales and in dry lands [J]. Nature Communications, 12: 2489.

KUANG X, ZHU K, YUAN Z Q, et al., 2017. Conspecific density dependence and community structure: Insights from 11 years of monitoring in an old-growth temperate forest in Northeast China [J]. Ecology and Evolution, 7(14): 5191-5200.

LAI J S, ZOU Y, ZHANG S, et al., 2022. glmm.hp: an R package for computing individual effect of predictors in generalized linear mixed models [J]. Journal of Plant Ecology, 15(6): 1302-1307.

LAPEÑA I, TURDIEVA M, NORIEGA I, et al., 2014. Conservation of fruit tree diversity in Central Asia: policy options and challenges [M]. Rome: Bioversity International.

LIAN X D, ZHANG L, LIU S R, et al., 2023. Response of crop yield to soil pH and the influencing factors [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 29(9): 1618-1629. [连旭东，张璐，刘思汝，等，2023. 作物产量对土壤 pH 的响应差异及其影响因素 [J]. 植物营养与肥料学报，29(9)：1618-1629.]

LIU X, YANG T, SHI Y, et al., 2021. Strong partitioning of soil bacterial community composition and co-occurrence networks along a small-scale elevational gradient on Zijin Mountain [J]. Soil Ecology Letters, 3(4): 290-302.

LIU Y, GENG X, HAO Z X, et al., 2020. Changes in climate extremes in central Asia under 1.5 and 2 ℃ global warming and their impacts on agricultural productions [J].

Atmosphere, 11(10): 1076.

LÓPEZ-SÁNCHEZ A, SCHROEDER J, ROIG S, et al., 2014. Effects of cattle management on oak regeneration in northern Californian Mediterranean oak woodlands [J]. PLoS ONE, 9(8): e105472.

LORANGER H, ZOTZ G, BADER M Y, 2017. Competitor or facilitator? The ambiguous role of alpine grassland for the early establishment of tree seedlings at treeline [J]. Oikos, 126(11): 1625-1636.

MAIMAITI M, LIU Z Q, MA X D, et al., 2021. Survival status, problems and conservation strategies of *Malus sieversii* [J]. Guihaia, 41(12): 2100-2109. [米尔卡米力·麦麦提, 刘忠权, 马晓东, 等, 2021. 新疆野苹果的生存现状、问题及保护策略 [J]. 广西植物, 41(12): 2100-2109.]

MAISUTI M, ZHANG J Z, ZHANG Z C, et al., 2023. Microclimate and soil nutrients drive the elevational patterns of species diversity of herbaceous plants in the Ili Valley, Xinjiang, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 29(6): 1318-1330. [买苏旦·买苏提, 张际昭, 张昭臣, 等, 2023. 微气候和土壤营养共同驱动新疆伊犁河谷山地草本植物物种多样性的海拔格局 [J]. 应用与环境生物学报, 29(6): 1318-1330.]

MCINTIRE E J B, PIPER F I, FAJARDO A, 2016. Wind exposure and light exposure, more than elevation-related temperature, limit tree line seedling abundance on three continents [J]. Journal of Ecology, 104(5): 1379-1390.

MEEUSSEN C, GOVAERT S, VANNESTE T, et al., 2021. Microclimatic edge-to-interior gradients of European deciduous forests [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 311: 108699.

National Forestry and Grassland Administration & Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC, 2021. Announcement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the National Forestry and Grassland Administration (No. 15, 2021) (List of National Key Protected Wild Plant) [EB/OL]. (2021-09-08) [2024-12-15]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/10746.jhtml. [国家林业和草原局 中华人民共和国农业农村部, 2021. 国家重点保护野生植物名录 [OL]. (2021-09-08) [2024-12-15]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lczc/10746.jhtml.]

PARKER W C, PITT D G, MORNEAULT A E, 2009. Influence of woody and herbaceous competition on microclimate and growth of eastern white pine (*Pinus strobus* L.) seedlings planted in a central Ontario clearcut [J]. Forest Ecology and Management, 258(9): 2013-2025.

PEDERSEN E J, MILLER D L, SIMPSON G L, et al., 2019. Hierarchical generalized additive models in ecology: an introduction with mgcv [J]. PeerJ, 7: e6876.

QIU H, SHU H, WU Z F, et al., 2020. Influencing factors of composition and abundance pattern of tree seedlings in broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest, Changbai Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 40(6): 2049-2056. [邱华, 舒皓, 吴兆飞, 等, 2020. 长白山阔叶红松林乔木幼苗组成及多度格局的影响因素 [J]. 生态学报, 40(6): 2049-2056.]

SANCZUK P, DE PAUW K, DE LOMBAERDE E, et al., 2023. Microclimate and forest density drive plant population dynamics under climate change [J]. Nature Climate Change, 13(8): 840-847.

SCHERRER D, SCHMID S, KÖRNER C, 2011. Elevational species shifts in a warmer climate are overestimated when based on weather station data [J]. International Journal of Biometeorology, 55: 645-654.

SHEN J X, YUAN X J, LI M H, et al., 2019. Effects of soil temperature and moisture on nitrogen and phosphorus contents in *Picea balfouriana* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 55(4): 31-41. [申静霞, 袁秀锦, 李迈和, 等, 2019. 土壤温度和水分变化对川西云杉幼苗氮和磷含量的影响 [J]. 林业科学, 55(4): 31-41.]

SHI Y D, BAYANDALA, YANG L P, et al., 2022. Study on the AMF diversity of the soils adjacent to two tree species in Gongliu wild fruit forest of Xinjiang [J]. Hunan Agricultural Sciences, 442(7): 38-41. [石亚丹, 巴音达拉, 杨丽萍, 等, 2022. 巩留野果林 2 种树种邻近土壤 AMF 多样性的研究 [J]. 湖南农业科学, 442(7): 38-41.]

SONG X Y, JOHNSON D J, CAO M, et al., 2018. The strength of density-dependent mortality is contingent on climate and seedling size [J]. Journal of Vegetation Science, 29(4): 662-670.

TIAN Z P, 2023. The patterns and drivers of wild fruit tree species diversity in the Ili Valley of Xinjiang, China [D]. Shanghai: East China Normal University: 70-75. [田中平, 2023. 新疆伊犁河谷野果树种多样性格局及其影响因素 [D]. 上海: 华东师范大学: 70-75.]

TIAN Z P, SONG H J, WANG Y Z, et al., 2022. Wild apples are not that wild: Conservation status and potential threats of *Malus sieversii* in the mountains of Central Asia biodiversity hotspot [J]. Diversity, 14(6): 489.

URIARTE M, MUSCARELLA R, ZIMMERMAN J K, 2018. Environmental heterogeneity and biotic interactions mediate climate impacts on tropical forest regeneration [J]. Global Change Biology, 24(2): e692-e704.

VELASCO R, ZHARKIKH A, AFFOURTIT J, et al., 2010. The genome of the domesticated apple (*Malus* × *domestica* Borkh.) [J]. Nature Genetics, 42(10): 833-839.

VILLANUEVA R A M, CHEN Z J, 2019. ggplot2: Elegant graphics for data analysis (2nd ed.) [J]. Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives, 17(3): 160-167.

WEN Y Y, ZHU J, WANG H, et al., 2024. Population characteristics of *Caragana microphylla* and the influencing soil factors in shrub-encroached grassland of Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 35(6): 1525-1533. [文艺瑶, 朱江, 王欢, 等, 2024. 内蒙古灌丛化草原小叶锦鸡儿的种群特征及其土壤影响因子

[J]. 应用生态学报, 35(6): 1525-1533.]

WILD J, KOPECKÝ M, MACEK M, et al., 2019. Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 268: 40-47.

XU C, DE FRENNE P, BLONDEEL H, et al., 2023. Light more than warming impacts understory tree seedling growth in a temperate deciduous forest [J]. Forest Ecology and Management, 549: 121496.

XU Y Z, LIU J M, WAN D, et al., 2020. Effects of canopy structure and topography on seedling species diversity in an evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest [J]. Plant Science Journal, 38(6): 733-742. [徐耀粘, 刘检明, 万丹, 等, 2020. 林冠结构和地形对亚热带常绿落叶阔叶林林下幼苗物种多样性和功能多样性的影响 [J]. 植物科学学报, 38(6): 733-742.]

YANG H, 2024. Effects of environmental factors on seed germination and seedling growth of seven xerophytic shrubs [D]. Yinchuan: North Minzu University: 28-31. [杨慧, 2024. 环境因子对 7 种旱生灌木种子萌发和幼苗生长的影响 [D]. 银川: 北方民族大学: 28-31.]

YANG X, YANG Z L, LEI X, et al., 2013. Characteristics and environmental interpretation of seedling regeneration in the endangered species *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 49(12): 36-42. [杨旭, 杨志玲, 雷琥, 等, 2013. 濒危植物凹叶厚朴幼苗更新及环境解释 [J]. 林业科学, 49(12): 36-42.]

YAO J, BACHELOT B, MENG L J, et al., 2020. Abiotic niche partitioning and negative density dependence across multiple life stages in a temperate forest in northeastern China [J]. Journal of Ecology, 108(4): 1299-1310.

YIN J, LIN F, DE LOMBAERDE E, et al., 2023. The effects of light, conspecific density and soil fungi on seedling growth of temperate tree species [J]. Forest Ecology and Management, 529: 120683.

ZELLWEGER F, DE FRENNE P, LENOIR J, et al., 2020. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming [J]. Science, 368(6492): 772-775.

ZHANG H X, WEN Z B, WANG Q, 2022. Population genetic structure of *Malus sieversii* and environmental adaptations [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 46(9): 1098-1108. [张宏祥, 闻志彬, 王茜, 2022. 新疆野苹果种群遗传结构及其环境适应性 [J]. 植物生态学报, 46(9): 1098-1108.]

ZHANG L H, ZHONG B Y, CHEN T T, et al., 2020. Effects of air and soil warming on aboveground phenology and growth of *Cunninghamia lanceolata* seedlings [J]. Acta Ecologica Sinica, 40(12): 4146-4156. [张礼宏, 钟波元, 陈廷廷, 等, 2020. 大气和土壤增温对杉木幼苗地上物候及生长的影响 [J]. 生态学报, 40(12): 4146-4156.]

ZHANG P, LÜ Z Z, ZHANG X, et al., 2019. Age structure of *Malus sieversii* population in Ili of Xinjiang and Kazakhstan [J]. Arid Zone Research, 36(4): 844-853. [张苹, 吕昭智, 张鑫, 等, 2019. 新疆伊犁与哈萨克斯坦新疆野苹果〔*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.〕种群年龄结构 [J]. 干旱区研究, 36(4): 844-853.]

ZHANG X S, 1973. On the eco-geographical characters and the problems of classification of the wild fruit-tree forest in the Ili Valley of Sinkiang [J]. Acta Botanica Sinica, 15(2): 239-253. [张新时, 1973. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题 [J]. 植物学报, 15(2): 239-253.]

ZHANG Z F, 2022. Study on sexual regeneration Limitation of *Malus sieversii* population [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University: 37-46. [张宗芳, 2022. 新疆野苹果种群有性更新限制研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学: 37-46.]

ZHANG Z F, XU J, SHI X J, 2023. Responses of seedling growth and biomass allocation of *Malus sieversii* to precipitation amount and precipitation interval [J]. Arid Zone Research, 40(1): 102-110. [张宗芳, 徐将, 师小军, 2023. 新疆野苹果幼苗生长及生物量分配对降水量和降水间隔时间的响应 [J]. 干旱区研究, 40(1): 102-110.]

ZHAO X, LIU Y Y, JIN G Z, 2013. Effects of topography on seedling regeneration in a mixed broadleaved-Korean pine forest in Xiaoxing'an Mountains, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 24(11): 3035-3042. [赵雪, 刘妍妍, 金光泽, 2013. 地形对阔叶红松林幼苗更新的影响 [J]. 应用生态学报, 24(11): 3035-3042.]

ZHOU G, XU W Z, WAN J, et al., 2021. Seasonal dynamics of energy and nutrients of *Pinus koraiensis* seedlings in different successional stages of broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 32(5): 1663-1672. [周光, 徐玮泽, 万静, 等, 2021. 长白山阔叶红松林不同演替阶段林下红松幼苗能量与养分季节动态 [J]. 应用生态学报, 32(5): 1663-1672.]

ZOU H, GAO G Y, FU B J, 2016. The relationship between grassland ecosystem and soil water in arid and semi-arid areas: a review [J]. Acta Ecologica Sinica, 36(11): 3127-3136. [邹慧, 高光耀, 傅伯杰, 2016. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展 [J]. 生态学报, 36(11): 3127-3136.]

（责任编辑　邓斯丽）