

DOI: 10.20103/j.stxb.202209132611

刘济萌, 刘贤德, 马瑞, 赵维俊, 敬文茂, 赵永宏. 祁连山排露沟流域青海云杉天然更新与土壤水热的关系. 生态学报, 2023, 43(23): 9891-9899.

Liu J M, Liu X D, Ma R, Zhao W J, Jing W M, Zhao Y H. Relationship between natural regeneration of *Picea crassifolia* and soil moisture and temperature in Pailugou watershed of Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9891-9899.

祁连山排露沟流域青海云杉天然更新与土壤水热的关系

刘济萌^{1,2}, 刘贤德^{1,2,*}, 马 瑞¹, 赵维俊², 敬文茂², 赵永宏³

1 甘肃农业大学林学院, 兰州 730070

2 甘肃省祁连山水源涵养林研究院, 张掖 734000

3 青海师范大学地理科学学院, 西宁 810016

摘要: 青海云杉是祁连山区森林生态系统的建群种, 其天然更新对维持祁连山森林生态系统功能具有重要意义。以祁连山排露沟流域青海云杉林天然更新为研究对象, 于 2021 年 6—9 月测定海拔 2700—3300m 的 0—40cm 土层土壤温度和水分数据, 并于 7 月中旬对样地天然更新进行每木检尺, 将天然更新划分为幼苗 (第一龄级) 阶段和幼树 (第二龄级) 阶段, 通过方差分析探究不同海拔更新苗胸径、株高的差异, 再进一步建立回归模型拟合更新苗胸径、株高与各层土壤水热的关系, 探讨更新苗胸径、株高对土壤水热的响应。结果表明: (1) 更新苗胸径、株高随海拔升高而降低, 海拔 2700m 幼苗胸径与 3300m 幼苗胸径存在显著性差异 ($P < 0.05$), 海拔 2700m、2800m 幼苗、幼树株高与 3300m 幼苗、幼树株高存在显著性差异 ($P < 0.05$), 幼树胸径在各海拔均不存在显著性差异, 表明更新苗胸径对海拔的敏感性要低于更新苗株高。 (2) 更新苗胸径、株高与土壤温度呈正相关, 与土壤水分呈负相关, 幼苗胸径与 20cm 土壤温度和土壤水分的相关系数最大, 幼树胸径与 40cm 土壤温度和土壤水分相关系数最大, 幼树株高与 40cm 土壤温度及 20cm 土壤水分相关系数最大。 (3) 回归模型显示幼苗胸径和株高对土壤水热的利用模式相同, 而幼树胸径和株高对土壤水热的利用模式存在差异。 (4) 青海云杉天然更新随着龄级的增加, 影响生长的主要因素由土壤温度逐渐变为土壤水分, 更新苗胸径对土壤水热的响应也随着龄级的增加在逐渐减弱。

关键词: 青海云杉; 天然更新; 土壤温度; 土壤水分

Relationship between natural regeneration of *Picea crassifolia* and soil moisture and temperature in Pailugou watershed of Qilian Mountains

LIU Jimeng^{1,2}, LIU Xiande^{1,2,*}, MA Rui¹, ZHAO Weijun², JING Wenmao², ZHAO Yonghong³

1 College of Forestry, Gansu Agriculture University, Lanzhou 730070, China

2 Water Sources Conservation Forests Research Institute of Qilianshan National Nature Reserve, Zhangye 734000, China

3 School of the Geographical Science, Qinghai Normal University, Xining 810016, China

Abstract: *Picea crassifolia* is an established species of forest ecosystem in Qilian Mountains, and its natural regeneration is of great significance for maintaining forest ecosystem function in Qilian Mountains. In this study, the natural regeneration of *P. crassifolia* forest in Pailugou watershed of Qilian Mountains was taken as the research object. The soil temperature and moisture of 0—40cm soil layer at an altitude of 2700—3300m were measured from June to September 2021, and the natural regeneration of the sample plots was examined by tally in mid-July. The natural regeneration was divided into seedling (first age class) stage and sapling (second age class) stage, and the differences in diameter at breast height (DBH) and plant height of new seedlings at different altitudes were explored by analysis of variance (ANOVA). Then, a regression model was

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060247); 省级林业和草原自列科技项目 (2022kj005); 国家自然科学基金项目 (U21A20468); 甘肃省中央引导地方科技发展资金项目 (22ZY2QG001)

收稿日期: 2022-09-13; **网络出版日期:** 2023-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxiande666@163.com

established to fit the relationship between DBH and plant height of new seedlings, soil temperature and soil moisture of each layer, and to explore the response of DBH and plant height of new seedlings to soil temperature and soil moisture. The results showed that: (1) the DBH and plant height of new seedlings decreased with the increase of altitude. There were significant differences in DBH between 2700m seedlings and 3300m seedlings ($P < 0.05$). The height of seedlings and saplings at 2700m and 2800m was significantly different from that at 3300m ($P < 0.05$). There was no significant difference in DBH of saplings at different altitudes, indicating that the DBH of new seedlings was less sensitive to altitude than height of new seedlings. (2) The DBH and plant height of new seedlings were correlated with soil temperature and soil moisture positively, while correlated with soil moisture negatively. The correlation coefficient between DBH of seedlings and soil temperature and moisture at 20cm was the highest. The correlation coefficient between DBH of saplings and soil temperature and moisture at 40cm was the highest. The correlation coefficient between height of saplings and soil temperature and moisture of at 40cm was the highest. (3) The regression model showed that the utilization patterns of soil water and temperature by DBH and plant height of seedlings were same, while the utilization patterns of soil temperature and soil moisture by DBH and plant height of saplings were different. (4) With increase of age class, the main factor affecting the growth of *P. crassifolia* natural regeneration gradually changed from soil temperature to soil moisture, and the response of DBH of new seedlings to soil water and temperature decreased gradually with the increase of age class.

Key Words: *Picea crassifolia*; natural renewal; soil temperature; soil moisture

在全球变暖背景下,随着各种极端天气强度和频次的增加,环境和生态安全问题已不容忽视^[1-2]。森林作为陆地生态系统的重要组成部分,在调节气候、涵养水源以及为众多生命提供食物和栖息场所等方面发挥着巨大作用^[3],其功能结构、数量动态以及物种多样性等方面健康与否关系着万千生命的生存与延续。祁连山森林生态系统作为我国西北生态安全屏障,连接着青藏、黄土和蒙新三大高原,不仅其自身发挥着水源涵养,防风固沙等作用,其延伸形成的草原和湿地也在减小沙尘暴、净化水质和调节气候等方面发挥着举足轻重的作用^[4-5]。同时,祁连山森林生态系统也属于生态脆弱带^[6-7],尤其在气候变化和人为扰动情况下变得更为脆弱和敏感,因此,研究其生态水文、种群更新等功能对维护祁连山生态安全、提升地区人民生活环境起着重要作用。

青海云杉(*Picea crassifolia*),是中国西北地区的特有树种,主要分布于我国甘肃、青海和宁夏等地区,作为祁连山森林的建群种,基本以纯林的形式存在,其林分结构较为单一,林下草本灌木较少,多以苔藓为主,抗逆和修复能力较弱,林木一旦遭到破坏,自我恢复极为困难。目前,部分学者对青海云杉也较为关注,刘兰娅等^[8]研究发现限制青海云杉径向生长的主要因素是水热,青海云杉的树轮随着温度的升高其生长会减缓,且海拔越高影响越大。拓锋等^[9]研究发现位于祁连山中段大野口流域的青海云杉在不受到较大扰动的情况下,其种群数量将呈现稳定上升的趋势,但较小龄级的植株死亡率较高。杜苗苗等^[10]发现祁连山中段的青海云杉在生长季限制其生长的主要因素是土壤水分,而祁连山东段的青海云杉由于气候较湿润因此仅在生长季前期受到土壤水分限制。王清涛等^[11]研究发现苔藓植物在恶劣的环境下对青海云杉更新有保育作用,在较好的环境条件下则抑制了青海云杉更新的生长发育。

本研究基于对祁连山排露沟流域青海云杉林的调查,研究其更新苗与土壤水热的关系,通过建立回归模型分析不同土壤层次的土壤水热如何影响更新苗的生长发育,其在影响更新苗的重要程度上的差异以及不同龄级更新苗之间对土壤水热的响应的模式。该研究旨在为进一步认识青海云杉更新机制,科学保护和管理青海云杉天然更新,并维持一个健康的种群数量动态提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山中段祁连山国家公园范围内的排露沟流域(100°17'0"—100°18'30"E, 38°32'0"—

38°33'30"N),流域面积为 68.06km²,海拔在 2540—4200m,地形复杂变化大,海拔落差较大。该区域气候属于典型大陆性高寒山地气候,年均气温 5.4℃,7 月为月均最高温月份达 19.6℃,12 月为月均最低温月份达 -12.5℃,年降水量 250—500mm,多集中于 5—9 月,年均相对湿度 60%,年蒸发量约为 1488mm^[12]。由于该区域内地形条件和水土条件复杂,植被和土壤类型沿海拔形成了较为明显的垂直分布带,土壤类型随海拔从低到高为山地栗钙土、山地灰褐土、高山草甸土、高山荒漠土;植被类型依次为山地荒漠植被、山地草原植被、山地森林草原植被、亚高山灌丛草甸植被以及高山冰雪植被。区内乔木树种较为单一,主要为青海云杉和祁连圆柏(*Sabina przewalskii*),作为建群种的青海云杉呈斑块状或条带状分布于海拔 2500—3300m 阴坡和半阴坡;主要灌木物种有吉拉柳(*Salix gilashanica*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)、箭叶锦鸡儿(*Caragana jubata*)、银露梅(*Potentilla glabra*)等;草本主要为针茅(*Stipa capillata*)、马蔺(*Iris lactea*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)等。

1.2 数据采集

实验样地依据不同海拔设置,分别在 2700、2800、2900、3100、3300m 每个海拔段选取 3 个 20m×20m 植被分布均匀,受人为活动影响较小的样地。土壤温湿度数据采集使用 Campbell cr310,在每个海拔段的样地附近设置 Campbell cr310 自动记录土壤温湿度,由于青海云杉为浅根系树种^[13-14],故将 Campbell cr310 的温湿度传感器按照 10、20、30、40cm 梯度进行埋设,频度为 30min 采集 1 次,同时由于青海云杉主要生长期在 6—9 月份^[15],参考田风霞等^[16]方法采集青海云杉更新苗生长期 6—9 月份的土壤温湿度。青海云杉种群龄级划分参考丁国民萍、陈银等^[17-18]分级方法,依据青海云杉胸径(DBH)大小将青海云杉胸径范围 0.0mm<DBH≤20mm 划分为第 1 龄级(幼苗),苗龄在 0—25 年,范围 20mm<DBH≤50mm 划分为第 2 龄级(幼树),苗龄在 25—35 年,并于 2021 年 7 月中旬到不同样地对更新苗进行每木检尺,对胸径>20mm 的更新苗测量其胸径,对胸径≤20mm 的更新苗测量其基径,记录下更新苗的相对坐标、胸径、冠幅、枝下高等信息。

1.3 数据处理

本研究采用更新苗的株高和胸径这两个生物指标,并对数据进行 Shapiro-Wilk 检验,结果符合正态分布。采用方差分析法分析处于不同海拔段的青海云杉幼苗、幼树特征,多重比较采用 scheffe 检验法,对生物指标与土壤温度、土壤水分的关系进行 Pearson 相关性分析并进行显著性检验。然后采用全子集回归法拟合出更新苗胸径和株高与土壤温度、湿度最佳模型,为降低使用 R^2 造成模型过拟合而丢失数据的偶然变异信息,故模型的评价指标采用调整 R^2 评价,再采用 5 折交叉验证法进行检验并评价模型的泛化能力以此选出最佳模型,根据这些模型再采用相对权重分析,得出土壤温度和水分如何影响更新苗的胸径和株高。数据的初步记录与整理利用 Microsoft Excel 2016 软件进行,数据的统计分析、制图均通过 RStudio 4.1.3 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同海拔更新苗胸径与株高特征

空间上对不同海拔更新苗的胸径和株高进行对比,如图 1 所示,在更新苗胸径方面 2700m 幼苗胸径的平均水平较高,2800m、2900m、3100m 和 3300m 胸径的平均水平较低,2700m、2800m 和 2900m 胸径波动较大,分布较为分散,3100m 和 3300m 胸径波动较小,分布较为集中。此外,仅 2700m 的幼苗胸径与 3300m 的幼苗胸径存在显著性差异($P<0.05$),其余海拔幼苗胸径差异均不显著。在幼树胸径中,其平均水平与幼苗平均水平分布基本相似,均是 2700m 平均水平较高,其余相差不大均较低。2900m 与 3100m 幼树胸径波动较小,分布较集中,2700m、2800m 和 3300m 胸径波动较大,分布较分散。幼树胸径在各海拔均不存在显著性差异。在更新苗株高方面,2700m 和 2900m 幼苗株高平均水平较高,2800m、3100m 和 3300m 株高平均水平较低,2700m、2800m 和 3100m 幼苗株高波动较小,分布较为集中,2900m 和 3300m 幼苗株高波动较大,分布较为分散,同时 2700m 出现较多异常值,分析认为,青海云杉龄级划分是按照胸径(DBH)而不是高度,少数幼苗高度较高所以产生出较多异常值,故予以保留。2700m 和 2800m 幼苗株高与 3300m 的幼苗株高存在显著性差异($P<$

0.05), 其余海拔幼苗株高均不存在显著性差异。幼树株高平均水平分布也与幼苗基本相似, 2700m 和 2900m 幼树株高平均水平较高, 其余平均水平较低, 2700m 和 2800m 幼树株高波动较大, 分布较为分散, 2900m、3100m 和 3300m 幼树株高波动较小, 分布较为集中。幼树株高差异性与幼苗相同, 也是 2700m 和 2800m 与 3300m 存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其余均不显著。

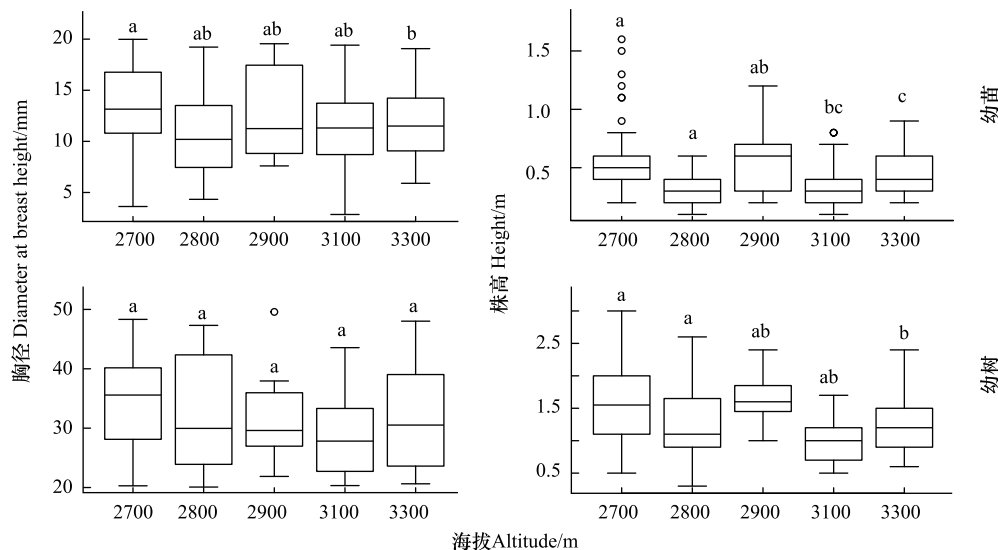


图1 不同海拔更新苗胸径和株高分布特征

Fig.1 Distribution characteristics of DBH and height of seedlings at different elevations

不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)

2.2 更新苗与土壤温度和水分的关系

更新苗生长过程中势必会受到土壤温度和湿度的影响, 对更新苗的胸径株高和土壤温度的相关性进行分析结果如表1所示。幼苗胸径与幼苗株高呈极显著正相关, 与幼树株高、20cm、30cm、40cm 土壤温度呈显著正相关, 与幼树胸径和 10cm 土壤温度的相关性未达到显著水平; 幼苗株高也与幼树株高、20cm、30cm、40cm 土壤温度呈显著正相关, 与幼树胸径和 10cm 土壤温度相关性不显著; 幼树胸径与幼树株高、10cm、20cm、30cm、40cm 土壤温度呈显著性相关; 而幼树株高与 10cm、20cm、30cm、40cm 土壤温度呈极显著相关; 土壤各层温度之间都呈极显著相关。幼苗胸径与 20cm、30cm、40cm 土壤温度相关系数大于幼树株高, 说明在对幼苗胸径的影响中土壤温度的影响较幼树株高的影响大; 幼苗株高与幼树株高、20cm、30cm、40cm 土壤温度的相关系数接近, 表明幼树的高度和土壤温度对幼苗高度的影响大致一样; 幼树胸径与各土层土壤温度的相关性都比较接近, 说明各土层土壤温度对幼树胸径影响差别不大; 幼树株高与各土层土壤温度都存在相关性, 但 30cm 土层相关性大于其它各层, 说明 30cm 土壤温度对幼树株高的影响较为关键; 各土层温度之间相关性都极强, 说明整个土壤温度变化趋势基本一致, 各土层土壤温度的滞后性极小或基本不存在。

更新苗胸径株高与土壤水分的相关性分析如表2所示。幼苗胸径与 20cm、40cm 土壤水分呈显著负相关, 与 10cm、30cm 土壤水分相关性不显著; 幼苗株高与各土层土壤水分相关性均不显著; 幼树胸径与 20cm、40cm 土壤水分呈显著负相关, 与 10cm、30cm 土壤水分相关性不显著; 幼树株高与各土壤水分均呈现极显著负相关; 各土层土壤水分之间均呈现极显著正相关。幼苗胸径和株高与土壤水分相关性均不如土壤温度的相关性强, 说明土壤温度对幼苗胸径株高的生长影响较大; 幼树株高与土壤温湿度的相关系数均大于其胸径与土壤温湿度的相关系数, 说明在幼树生长发育过程中, 土壤温湿度对其高度的影响较大。各土层土壤水分间 10cm 土壤水分的相关系数小于 20cm、30cm 和 40cm 间的相关系数, 说明表层土壤水分与较深层土壤水分变化趋势存在一定差异。

表 1 更新苗与土壤温度的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of seedlings with soil temperature

		幼苗 Seedling		幼树 Sapling		$T_{10\text{cm}}$	$T_{20\text{cm}}$	$T_{30\text{cm}}$	$T_{40\text{cm}}$
		胸径 Diameter at breast height	株高 Plant height	胸径 Diameter at breast height	株高 Plant height				
幼苗 Seedling	胸径	1							
	株高	0.803 **	1						
幼树 Sapling	胸径	0.186	0.129	1					
	株高	0.548 *	0.55 *	0.608 *	1				
	$T_{10\text{cm}}$	0.436	0.347	0.585 *	0.738 **	1			
	$T_{20\text{cm}}$	0.628 *	0.55 *	0.593 *	0.733 **	0.924 **	1		
	$T_{30\text{cm}}$	0.604 *	0.532 *	0.595 *	0.793 **	0.957 **	0.985 **	1	
	$T_{40\text{cm}}$	0.609 *	0.532 *	0.598 *	0.762 **	0.949 **	0.996 **	0.996 **	1

* 表示 $P<0.05$; ** 表示 $P<0.01$; $T_{10\text{cm}}$: 10cm 深度土壤温度; $T_{20\text{cm}}$: 20cm 深度土壤温度; $T_{30\text{cm}}$: 30cm 深度土壤温度; $T_{40\text{cm}}$: 40cm 深度土壤温度

表 2 更新苗与土壤湿度的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of seedlings with soil moisture

		幼苗 Seedling		幼树 Sapling		$\text{SW}_{10\text{cm}}$	$\text{SW}_{20\text{cm}}$	$\text{SW}_{30\text{cm}}$	$\text{SW}_{40\text{cm}}$
		胸径 Diameter at breast height	株高 Plant height	胸径 Diameter at breast height	株高 Plant height				
幼苗 Seedling	胸径	1							
	株高	0.803 **	1						
幼树 Sapling	胸径	0.186	0.129	1					
	株高	0.548 *	0.55 *	0.608 *	1				
	$\text{SW}_{10\text{cm}}$	-0.483	-0.437	-0.515	-0.662 **	1			
	$\text{SW}_{20\text{cm}}$	-0.507 *	-0.431	-0.582 *	-0.797 **	0.78 **	1		
	$\text{SW}_{30\text{cm}}$	-0.238	-0.172	-0.509	-0.724 **	0.696 **	0.932 **	1	
	$\text{SW}_{40\text{cm}}$	-0.594 *	-0.51	-0.588 *	-0.764 **	0.749 **	0.978 **	0.84 **	1

$\text{SW}_{10\text{cm}}$: 10cm 深度土壤水分; $\text{SW}_{20\text{cm}}$: 20cm 深度土壤水分; $\text{SW}_{30\text{cm}}$: 30cm 深度土壤水分; $\text{SW}_{40\text{cm}}$: 40cm 深度土壤水分

2.3 土壤温度、水分对更新苗的影响

为建立更新苗胸径、株高与土壤温湿度关系的最佳模型,通过使用全子集回归法对所有可能的模型进行检验并使用调整 R^2 来评估模型,进而选出所有拟合较好的模型,如图 2 所示。在幼苗胸径中,含 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分的模型调整 R^2 最大为 0.76;在幼苗株高中,含 10cm 土壤温度和 20cm、30cm 土壤水分的模型与含 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分以及含 20cm、30cm 土壤温度和 30cm 土壤水分的模型调整 R^2 均为 0.75;在幼树胸径中,仅含 40cm 土壤温度的模型调整 R^2 最大为 0.31;在幼树株高中,含 10cm 土壤温度和 20cm 土壤水分的模型调整 R^2 最大为 0.72。所选方程显著性检验除幼树胸径呈现显著水平外,其余方程均呈现极显著水平。通过 5 折交叉验证法检验所选模型,结果如表 3 所示。幼苗胸径由 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分影响, R^2 为 0.808;幼苗株高在 10cm 土壤温度和 20cm、30cm 土壤水分影响的回归方程中, R^2 为 0.805,在 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分影响的回归方程中, R^2 为 0.805,在 20cm、30cm 土壤温度和 30cm 土壤水分影响的回归方程中, R^2 为 0.801;幼树胸径仅由 40cm 土壤温度影响, R^2 为 0.357;幼树株高由 10cm 土壤温度和 20cm 土壤水分影响, R^2 为 0.761。所选回归方程经过 5 折交叉验证法检验后,幼苗胸径 R^2 为 0.76,改变量达 0.048;经检验后的幼苗株高 R^2 依次为 0.65、0.681 和 0.604,改变量达 0.155、0.124 和 0.197;检验后幼树胸径 R^2 为 0.249,改变量达 0.108;检验后的幼树株高 R^2 为 0.705,改变量达 0.056。

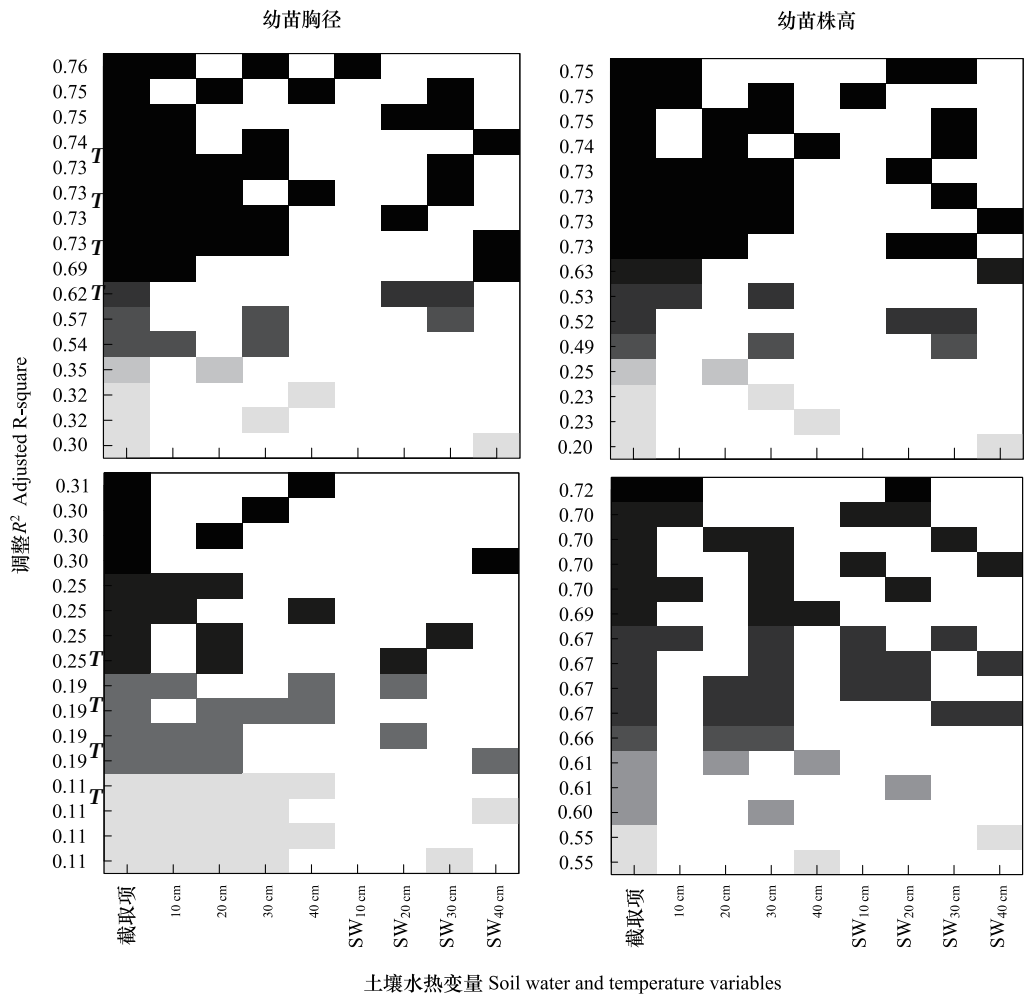


图 2 更新苗与土壤水热回归模型

Fig.2 Regression model of seedling with soil moisture and temperature

$T_{10\text{cm}}$:10cm 深度土壤温度; $T_{20\text{cm}}$:20cm 深度土壤温度; $T_{30\text{cm}}$:30cm 深度土壤温度; $T_{40\text{cm}}$:40cm 深度土壤温度; $SW_{10\text{cm}}$:10cm 深度土壤水分;
 $SW_{20\text{cm}}$:20cm 深度土壤水分; $SW_{30\text{cm}}$:30cm 深度土壤水分; $SW_{40\text{cm}}$:40cm 深度土壤水分

表 3 更新苗与土壤水热回归方程的 5 折交叉验证检验

Table 3 5 Fold cross-validated test of regression equation between seedling and soil moisture and temperature

	回归方程 Regression equations	R^2	5 折交叉验证 R^2 R-Square of 5-fold cross validation	改变量 Variations
幼苗 Seedling	胸径~ $T_{10\text{cm}}+T_{30\text{cm}}+SW_{10\text{cm}}$	0.808	0.76	0.048
	株高~ $T_{10\text{cm}}+SW_{20\text{cm}}+SW_{30\text{cm}}$	0.805	0.65	0.155
	株高~ $T_{10\text{cm}}+T_{30\text{cm}}+SW_{10\text{cm}}$	0.805	0.681	0.124
	株高~ $T_{20\text{cm}}+T_{30\text{cm}}+SW_{30\text{cm}}$	0.801	0.604	0.197
幼树 Sapling	胸径~ $T_{40\text{cm}}$	0.357	0.249	0.108
	株高~ $T_{10\text{cm}}+SW_{20\text{cm}}$	0.761	0.705	0.056

~:仅起连接作用,表示二者之间存在关系但还未确定变量具体系数

根据检验选出更新苗胸径株高与土壤温度土壤水分的最佳模型:

- (1) $DBH1 = 10.446 - 2.304T_{10\text{cm}} + 3.207T_{30\text{cm}} + 8.808SW_{10\text{cm}}$ ($R^2 = 0.808, P < 0.01$)
- (2) $H1 = 0.379 - 0.293T_{10\text{cm}} + 0.39T_{30\text{cm}} + 1.036SW_{10\text{cm}}$ ($R^2 = 0.805, P < 0.01$)
- (3) $DBH2 = 26.593 + 1.235T_{40\text{cm}}$ ($R^2 = 0.357, P < 0.05$)

$$(4) H2 = 6.213 - 0.508T_{10\text{cm}} - 5.667SW_{20\text{cm}} \quad (R^2 = 0.761, P < 0.01)$$

式中, DBH1 为青海云杉第一龄级胸径/mm、H1 为第一龄级高度/m、DBH2 为青海云杉第二龄级胸径/mm、H2 为第二龄级高度/m。在这些最佳模型的基础上, 进一步采用相对权重分析, 比较每个模型自变量的重要程度及其对模型方差的解释程度, 结果如表 4 所示。

表 4 各自变量对模型的解释率

Table 4 The interpretation of the different variables to the model

	回归方程 Regression equation	R^2	$T_{10\text{cm}}$	$T_{30\text{cm}}$	$T_{40\text{cm}}$	$SW_{10\text{cm}}$	$SW_{20\text{cm}}$	合计 Total
幼苗 Seedling	胸径	0.808	30.79%	46.91%		22.30%		100%
	株高	0.805	32.04%	46.23%		21.73%		100%
幼树 Sapling	胸径	0.357			100%			100%
	株高	0.761	44.02%				55.98%	100%

在青海云杉幼苗胸径的模型中, 10cm、30cm 土壤温度分别解释 30.79% 和 46.91% 的 R^2 (0.808), 10cm 土壤水分解释 22.30% 的 R^2 (0.808); 在幼苗株高的模型中 10cm、30cm 土壤温度分别解释 32.04% 和 46.23% 的 R^2 (0.805), 10cm 土壤水分解释 21.73% 的 R^2 (0.805); 在幼树胸径的模型中, 由于自变量仅有一个, 故其模型 R^2 由 40cm 土壤温度完全解释; 在幼树株高的模型中, 10cm 土壤温度解释 44.02% 的 R^2 (0.761), 20cm 土壤水分解释 55.98% 的 R^2 (0.761)。

3 讨论

3.1 青海云杉更新随不同海拔梯度的分布特点

天然更新生长发育受诸多生物(人为干扰、种间种内对资源的竞争、各种病虫害等)和非生物(光照、降雨和土壤理化性状等)的综合影响, 研究这些因素对更新影响背后的深层次规律, 有助于提升更新的存活率进而改善植物种群数量动态, 优化种群结构。同种植物随着海拔的变化, 其生长模式和环境也会发生改变, Haq 等^[19]对喜马拉雅地区 12 个主要森林类型进行调查, 研究发现不同海拔更新状况存在差异, 较低海拔的更新丰富度较高。康冰等^[20]研究发现不同海拔对不同龄级的油松更新影响不一样, 随着海拔的增加, 油松幼树密度呈现先增后减的趋势, 而幼苗密度则呈一直增加的趋势。井赛等^[21]研究发现海拔越高对祁连圆柏天然更新越不利, 而这与本研究发现一致, 即青海云杉天然更新胸径株高的平均水平整体趋势随着海拔升高而降低, 2700m 胸径株高较大植株数量占比比 3300 多, 幼苗胸径在海拔 2700m 与 3300m 存在显著性差异, 中间海拔段差异不显著可能是因为海拔变化不明显所致, 2700m 幼苗株高存在较多异常值, 这与按照胸径大小进行龄级划分相关, 表明存在较多高度远高于同龄级高度的植株, 说明了 2700m 幼苗生长状况更好, 幼树株高同幼苗株高均沿海拔存在显著差异性, 但幼树胸径不存在显著差异, 这可能是因为幼树胸径对海拔变化不敏感, 且所选样地海拔变化不大, 导致幼树胸径的差异性未显示。同时, 更新苗株高存在差异性的海拔落差要小于更新苗胸径存在差异性的海拔落差, 说明其株高对海拔的敏感性要高于胸径。

3.2 青海云杉更新与土壤水热的关系

海拔不仅直接影响更新, 还间接通过土壤理化性质间接影响天然更新生长^[22], 土壤水热是制约天然更新的主要因素之一^[23—24], 张春雨等^[25]研究发现, 土壤水分与长白山水曲柳幼苗幼树的空间分布密切相关, 卫舒平等^[26]研究发现, 影响华北落叶松更新指数最大因子是土壤水分, 刘建泉等^[27]研究发现, 水热条件直接影响青海云杉林天然更新。本研究发现, 幼苗幼树的胸径株高与土壤温度均呈正相关, 与土壤水分均呈负相关, 这与石建周等^[28]研究结果, 青海云杉径向生长与土壤温度呈正相关, 与土壤含水量呈负相关基本一致。幼苗胸径株高与表层土壤水热相关性均不显著, 幼树胸径与土壤水热相关性较显著但受土壤水热的影响较小, 株高与各层土壤水热均存在极显著的相关性, 影响较强。本研究发现不同龄级青海云杉与土壤水热的相关性大小

存在差异,幼苗胸径株高的相关系数普遍小于幼树,说明幼树对土壤水热条件的敏感性要大于幼苗,但本研究未将青海云杉更新的根冠比纳入研究范围,其与土壤水热具体的耦合机理还有待探究。

青海云杉更新不仅与土壤水热相关,不同深度的土壤温湿度对其生长过程发挥的重要性也存在差异^[29-30]。李晓青^[31]研究显示,不同海拔青海云杉径向生长与不同土壤层次相关,何中声^[32]研究表明,土壤温湿度差异所组成的微环境会影响格氏栲天然林幼苗的生长发育。本研究通过全子集回归分析得出,幼苗胸径与 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分拟合的模型最佳,其泛化能力较强,模拟拟合新的数据集时,幼苗胸径的 R^2 改变量仅为 0.048;幼苗株高则存在 3 个拟合较好的模型,分别是与 10cm 土壤温度和 20cm、30cm 土壤水分拟合的模型,与 10cm、30cm 土壤温度和 10cm 土壤水分拟合的模型,与 20cm、30cm 土壤温度和 30cm 土壤水分拟合的模型,3 个模型泛化能力均较强, R^2 改变量分别为 0.155、0.124、0.197,虽然在建立幼苗株高的模型中本研究选择了 R^2 改变量最小的模型,但其余模型的重要性不可忽视;幼树胸径与 40cm 土壤温度拟合的模型最佳,但 R^2 仅为 0.357,当模拟新的数据集时改变量为 0.108,说明随着龄级增加,土壤水热对更新苗胸径的影响呈现为逐渐减小的趋势;幼树株高与 10cm 土壤温度和 20cm 土壤水分拟合的模型最佳,泛化能力较强, R^2 改变量为 0.056。除了幼树胸径,所有拟合的最佳模型均存在 10cm 土壤温度这个变量,说明对于青海云杉天然更新而言,表层土壤温度对其生长发育影响较为广泛,由于本研究更新指标选择的是更新苗的胸径和株高,其他指标并未涉及,10cm 土壤温度是否更广泛的影响着其他指标有待进一步研究。同时,影响幼苗胸径和株高的变量一样,而影响幼树的胸径和株高的变量存在差异,王彬等^[33]研究表明不同龄林青海云杉对土壤水热的利用模式是不同的,随着龄级的增加其对水热变化的适应能力在逐渐降低,本研究发现青海云杉幼苗的胸径株高对土壤水热的利用模式具有一致性,幼树胸径株高对土壤水热的利用模式则出现了明显的差异,可能是由于幼苗阶段其地下部分生理功能还未出现明显分化,而幼树阶段地下部分进一步生长发育,根系的生理功能不再集中于同一部分,出现了明显的分化,幼树胸径株高开始利用不同位置的土壤水热进行生长^[34-35]。通过相对权重分析各模型的变量贡献率,结果表明对幼苗胸径和株高影响最大的是 30cm 土壤温度,其次是 10cm 土壤温度,最小的是 10cm 土壤水分,说明在幼苗生长发育过程中,土壤温度是主要的影响因子,而幼树阶段,对株高影响最大的是 20cm 土壤水分,其次是 10cm 土壤温度,其株高的主要影响因子已经由土壤温度变为了土壤水分,说明随着龄级的增加,更新对土壤水分的需求也在增加^[36-37]。

4 结论

青海云杉更新苗的胸径和株高的平均水平整体趋势是随着海拔的升高而降低的,2700m 的更新苗生长状况要比 3300m 的更新苗生长状况好,同时 2700m 与 3300m 的幼苗胸径株高存在显著性差异,幼树仅株高存在显著性差异,胸径的差异并不显著,表明青海云杉随着龄级的增加,其对外部环境变化的敏感性在降低。

青海云杉幼苗胸径株高虽然与表层土壤水热的相关性不显著,但后续分析表明表层土壤水热对更新的影响很广泛。模型拟合展示了土壤水热对更新苗的影响模式,除了幼树胸径的模型拟合效果不好外,其余模型均达到了较高的拟合水平,在模型的泛化能力上也达到了不错的拟合效果,这表明幼树胸径的主要影响因子已经发生改变,而幼苗胸径株高和幼树株高的主要影响因子依然是土壤水热,模型还展示出幼苗生长阶段 30cm 土壤温度发挥着较大的影响,幼树生长阶段 40cm 土壤温度对其胸径产生较大的影响,20cm 土壤水分对其株高产生较大的影响。在土壤水热的利用模式方面,幼苗的胸径株高存在一致性,但随着龄级的增加,幼树胸径株高对水热的利用模式出现了变化,土壤水热对幼树胸径的影响在减小,对幼树株高的主要影响则由原来的土壤温度变为了土壤水分。在对青海云杉更新苗的抚育管理过程中建议在适宜生长的海拔范围内选择较低海拔进行育苗,随着海拔的增高建议提高土壤含水量。更新苗不同生长阶段建议采取不同抚育策略,幼苗生长阶段可以着重关注土壤水热两个因素对其生长的影响,其它环境影响因子造成的限制较小,随着苗木龄级的增加,对土壤肥力、林窗等其它环境因子的重视则需加强。

参考文献 (References):

- [1] Dai A G. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(1): 52-58.
- [2] Wang G L. Agricultural drought in a future climate: results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Climate Dynamics*, 2005, 25(7): 739-753.
- [3] 陈东立, 余新晓, 廖邦洪. 中国森林生态系统水源涵养功能分析. *世界林业研究*, 2005, 18(1): 49-54.
- [4] 刘思敏. 甘肃内陆河流域生态功能及保护对策. *湿地科学与管理*, 2011, 7(3): 37-39.
- [5] 鲁绍伟, 毛富玲, 靳芳, 余新晓, 饶良懿. 中国森林生态系统水源涵养功能. *水土保持研究*, 2005, 12(4): 223-226.
- [6] 孙武, 侯玉, 张勃. 生态脆弱带波动性、人口压力、脆弱度之间的关系. *生态学报*, 2000, 20(3): 369-373.
- [7] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 马苏, 王文杰, 吴坤, 刘洋. 中国生态环境脆弱区范围界定. *生物多样性*, 2015, 23(6): 725-732.
- [8] 刘兰娅, 勾晓华, 张芬, 尹定财, 王学佳, 夏敬清, 李芊, 杜苗苗. 升温对祁连山东部青海云杉径向生长的影响. *应用生态学报*, 2021, 32(10): 3576-3584.
- [9] 拓锋, 刘贤德, 黄冬柳, 王立, 刘润红, 赵维俊, 敬文茂. 祁连山大野口流域青海云杉种群数量动态. *生态学报*, 2021, 41(17): 6871-6882.
- [10] 杜苗苗, 张芬, 勾晓华, 刘兰娅, 夏敬清, 吴秀平. 祁连山中东部青海云杉径向生长对气候变暖的响应差异. *冰川冻土*, 2022, 44(1): 14-23.
- [11] 王清涛. 青海云杉林更新及其幼苗幼树生长态势模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [12] 马剑, 刘贤德, 金铭, 赵维俊, 成彩霞, 孟好军, 武秀荣. 祁连山青海云杉林土壤理化性质和酶活性海拔分布特征. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 207-213.
- [13] 党宏忠, 赵雨森, 陈祥伟, 李进军, 达光文, 朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1148-1152.
- [14] 杨洪波, 于晓丹, 付海美, 高亮. 冬防措施对西藏那曲土壤温度及青海云杉引种的影响. *高原科学研究*, 2021, 5(2): 27-33, 71.
- [15] Wan Y F, Yu P T, Li X Q, Wang Y H, Wang B, Yu Y P, Zhang L, Liu X D, Wang S L. Seasonal pattern of stem diameter growth of Qinghai spruce in the Qilian Mountains, northwestern China. *Forests*, 2020, 11(5): 494.
- [16] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 彭守璋, 彭焕华. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素. *生态学报*, 2012, 32(4): 62-72.
- [17] 丁国民, 刘兴明, 倪自银, 彭吉廷. 甘肃祁连山青海云杉种群数量动态的初步研究. *植物资源与环境学报*, 2005, 14(4): 36-41.
- [18] 陈银萍, 于飞, 杨宗娟, 张静, 李冬花, 张凤霞. 东祁连山青海云杉种群大小结构及其动态研究. *广西植物*, 2013, 33(2): 236-241, 163.
- [19] Haq S M, Calixto E S, Rashid I, Srivastava G, Ahmad Khuroo A. Tree diversity, distribution and regeneration in major forest types along an extensive elevational gradient in Indian Himalaya: implications for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 2022, 506: 119968.
- [20] 康冰, 王得祥, 崔宏安, 迪玮峙, 杜焰玲. 秦岭山地油松群落更新特征及影响因子. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1659-1667.
- [21] 井赛, 张静, 侯晓巍, 陈志林, 闫生义, 侯琳. 三江源东部祁连山圆柏天然更新特征研究. *西北林学院学报*, 2021, 36(3): 52-58.
- [22] 温林生, 邓文平, 邓力维, 莫兴悦, 肖廷琦, 邱凌波, 刘苑秋. 庐山不同海拔植物季节水分利用策略. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 341-348.
- [23] 彭闪江, 黄忠良, 彭少麟, 欧阳学军, 徐国良. 植物天然更新过程中种子和幼苗死亡的影响因素. *广西植物*, 2004, 24(2): 113-121, 124.
- [24] Liang E Y, Shao X M, Eckstein D, Liu X H. Spatial variability of tree growth along a latitudinal transect in the Qilian Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(2): 200-211.
- [25] 张春雨, 赵秀海, 夏富才. 长白山次生林树种空间分布及环境解释. *林业科学*, 2008, 44(8): 1-8.
- [26] 卫舒平, 梁文俊, 魏曦, 卜瑞瑛, 姚佳峰. 不同密度华北落叶松林天然更新及其影响因子. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2687-2694.
- [27] 刘建泉, 宋秉明, 郝玉福. 祁连山青海云杉林抚育更新研究. *江西农业大学学报*, 1998, 20(1): 82-85.
- [28] 石建周, 刘贤德, 田青, 万艳芳, 赵维俊. 祁连山中东部青海云杉年内径向生长季节变化及其对环境因子的响应. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 261-267.
- [29] 赵永宏. 祁连山北麓中段青海云杉(*Picea crassifolia* kom.)对水热驱动响应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
- [30] 牛赞, 刘贤德, 王立, 赵永宏, 常博. 祁连山大野口流域青海云杉林分结构及其土壤水热特征分析. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 385-391.
- [31] 李晓青. 祁连山中段北坡青海云杉年内径向生长变化及其与环境因子的关系[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
- [32] 何中声. 格氏栲天然林窗微环境特征及幼苗更新动态研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [33] 王彬, 于澎涛, 于艺鹏, 张雷, 王彦辉, 万艳芳, 杨文娟, 王顺利, 刘贤德. 祁连山不同年龄青海云杉径向生长对气候变化的响应. *林业科学*, 2021, 57(3): 1-8.
- [34] Salahuddin, 董慧, 及利, 杨立学. 落叶松人工林下红皮云杉和青海云杉的幼苗更新. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(3): 28-33.
- [35] Børja I, De Wit H A, Steffenrem A, Majdi H. Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway. *Tree Physiology*, 2008, 28(5): 773-784.
- [36] Brunner I, Herzog C, Dawes M A, Arend M, Sperisen C. How tree roots respond to drought. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 547.
- [37] Zhou G Y, Peng C H, Li Y L, Liu S Z, Zhang Q M, Tang X L, Liu J X, Yan J H, Zhang D Q, Chu G W. A climate change-induced threat to the ecological resilience of a subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest in Southern China. *Global Change Biology*, 2013, 19(4): 1197-1210.