

doi: 10.3969/j.issn.1006-8023.2024.02.001

凋落物及土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的影响

王亚菲², 张青青^{1*}, 江康威³, 郭建兴⁴, 孙瀚博³

(1. 新疆农业大学 生命科学学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业大学 资源与环境学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆农业大学 草业学院, 乌鲁木齐 830052; 4. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054)

摘要:化感作用是植物间信息交流的一种方式,对森林的天然更新有重要影响。西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)更新困难且种子萌发率低,林下凋落物及表层土壤存在的化感作用可能是影响其自然更新的重要因素之一。研究西伯利亚落叶松林下凋落物和土壤不同质量浓度的浸提液(0、1、2、5、10、20、40、60、80和100 g/L)对其种子萌发的化感作用,并选用发芽率、发芽势、发芽指数和化感综合效应指数来表征不同类型的浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的影响。结果表明,1)经过浸提液处理的种子相较于CK(0 g/L)均提前进入萌发期,低质量浓度浸提液(凋落物浸提液质量浓度<100 g/L,土壤浸提液质量浓度<60 g/L)处理过的种子萌发周期也会变长;2)林下凋落物和土壤均能对其种子萌发产生影响,在一定质量浓度范围内表现为“低质量浓度促进,高质量浓度抑制”,且以80 g/L质量浓度的土壤浸提液抑制作用最强,发芽率降低了8.33%($P<0.05$);3)化感综合指数表现为低质量浓度大于高质量浓度,随着质量浓度增加,化感作用强度表现为先减小后增大,促进作用逐渐减小进而转为抑制作用。西伯利亚落叶松的林下凋落物和土壤存在明显的化感作用,在一定程度上影响天然林更新。

关键词:西伯利亚落叶松;浸提液;化感作用;种子萌发;天然林更新

中图分类号:S791.229

文献标识码:A

文章编号:1006-8023(2024)02-0001-09

Effect of Litter and Soil Extracts on Seed Germination of *Larix sibirica*

WANG Yafei², ZHANG Qingqing^{1*}, JIANG Kangwei³, GUO Jianxing⁴, SUN Hanbo³

(1. College of Life Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. College of Resources and Environment, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 3. College of Grassland, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 4. College of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Allelopathy is a way of exchanging information between plants that has an important impact on the natural renewal of forests. *Larix sibirica* has difficulty in regeneration and low seed germination rate, and allelopathic effects in understory litter and topsoil may be one of the important factors affecting its natural regeneration. To study the allelopathic effects of litter and different concentrations (0, 1, 2, 5, 10, 20, 40, 60, 80 and 100 g/L) of soil extracts on seed germination of *Larix sibirica* forest, the germination rate, germination potential, germination index and allelopathic effect index were selected to characterize the effects of different types of leaching solution on seed germination of *Larix sibirica*. The results showed that: 1) compared with CK (0 g/L), the other seeds treated by the extracts all entered the germination stage earlier, and the seeds treated with low concentration extracts (litter extract concentration<100 g/L, soil extract concentration<60 g/L) had a longer germination cycle. 2) Both understory litter and soil can affect its seed germination rate, which was manifested as 'low concentration promotion, high concentration inhibition' in a certain concentration range, and the inhibition effect was strongest at 80 g/L soil extracts, and the germination rate decreased by 8.33% ($P<0.05$). 3) The allelopathic composite index showed low concentration > high concentration, and with the increase of concentration, the intensity of allelopathic was manifested as first decreasing and then increasing, and the promoting effect gradually decreased and then turned into an inhibitory effect. There was obvious allelopathic effect on understory litter and soil of *Larix sibirica*, which may affect natural forest renewal to a certain extent.

Keywords: *Larix sibirica*; extracts; allelopathy; seed germination; natural forest renewal

收稿日期:2023-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(2522GZRJJ)。

第一作者简介:王亚菲,硕士生研究生。研究方向为恢复生态学。E-mail: 13054742735@163.com

*通信作者:张青青,博士,副教授。研究方向为荒漠生态恢复。E-mail: greener2010@sina.com

引文格式:王亚菲,张青青,江康威,等. 凋落物及土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的影响[J]. 森林工程, 2024, 40(2):1-9.

WANG Y F, ZHANG Q Q, JIANG K W, et al. Effect of litter and soil extracts on seed germination of *Larix sibirica*[J]. Forest Engineering, 2024, 40(2):1-9.

0 引言

化感作用是植物在生长发育过程中,通过释放植物体内的代谢产物(化学物质)而对另一种植物、微生物或者植物自身产生一定程度上的促进或者抑制的作用^[1]。化感作用是植物之间交流信息的一种方式,生态系统中的所有植物基本都可以产生化感物质,并对其他植物乃至自身产生不同程度的影响^[2]。近年来,国内外学者已经在湿地、森林以及淡水等生态系统中广泛开展了植物化感作用研究,并取得一定成果,同时在植被恢复和植物种间调节中关于化感作用研究也逐渐增多^[3]。化感作用不仅可以抑制杂草、提高作物产量,还有助于开发新药剂以及进行生态控制与改良等。植物的化感作用是种内和种间相互关系^[4]、群落演替过程^[5]、物种分布格局的构建和生物入侵^[6-7]等领域的重要研究基础,近年来,逐渐成为生态学领域的研究热点^[8-9]。

目前,化感研究通常测定一种植物的根、茎、叶浸提液对另一种植物种子萌发以及生长发育的抑制或促进作用^[10]。化感作用对于森林的天然更新可能也存在着重要影响,如落叶松(*Larix*)枝叶浸提液能降低白桦种子发芽率并抑制其胚根胚轴的生长,白桦的枝叶浸提液能够显著促进落叶松种子的萌发^[11];南方红豆杉(*Taxus wallichiana* var. *mairei*)不同部位浸提液对白菜种子的萌发和幼苗生长的影响不同,种胚浸提液对其抑制作用最强^[12];杉木(*Cunninghamia lanceolata*)连栽可使其凋落物分泌更多的酚类物质,从而使自身生长受到抑制^[13];栎树(*Quercus*)、桉树(*Eucalyptus*)影响会草本,刺柏(*Juniperus formosana*)、蕨类(*Fern*)等也存在化感作用^[14]。

西伯利亚落叶松(*Larix sibirica*)为我国新疆维吾尔自治区独有,又称新疆落叶松,属松科落叶松属落叶乔木植物,其林分自然成熟龄大约为250~350 a^[15]。西伯利亚落叶松存在大量单性结实空粒种子,种子发芽率低,幼苗经常过早死亡,如分布在阿尔泰山的西伯利亚落叶松退化严重,表现为幼苗更新困难,近、成熟林的龄组占比高达72.29%^[16]。而一些研究对其更新困难的原因归结于幼树所处的光照、水分和养分等环境问题,故通常认为西伯利亚落叶松更新困难主要是土壤结构变差、土壤酸化^[17]及病虫害所引起的;但其中存在树木凋落物分泌出的某些次生代谢物质对自身起毒害作用的可

能性,即化感作用的影响。此外,除凋落物自毒作用^[18]外,化感物质还会通过雨雾淋溶、根系分泌和植物凋落物降解与淋溶等途径进入土壤,并可能会在土壤因素的影响下发生复杂的转化,进而作用于植物根系,影响落叶松生长^[19-20]。

西伯利亚落叶松自然更新困难,种子萌发和幼苗生长受到抑制,研究林下调落物和土壤化感作用对西伯利亚落叶松种子萌发的影响,分析浸提液质量浓度对种子萌发的影响规律,探讨土壤及凋落物对西伯利亚落叶松种子的化感效应,将对西伯利亚落叶松天然林经营中的天然更新障碍问题有重要的生态学意义。

1 材料与方法

1.1 供试材料

2021年8月在新疆阿尔泰山哈巴河林区内(86°78' E、48°33' N,海拔为1500~1800 m)采集供试的西伯利亚落叶松林下调落物、土壤。在林下随机设置5个20 m×20 m的大样方,采用样方框收集样方内自然凋落的针叶,土壤采集去除凋落物后的0~5 cm表层土壤,并带回实验室备用。试验所用种子均来源于哈巴河林区管护站。

1.2 浸提液制备

取部分凋落物和土壤放入鼓风干燥箱中70℃烘干至恒重。碾碎后分别称取一定量(40 g)的凋落物和土壤粉末,同时加入400 mL蒸馏水常温浸泡,并在25℃、200 r/min的恒温振荡器中振荡浸提24 h,再静置3 h。将浸泡液经4层纱布和双层滤纸过滤,再将过滤得到的液体补充到400 mL,此液体为浸提液原液,质量浓度为100 g/L。用蒸馏水分别稀释成1、2、5、10、20、40、60、80 g/L的浸提液,其中以蒸馏水(0 g/L)作为对照(CK),并置于4℃冰箱保存^[21-22]。

1.3 种子萌发试验

用培养皿滤纸法测定不同质量浓度的凋落物和土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的影响。发芽床选用直径11 cm的定量滤纸和培养皿,试验前将种子置于有效质量分数为1% NaClO溶液中消毒30 min,之后用蒸馏水冲洗4~5次。

分别取5 mL相应质量浓度的浸提液,加入铺有双层滤纸的培养皿,对照加5 mL蒸馏水,每个处理重复4次。将籽粒饱满、大小均匀的西伯利亚落叶松种子置于培养皿中,每个培养皿放置50粒种子。

发芽床置于人工气候植物箱(GXZ-500B)中培养,温度光照参考哈巴河林场5月份气温,每日15 h光照25℃、9 h黑暗13℃,资料来源于中国气象数据网([www. http//data. cma. cn](http://data.cma.cn))。每天记录萌发种子数(以胚根突破种皮1~2 mm为准),并补充3 mL相应处理质量浓度的浸提液(对照组补充蒸馏水),种子总萌发时间为23 d。

1.4 测定指标与方法

在发芽第8天计算发芽势^[23](Germination Potential, GP,式中记为 G_p),第23天计算发芽率^[24](Germination Rate, GR,式中记为 G_R)和发芽指数^[24](Germination Index, GI,式中记为 G_I);计算化感效应指数^[25](Response Index, RI,式中记为 R_I)和化感综合效应指数^[12](Synthetical all Elopatic, SE,式中记为 S_E)。各指标计算公式如下。

$$G_R = N_1 / N_2 \times 100\% \quad (1)$$

式中: N_1 为发芽种子总数; N_2 为供试种子总数。

$$G_p = d_1 / d_2 \times 100\% \quad (2)$$

式中: d_1 为发芽高峰期发芽种子数; d_2 为供试种子总数。

$$G_I = \sum (G_i / D_i) \quad (3)$$

式中: D_i 为发芽日数, d ; G_i 是与 D_i 相对应的每天发芽种子数。

$$R_I = 1 - C/T (T \geq C), \text{或} R_I = C/T - 1 (T < C) \quad (4)$$

式中: C 为对照值; T 为处理值; R_I 为化感效应指数,正值表示促进,负值表示抑制,绝对值反映化感作用的强弱。

$$S_E = \frac{1}{n} \sum R_I \quad (5)$$

式中: n 为该数据 R_I 的总个数。化感综合效应指数(S_E)为西伯利亚落叶松种子发芽率、发芽势和发芽指数的算术平均值。

1.5 数据统计与分析

采用SPSS 26.0统计分析软件对种子萌发进程以及发芽率、发芽势和发芽指数进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并利用最小显著极差法(least significant difference, LSD)比较组内差异,显著性水平设定为 $P = 0.05$ 。采用Excel 2019和Origin 2018对数据进行处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同质量浓度的凋落物和土壤浸提液对落叶松种子萌发进程的影响

经过不同质量浓度的凋落物和土壤浸提液处理后,西伯利亚落叶松种子萌发进程受到不同程度的影响。由图1可以看出,西伯利亚落叶松种子经不同浸提液处理后,萌发进程均存在明显差异,且相较于CK表现为提前进入萌发期。凋落物浸提液处理下的种子萌发大多在第2天开始,种子萌发持

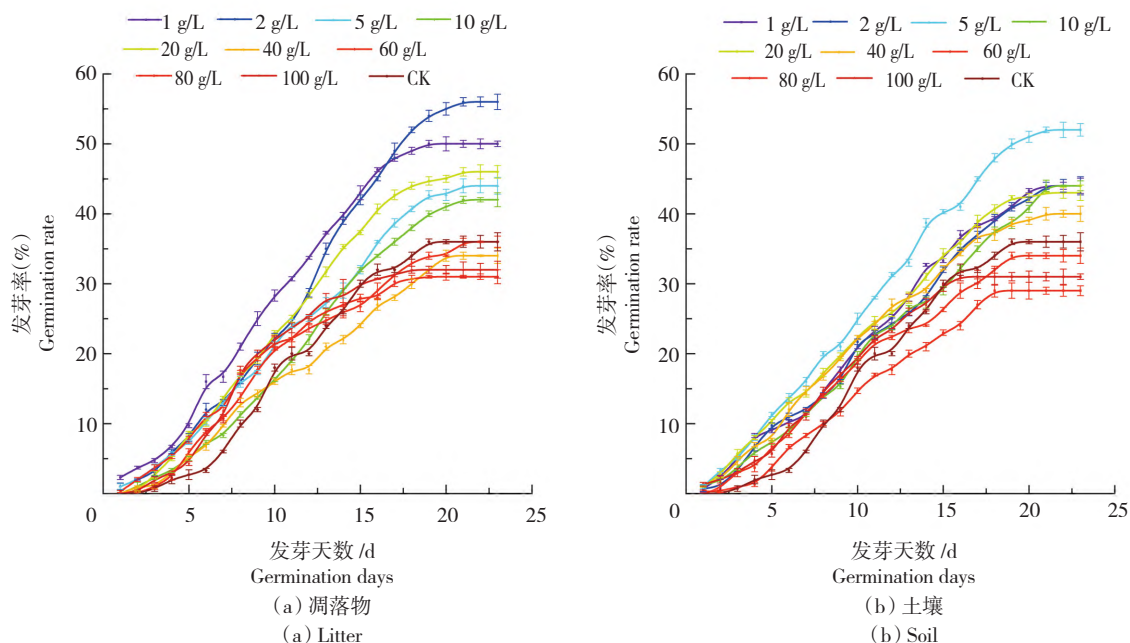


图1 凋落物及土壤浸提液对萌发进程的影响

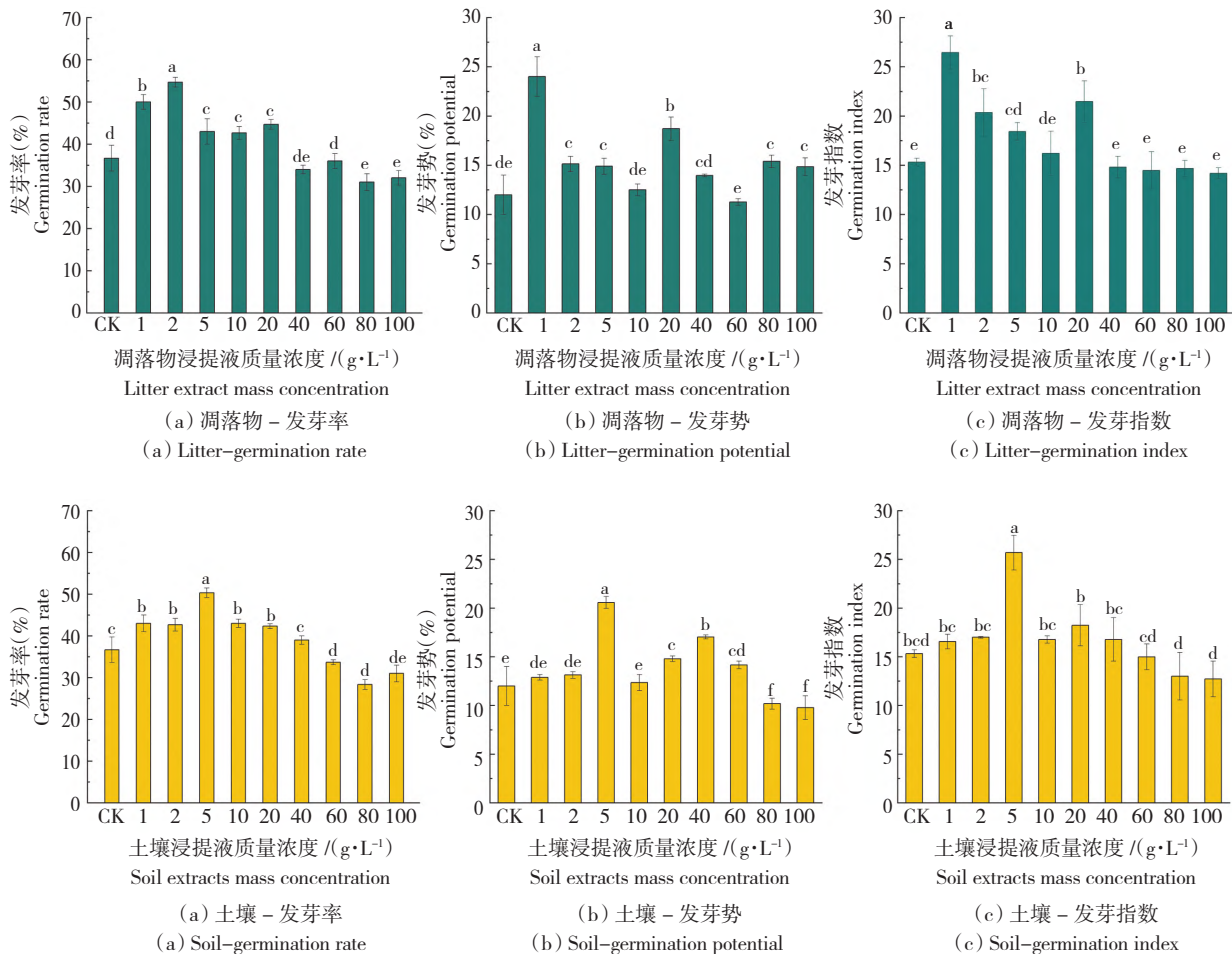
Fig. 1 Effect of litter and soil extracts on germination process

续 23 d,如图 1(a)所示。其中,CK 在第 5 天开始进入萌发高峰期,并与 80 g/L 处理同在第 19 天萌发结束;100 %处理质量浓度的种子比 CK 提前结束萌发,其他处理的种子萌发结束均落后于 CK。而土壤浸提液处理下的种子与 CK 同天结束萌发的是 60 g/L 处理,80 g/L 和 100 g/L 处理萌发终止日期均早于 CK,其他低质量浓度处理的种子萌发终止日期晚于 CK,如图 1(b)所示。此外,经过浸提液处理的种子都比 CK 率先进入萌发高峰期,且不同质量浓度浸提液处理下的种子进入萌发高峰期的时间均有所不同。

2.2 不同质量浓度的凋落物及土壤浸提液对落叶松种子发芽率、发芽势、发芽指数的影响

在凋落物和土壤浸提液的处理下,西伯利亚落

叶松种子的发芽率、发芽势和发芽指数与浸提液质量浓度基本呈负相关,如图 2 所示。经凋落物浸提液处理后,当质量浓度 ≤ 20 g/L 时发芽率和发芽指数显著高于 CK,各质量浓度发芽势也大于 CK(60 g/L 除外);80 g/L 质量浓度处理组发芽率最低,为 31.33%;60 g/L 处理的发芽势最低,为 11.27%;100 g/L 处理的发芽指数最低,为 14.18。而经土壤浸提液处理后当质量浓度 ≤ 20 g/L 时发芽率显著高于 CK,质量浓度 ≤ 40 g/L 时发芽指数均高于 CK,种子发芽率、发芽势和发芽指数组均在 5 g/L 时达到最高值,分别为 50.33%、20.57% 和 25.67;发芽率在 80 g/L 时最低,为 28.33%,发芽势和发芽指数在 100 g/L 时最低,分别为 9.77% 和 12.72。



不同小写字母表示浸提液不同质量浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments at different concentrations of extracts ($P < 0.05$).

图 2 凋落物及土壤浸提液对发芽率、发芽势、发芽指数的影响

Fig. 2 Effects of litter and soil extracts on germination rate, germination potential and germination index

2.3 不同质量浓度的凋落物及土壤浸提液对落叶松种子萌发的化感作用分析

由表1可知,在凋落物提液处理下,1 g/L处理组的发芽势和发芽指数的化感指数最高,分别为0.50和0.42,发芽率的化感指数在2 g/L处理下最高,为0.26;80 g/L处理组的发芽率化感指数最低,为-0.29;发芽势和发芽指数的化感指数在60 g/L和100 g/L的处理下最低,分别为-0.06和-0.08。化感综合效应指数最高为0.39,最低为-0.15,且低质量浓度处理组明显高于高质量浓度处理组。而经过土壤浸提液处理后,发芽率、发芽势和发芽指数的化感指数均在100 g/L达到最低,分别为-0.38、-0.23和-0.20;5 g/L处理的种子发芽率、发芽势和发芽指数的化感指数均达到组内最高,分别为0.23、0.42和0.40。图3中凋落物浸提液对种子萌发的化感综合效应指数均表现为双峰型,而土壤浸提液对种子萌发的化感综合效应指表现为单峰型和双峰型均存在。其中A、C、D 3组分别为发芽率、发芽指数和化感综合效应指数,化感指数均大致表现为随着质量浓度升高而逐渐降低,凋落物和土壤浸提液的化感作用强度均表现为低质量浓度大于高质量浓度,且

综合化感效应指数与浸提液质量浓度基本呈负相关。

3 讨论

3.1 凋落物化感作用对西伯利亚落叶松种子萌发的影响

凋落物中化感物质可以通过挥发、淋溶、分泌和腐解等途径释放进入环境中,进而对植物产生化感作用^[26-27]。本研究中,西伯利亚落叶松林下凋落物浸提液对种子萌发存在一定的化感作用,且在不同质量浓度的处理下,其化感作用表现为抑制或促进2种形式。在低质量浓度处理下,凋落物浸提液对种子发芽率、发芽势和发芽指数的影响表现为促进作用,但其促进作用随着浸提液质量浓度升高而下降,当凋落物浸提液质量浓度为40 g/L时,开始表现为抑制作用,且随着质量浓度的升高,抑制作用逐渐加强。整体趋势表现为“低质量浓度促进,高质量浓度抑制”,这与罗侠等^[28]对天山云杉的研究结果相似。凋落物浸提液会因其质量浓度的不同而对种子萌发产生不同的影响,且浸提液在一定质量浓度范围内,化感效应也会因其质量浓度降低

表1 凋落物及土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的化感效应指数

Tab. 1 Allelopathic effects indices of litter and soil extracts on seed germination of *Larix sibirica*

	质量浓度梯度/ (g · L ⁻¹) Concentration gradient	化感指数 (RI) Response index			化感综合效应指数 (SE) Synthetic effects of allelopathic index
		发芽率 (GR) Germination rate	发芽势 (GP) Germination potential	发芽指数 (GI) Germination index	
凋落物浸提液 Litter extracts	1	0.24	0.50	0.42	0.39
	2	0.26	0.21	0.25	0.19
	5	0.10	0.19	0.17	0.12
	10	0.11	0.04	0.06	0.00
	20	0.15	0.36	0.29	0.26
	40	-0.15	0.14	-0.03	-0.07
	60	-0.04	-0.06	-0.06	-0.09
	80	-0.29	0.22	-0.04	-0.10
	100	-0.27	0.17	-0.08	-0.15
	土壤浸提液 Soil extract	1	0.07	0.07	0.07
2		0.06	0.08	0.10	0.08
5		0.23	0.42	0.40	0.35
10		0.03	0.03	0.09	0.05
20		0.04	0.19	0.17	0.13
40		-0.10	0.30	0.09	0.09
60		-0.13	0.15	-0.02	0.00
80		-0.23	-0.18	-0.18	-0.20
100		-0.38	-0.23	-0.20	-0.27

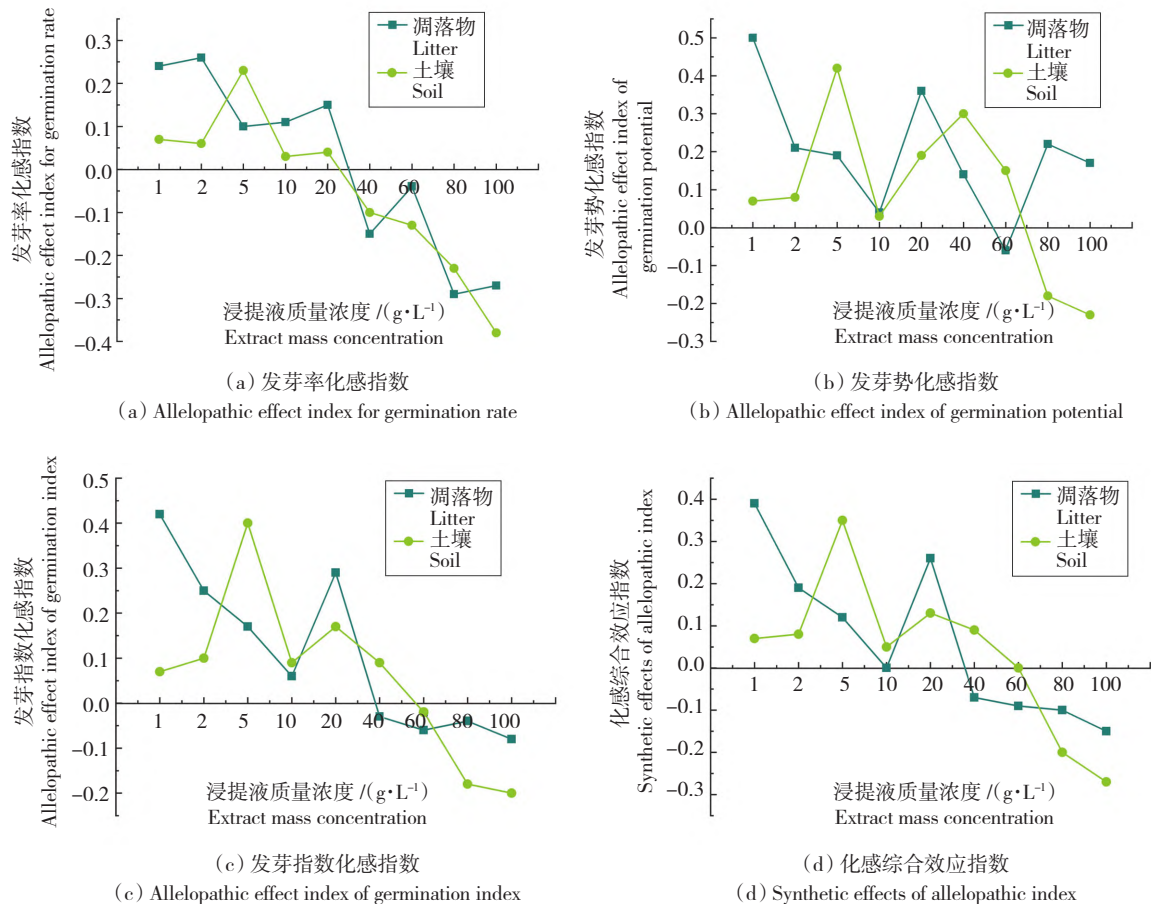


图3 发芽率、发芽势、发芽指数和综合效应的化感效应曲线

Fig. 3 Allelopathic effect curves for germination rate, germination potential, germination index, and synthetic effect

而从抑制转变为促进^[28]。除了化感作用外,凋落物还能通过其他因素影响种子萌发,Shen 等^[29]前期研究发现,过厚的凋落物也会抑制种子萌发。本研究中,高质量浓度的凋落物浸提液对西伯利亚落叶松的种子萌发具有一定的抑制作用,但野外条件下森林凋落物的厚度和其化感作用是否会共同作用于种子萌发,进而影响种群自然更新,还有待进一步研究。

3.2 土壤化感作用对西伯利亚落叶松种子萌发的影响

植物的枝、叶、果实以及根系残体等分解后进入土壤,会与土壤中的环境因子发生交互作用,进而产生各类化学物质包括养分物质,生长激素类物质和化感物质等^[30]。本研究中,土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子发芽率、发芽势和发芽指数的影响规律基本一致,土壤化感物质在降低落叶松种子发芽率的同时也减缓了发芽速率,且发芽指数的变化

较发芽率更为敏感,这一结论与李俊等^[31]研究结果相似。试验结果表明,西伯利亚落叶松林下土壤浸提液对其种子发芽率和萌发进程均表现出“低促高抑”的质量浓度效应,这可能是低质量浓度(≤ 40 g/L)浸提液能够为种子萌发提供一定的营养物质,而随着质量浓度的升高,化感作用又逐渐转变为抑制。如杜玲等^[32]对杉木的研究表明,杉木根系土壤提取物对杉木种子发芽及芽的生长,均有不同程度的抑制作用。本研究中高质量浓度浸提液(80、100 g/L)处理下的种子进入萌发高峰期的时间晚于对照组,萌发总时长也相对较短,且60、80、100 g/L处理下的种子发芽率也显著低于对照组,这与杜玲等^[32]研究结果类似。一方面表明西伯利亚落叶松林下土壤中可能存在一定的化感物质影响其自身生长;另一方面可能是释放到环境中的化感物质能够通过雨雾淋溶的方式进入到土壤环境中,进而影响西伯利亚落叶松的种子萌发^[19]。

3.3 不同处理下的化感综合效应分析

化感综合效应可用来衡量化感作用类型和强度,为避免单一性状对化感作用的局限性,综合效应可以从整体上更加客观地反映受体植物的化感敏感性^[33]。本研究从种子发芽率、发芽势和发芽指数3个指标综合分析了西伯利亚落叶松种子对凋落物和土壤浸提液的化感敏感性。结果显示,低质量浓度的凋落物和土壤浸提液对西伯利亚落叶松种子萌发的化感综合效应指数大于高质量浓度的化感综合效应指数。随着质量浓度的增加,化感作用强度表现为先减小后增大,促进作用逐渐减小并进而转为抑制作用,凋落物浸提液的质量浓度高于40 g/L处理后种子的萌发开始受到抑制,土壤浸提液的质量浓度高于60 g/L处理后种子萌发受到抑制,二者表现出的化感效应存在差异,这一点与左郎等^[34]对火炬树的研究相似。化感作用存在一定质量浓度效应,并且其强度与化感物质种类、浸提液质量浓度以及受试植物种类有关。

在低质量浓度浸提液处理下,土壤组(≤ 60 g/L)和凋落物组(< 40 g/L)化感作用强度虽有所不同,但化感指数结果均表现为促进种子萌发;高质量浓度处理下则表现为对种子萌发有抑制作用,该结果符合“低促高抑”质量浓度效应^[35]。西伯利亚落叶松种子可能对此质量浓度范围内土壤浸提液的化感敏感性较低,所以其化感综合效应抑制强度并不高,故推测若扩大质量浓度区间,则可能会有更强烈的表现效果。目前,对于质量浓度效应不明显的化感作用以及林木根际土壤化感作用类型差异的机理仍不清楚,有待进一步研究。此外,对西伯利亚落叶松种子产生化感作用的具体化感物质尚不明确,下一步研究需利用气相色谱-质谱检测分析法(Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GCMS)深入研究化感物质对西伯利亚落叶松种子的影响及作用机制,这将对西伯利亚落叶松天然更新具有重要意义。

4 结论

1) 研究发现经过浸提液处理的西伯利亚落叶松种子大多提前进入萌发高峰期,低质量浓度浸提液处理过的种子萌发周期也会变长。

2) 林下调落物和土壤浸提液均对西伯利亚落叶松种子发芽率、发芽势、发芽指数产生了一定的化感

作用,当浸提液质量浓度 < 40 g/L时,对落叶松种子萌发表现为促进作用;当浸提液质量浓度 ≥ 40 g/L时,对落叶松种子萌发表现为不同程度的抑制作用。

(3) 化感综合指数表现为低质量浓度大于高质量浓度,随着质量浓度增加,化感作用强度表现为先减小后增大,促进作用逐渐减小,凋落物浸提液在质量浓度 ≥ 40 g/L时转为抑制作用,土壤浸提液在质量浓度 > 60 g/L时转为抑制作用。

因此,西伯利亚落叶松林下调落物和表层土壤可能是其天然更新的障碍因素之一。本研究通过室内模拟试验探讨了其对种子萌发的影响,造成落叶松更新困难的主要原因还需进一步研究。后续会在自然条件下开展相关试验,进一步验证化感作用对西伯利亚落叶松种子萌发的影响,以期为森林种群恢复和天然更新提供科学依据。

【参 考 文 献】

- [1] DIAS L S, PEREIRA I P, DIAS A S. Allelopathy, seed germination, weed control and bioassay methods[J]. Allelopathy Journal, 2016, 37(1):31-40.
- [2] 刘芳黎,张越,吴富勤,等. 自毒和森林凋落物化感作用对极小种群野生植物大树杜鹃种子萌发的影响[J]. 西北植物学报,2017,37(6):1189-1195.
LIU F L, ZHANG Y, WU F Q, et al. Effect of autotoxicity and litter allelopathy on seed germination of *Rhododendron protistum* var. *giganteum*, a plant species with extremely small populations in China[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2017, 37(6): 1189-1195.
- [3] 彭少麟,邵华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. 应用生态学报,2001,12(5):780-786.
PENG S L, SHAO H. Research significance and foreground of allelopathy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 780-786.
- [4] 张珊珊,向振勇,康洪梅,等. 云南蓝果树对种子萌发及幼苗生长的自毒效应[J]. 林业科学研究,2014,27(4):502-507.
ZHANG S S, XIANG Z Y, KANG H M, et al. Autotoxicity of *Nyssa yunnanensis* on seed germination and seedling growth[J]. Forest Research, 2014, 27(4): 502-507.
- [5] 鲜啟鸣,陈海东,邹惠仙,等. 淡水水生植物化感作用研究进展[J]. 生态学杂志,2005,24(6):664-669.
XIAN Q M, CHEN H D, ZOU H X, et al. Research advances in allelopathy of aquatic macrophytes[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(6): 664-669.
- [6] VAN EMDEN H F. Host plant - Aphidophaga interactions

- [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1995, 52(1): 3-11.
- [7] STANEK M, KUSHWAHA P, MURAWSKA-WLODARCZYK K, et al. *Quercus rubra* invasion of temperate deciduous forest stands alters the structure and functions of the soil microbiome[J]. *Geoderma*, 2023, 430: 116328.
- [8] 许桂芳,刘明久,晁慧娟. 入侵植物小蓬草化感作用研究[J]. *西北农业学报*, 2007, 16(3): 215-218.
XU G F, LIU M J, CHAO H J. Study on allelopathy of the invasive plant *Conyza canadensis* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16(3): 215-218.
- [9] LIU J Y, XU G, YIN L Z, et al. Invasive plants exert disproportionately negative allelopathic effects on the growth and physiology of the earthworm *Eisenia fetida* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 747: 141534.
- [10] 马银山,常妍,王含睿,等. 天仙子种子浸提液对黑麦草种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. *草地学报*, 2021, 29(8): 1697-1703.
MA Y S, CHANG Y, WANG H R, et al. The allelopathy of *Hyoscyamus niger* seed extract on seed germination and seedling growth of *Lolium perenne* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(8): 1697-1703.
- [11] 刘忠玲,王庆成,郝龙飞. 白桦、落叶松不同器官水浸液对种子萌发和播种苗生长的种间化感作用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12): 3138-3144.
LIU Z L, WANG Q C, HAO L F. Interspecific allelopathic effect of different organs' aqueous extracts of *Betula platyphylla* and *Larix olgensis* on their seed germination and seedling growth [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(12): 3138-3144.
- [12] 陈黎,刘成功,万志兵,等. 南方红豆杉种子不同部位浸提液对小白菜的化感作用[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(7): 90-97.
CHEN L, LIU C G, WAN Z B, et al. Allelopathic effect of extracts from different parts of *Taxus chinensis* var. *mairei* seeds on cabbage [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, 48(7): 90-97.
- [13] 张伟东,汪思龙,颜绍膺,等. 杉木根系和凋落物对土壤微生物学性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2345-2350.
ZHANG W D, WANG S L, YAN S K, et al. Effects of root system and litter of Chinese fir on soil microbial properties [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2345-2350.
- [14] 王晓英. 刺柏叶水浸液对高羊茅的化感作用及其 GC-MS 分析[J]. *草地学报*, 2016, 24(2): 363-368.
WANG X Y. Allelopathy of aquatic extract of *Juniperus formosana* hayate leaves on *Festuca arundinacea* schreb. and the GC-MS analysis of the extracts [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(2): 363-368.
- [15] 张瑞波,袁玉江,魏文寿,等. 西伯利亚落叶松树轮稳定碳同位素对气候的响应[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 328-334.
ZHANG R B, YUAN Y J, WEI W S, et al. Response of stable carbon isotope of *Larix sibirica* ledeb. tree-rings to climate change [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 328-334.
- [16] 薛儒鸿,焦亮,刘小萍,等. 新疆阿尔泰山不同海拔西伯利亚落叶松径向生长对气候变化的响应稳定性评价[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1275-1284.
XUE R H, JIAO L, LIU X P, et al. Evaluation of the stability of the radial growth of *Larix sibirica* at different altitudes in response to climate change in Altai Mountains, Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1275-1284.
- [17] 易杰祥,吕亮雪,刘国道. 土壤酸化和酸性土壤改良研究[J]. *华南热带农业大学学报*, 2006(1): 23-28.
YI J X, LÜ L X, LIU G D. Research on soil acidification and acidic soil's melioration [J]. *Journal of South China University of Tropical Agriculture*, 2006(1): 23-28.
- [18] 林思祖,黄世国,曹光球,等. 杉木自毒作用的研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 661-664.
LIN S Z, HUANG S G, CAO G Q, et al. Autointoxication of Chinese fir [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 661-664.
- [19] 朱博超. 黄土高原针叶纯林腐殖层土壤对林下拟混交植物的化感效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
ZHU B C. The allelopathic effects of humus soil of coniferous pureforest on understory plants in the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [20] 张愿. 华北落叶松叶凋落物持水特性以及浸提液对其种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
ZHANG Y. Holding-water characteristics of litter and effect of litter extracts of leaves on seed germination and seedling growth of *Larix principis-rupprechtii* forest [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
- [21] 赵孟良,王紫莹,赵文菊,等. 菊芋块茎浸提液对生菜种子萌发生长的化感作用[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2205-2213.
ZHAO M L, WANG Z Y, ZHAO W J, et al. Allelopathic effects of extracts from Jerusalem artichoke tuber on seed germination and growth of *Lactuca sativa* L [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2205-2213.

- [22] 丁杰萍,闫志强,陈银萍,等. 差巴嘎蒿叶浸提液对4种沙地草本植物种子萌发的化感作用[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1436-1443.
DING J P, YAN Z Q, CHEN Y P, et al. Allelopathic effect of foliage water extract of *Artemisia halodendron* on seed germination of four herbaceous species in sandy land [J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(6): 1436-1443.
- [23] 杨立学. 落叶松对胡桃楸化感作用的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2006.
YANG L X. Study of larch allelopathy on manchurian walnut [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2006.
- [24] 陈新栋,曹文侠,王世林,等. 东祁连山灌丛凋落叶水浸提液对垂穗披碱草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(6): 2524-2534.
CHEN X D, CAO W X, WANG S L, et al. Effects of leaf litter aqueous extract on seed germination and seedling growth of *Elymus nutans* in Eastern Qilian Mountains [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2524-2534.
- [25] WILLIAMSON G B, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181-187.
- [26] 羊留冬,杨燕,王根绪,等. 森林凋落物对种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(9): 1820-1826.
YANG L D, YANG Y, WANG G X, et al. Effects of forest litter on seed germination and seedling growth: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(9): 1820-1826.
- [27] VOS M A E, DEN OUDEN J, HOOSBEEK M, et al. The sustainability of timber and biomass harvest in perspective of forest nutrient uptake and nutrient stocks[J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 530: 120791.
- [28] 罗侠,潘存德,黄闽敏,等. 天山云杉凋落物提取液对种子萌发和幼苗生长的自毒作用[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(1): 1-5.
LUO X, PAN C D, HUANG M M, et al. Autotoxicity of *Picea schrenkiana* litter aqueous extracts on seed germination and seedling growth [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2006, 43(1): 1-5.
- [29] SHEN S K, WU F Q, YANG G S, et al. Seed germination and seedling emergence in the extremely endangered species *Rhododendron protistum* var. *Giganteum* - the world's largest *Rhododendron* [J]. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 2015, 216: 65-70.
- [30] 孔垂华,徐涛,胡飞,等. 环境胁迫下植物的化感作用及其诱导机制[J]. 生态学报, 2000, 20(5): 849-854.
KONG C H, XU T, HU F, et al. Allelopathy under environmental stress and its induced mechanism [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 849-854.
- [31] 李俊,刘增文,田楠,等. 黄土高原人工林枯落叶对苜蓿的化感效应[J]. 草地学报, 2013, 21(1): 92-99.
LI J, LIU Z W, TIAN N, et al. Allelopathic effects of plantation defoliations on *Medicago sativa* in the Loess Plateau [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(1): 92-99.
- [32] 杜玲,曹光球,林思祖,等. 杉木根际土壤提取物对杉木种子发芽的化感效应[J]. 西北植物学报, 2003, 23(2): 323-327.
DU L, CAO G Q, LIN S Z, et al. Allelopathic effect of extractor of Chinese-fir rhizosphere soil on germination of Chinese-fir seed [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23(2): 323-327.
- [33] 袁娜,刘增文,祝振华,等. 黄土高原主要人工林树种对几种豆科牧草的化感作用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 87-92.
YUAN N, LIU Z W, ZHU Z H, et al. Study on allelopathic effects of main planted forest trees in the Loess Plateau on some legumes [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2012, 40(1): 87-92.
- [34] 左郎,王树森,马迎梅,等. 火炬树浸提液对两种草坪草种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(9): 1927-1933.
ZUO L, WANG S S, MA Y M, et al. Effect of torch tree extract on seeds germination in two types of turfgrass [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1927-1933.
- [35] ZHAO Y M, CHENG Y X, MA Y N, et al. Role of phenolic acids from the rhizosphere soils of *Panax notoginseng* as a double-edge sword in the occurrence of root-rot disease [J]. *Molecules*, 2018, 23(4): 819.