

# 不同种源和树龄油松年高生长量的比较及 主要气候影响因子分析

荆蓉, 彭祚登<sup>①</sup>

(北京林业大学林学院 森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**以河北省遵化市东陵林场内 23 个种源油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.) 试验林为研究对象,对各种源树龄 7~15 a 油松的年高生长量进行比较和变异分析,并采用冗余分析法研究各种源油松的年高生长量与当年和上一年气候因子的相关性。结果显示:不同种源的年高生长量均值以青海省互助县北山(P17)种源最低(15.18 cm)、陕西省洛南县黑山村(P12)种源最高(23.50 cm),而不同树龄的年高生长量均值则以树龄 15 a 最低(12.48 cm)、树龄 12 a 最高(26.42 cm)。方差分析结果表明:树龄 14 a 的年高生长量在种源间存在显著( $P<0.05$ )差异,其余树龄的年高生长量在种源间存在极显著( $P<0.01$ )差异;除 P17 种源外,其余 22 个种源的年高生长量在树龄间存在极显著差异。变异分析结果表明:不同种源的年高生长量变异系数均值为 31.08%~49.72%,不同树龄的年高生长量变异系数均值为 32.39%~45.10%。冗余分析结果表明:共有 5 个气候因子对油松的年高生长量有显著影响,影响力从大到小依次为当年 3 月至 5 月降水量、当年 3 月至 5 月地下 20 cm 温度、上一年 6 月至 8 月降水量、上一年 9 月至 11 月降水量、上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿度。其中,上一年 9 月至 11 月降水量和上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿度与供试种源油松的年高生长量呈正相关;上一年 6 月至 8 月降水量和当年 3 月至 5 月地下 20 cm 温度与供试种源油松的年高生长量呈负相关;当年 3 月至 5 月降水量与供试种源油松的年高生长量呈正相关和负相关 2 种情况。综上所述,油松的年高生长量在不同种源和树龄间基本存在极显著差异,供试区域油松的高生长主要受水分因子尤其是降水量的影响。

**关键词:**油松; 高生长; 种源; 树龄; 气候因子; 冗余分析

中图分类号: Q948.112; S791.254.06 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2021)05-0034-08

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2021.05.04

**Comparison on annual height growth increment of *Pinus tabulaeformis* of different provenances and tree ages and analysis on main climatic influencing factors** JING Rong, PENG Zuodeng<sup>①</sup> (The Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2021, 30(5): 34-41, 49

**Abstract:** Taking test forests of *Pinus tabulaeformis* Carr. from 23 provenances in Dongling Forest Farm of Zunhua City of Hebei Province as research objects, comparison and variation analysis were conducted for annual height growth increment of *P. tabulaeformis* from each provenance at tree ages of 7-15 a, and the correlations between annual height growth increment of *P. tabulaeformis* from each provenance and climatic factors in current and last years were researched by using redundancy analysis method. The results show that the average of annual height growth increment of provenance from Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province (P17) is the lowest (15.18 cm), while that of provenance from Heishan Village in Luonan County of Shaanxi Province (P12) is the highest (23.50 cm) among different provenances, and

收稿日期: 2021-03-02

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2017YFD0600500)

作者简介: 荆蓉(1997—),女,陕西榆林人,硕士研究生,主要从事油松培育研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: zuodeng@sina.com

引用格式: 荆蓉, 彭祚登. 不同种源和树龄油松年高生长量的比较及主要气候影响因子分析[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(5): 34-41, 49.

the average of annual height growth increment is the lowest (12.48 cm) at tree age of 15 a and the highest (26.42 cm) at tree age of 12 a among different tree ages. The variance analysis result shows that there is a significant ( $P < 0.05$ ) difference in annual height growth increment among provenances at tree age of 14 a, while there are extremely significant ( $P < 0.01$ ) differences in annual height growth increment among provenances at other tree ages; except for P17 provenance, there are extremely significant differences in annual height growth increment among tree ages of other 22 provenances. The variation analysis result shows that the averages of variation coefficients of annual height growth increment of different provenances are 31.08%–49.72%, and those of different tree ages are 32.39%–45.10%. The redundancy analysis result shows that 5 climatic factors have significant effects on annual height growth increment of *P. tabuliformis* in total, and the influence from great to small is precipitation from Mar. to May in current year, temperature at 20 cm underground from Mar. to May in current year, precipitation from Jun. to Aug. in last year, precipitation from Sep. to Nov. in last year, and mean relative air humidity from Mar. to May in last year. In which, precipitation from Sep. to Nov. in last year and mean relative air humidity from Mar. to May in last year show positive correlations with annual height growth increment of *P. tabuliformis* from test provenances; precipitation from Jun. to Aug. in last year and temperature at 20 cm underground from Mar. to May in current year show negative correlations with annual height growth increment of *P. tabuliformis* from test provenances; precipitation from Mar. to May in current year shows both positive and negative correlations with annual height growth increment of *P. tabuliformis* from test provenances. Taken together, there are extremely significant differences in annual height growth increment of *P. tabuliformis* among different provenances and tree ages in general, and height growth of *P. tabuliformis* in test area is mainly affected by moisture factors especially precipitation.

**Key words:** *Pinus tabuliformis* Carr.; height growth; provenance; tree age; climatic factor; redundancy analysis

树木的高生长受到内在遗传特性和外在环境条件的共同作用。研究表明:树木高生长在不同种源间差异显著<sup>[1-2]</sup>;气候因子是影响树木高生长的主要环境因子之一<sup>[3-4]</sup>。近年来,树木高生长与气候因子关系研究已成为树木生理生态研究的重点<sup>[5-12]</sup>。通过探讨树木高生长与气候因子的关系,可以了解气候因子对树木生长的影响,有助于在生产实践中采用恰当的管理措施,充分利用和调控气候因子,营造良好的树木生长条件,促进林木生长,实现优质、高效的森林培育目标<sup>[13]</sup>。

油松(*Pinus tabuliformis* Carr.)为针叶常绿乔木,是华北和西北地区的主要用材、观赏及防护树种<sup>[14-15]</sup>。油松高生长从第5年进入快速生长阶段,但在气候干热或立地条件较差的区域,油松高生长在第20年开始衰退<sup>[16]</sup>,因此,油松高生长快速阶段的生长状况对其成林、成材具有重要作用,该生长阶段也是油松生长过程中对气候环境变化最敏感的阶段,已有研究者对不同地区油松快速生长阶段的高生长与气候因子的关系进行了研究<sup>[17-21]</sup>,揭示了气候因子对油松高生长的影响,为油松人工林的优良种源选择及管理措施制定提供了理论依据。

本研究对河北省遵化市东陵林场内23个种源树

龄7~15 a油松的年高生长量进行了比较和变异分析,并采用冗余分析法研究了各种源油松的年高生长量与当年和上一年气候因子的关系,以期明确快速生长阶段油松高生长的变异规律及其主要气候影响因子,为油松人工林的科学经营和管理提供参考。

## 1 试验地概况和研究方法

### 1.1 试验地概况

本研究试验地为河北省遵化市东陵林场(东经117°15′、北纬40°12′),平均海拔120 m,平均坡度8°~10°。该区域气候属暖温带半湿润季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,全年四季分明,年均气温10.9℃,最低气温-16.7℃,最高气温34.1℃,年均降水量720 mm,每年7月至9月为雨季,平均无霜期181 d,年均日照时数2 608.2 h。

### 1.2 材料

供试23个种源油松人工试验林均为2005年移栽的2年生幼树,种源地信息见表1。所有试验林采用完全随机区组方式种植。每个小区(面积6 m×4 m)1个种源,各种植6株油松,株距2.0 m,行距2.0 m;25个小区构成1个大区(面积30 m×20 m),每个

表1 供试油松种源的种源地信息  
Table 1 Origin information of test provenances of *Pinus tabulaeformis* Carr.

编号 No.	种源地 Origin	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔/m Altitude
P1	辽宁省开原市八棵山镇 Bakeshu Town in Kaiyuan City of Liaoning Province	E124°40'	N42°20'	150
P2	辽宁省绥中县三山 Sanshan Mountain in Suizhong County of Liaoning Province	E119°42'	N40°13'	150
P3	内蒙古自治区克什克腾旗永合镇 Heyong Town in Keshkten Banner of Inner Mongolia Autonomous Region	E117°30'	N43°18'	1 500
P4	内蒙古自治区宁城县黑里河镇 Heilihe Town in Ningcheng County of Inner Mongolia Autonomous Region	E118°27'	N41°23'	1 100
P5	内蒙古自治区达拉旗乌拉山 Wula Mountain in Damao Banner of Inner Mongolia Autonomous Region	E109°10'	N40°50'	1 750
P6	河北省迁西县达峪村 Dayu Village in Qianxi County of Hebei Province	E118°18'	N40°07'	400
P7	河北省围场县燕格柏乡 Yangebai Township in Weichang County of Hebei Province	E119°10'	N42°04'	1 020
P8	山西省宁武县前吴家沟村 Qianwujiaogou Village in Ningwu County of Shanxi Province	E111°59'	N38°40'	1 100
P9	山西省文水县孝文山 Xiaowen Mountain in Wenshui County of Shanxi Province	E115°50'	N37°47'	1 300
P10	山西省沁水县中村村 Zhongcun Village in Qinshui County of Shanxi Province	E112°02'	N35°30'	1 620
P11	陕西省黄陵县腰坪乡 Yaoping Township in Huangling County of Shaanxi Province	E108°52'	N35°28'	830
P12	陕西省洛南县黑山村 Heishan Village in Luonan County of Shaanxi Province	E109°48'	N34°00'	1 450
P13	陕西省宁陕县火地塘林场 Huoditang Forest Farm in Ningshan County of Shaanxi Province	E108°19'	N33°19'	1 650
P14	宁夏回族自治区贺兰县贺兰山 Helan Mountain in Helan County of Ningxia Hui Autonomous Region	E105°53'	N38°59'	2 400
P15	甘肃省靖远县哈思山 Hasi Mountain in Jingyuan County of Gansu Province	E104°45'	N36°30'	2 300
P16	甘肃省两当县张家庄乡 Zhangjiasthuang Township in Liangdang County of Gansu Province	E106°16'	N33°53'	1 600
P17	青海省互助县北山 Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province	E102°00'	N37°18'	2 490
P18	四川省九寨沟县南坪 112 林场 Nanping 112 Forest Farm in Jiuzhaigou County of Sichuan Province	E104°05'	N33°10'	2 500
P19	四川省理县 302 林场 302 Forest Farm in Lixian County of Sichuan Province	E103°15'	N31°23'	2 500
P20	河南省栾川县老君山 Laojun Mountain in Luanchuan County of Henan Province	E111°20'	N33°57'	1 410
P21	河南省内乡县万沟村 Wangou Village in Neixiang County of Henan Province	E111°56'	N33°10'	1 520
P22	山东省泰山后石坞 Houshiwu in Taishan Mountain of Shandong Province	E117°06'	N31°15'	1 200
P23	河北省遵化市东陵乡 Dongling Township in Zunhua City of Hebei Province	E117°57'	N40°12'	120

大区有 2 个小区空置,共 6 个大区即 6 个重复。各大区的立地条件和田间管理措施完全一致,定期进行除草和病虫害防治。林地土壤以淋溶褐土和草甸褐土为主,土层厚度 50~60 cm,土壤母质类型为坡积母质。

### 1.3 方法

1.3.1 油松年高生长量测量 于 2018 年 8 月,在每个小区内选择 3 株生长良好、无病虫害并具有代表性的油松植株,根据油松生长具有生长节的特性,采用卷尺(精度 1.0 cm)测量植株顶端向下第 1 至第 9 个生长节的长度,以此代表树龄 15~7 a 的年高生长量。

1.3.2 气象数据来源 水热条件及水热组合是影响树木生长的主要气候因子<sup>[22]</sup>。树木生长不但与当年气候因子有关,还受到上一年气候因子的影响<sup>[23]</sup>,加上油松生长存在季节节律(每年 3 月至 5 月为高生长季)<sup>[24]</sup>,并且受到季节性气候因子的影响<sup>[25]</sup>,故按季节整理当年和上一年的气候因子数据。本研究共统计了 54 个气候因子,包括上一年 3 月至 5 月、上一年 6 月至 8 月、上一年 9 月至 11 月、上一年 12 月至当年 2 月及当年 3 月至 5 月、当年 6 月至 8 月的有效积温、

平均气温、极端最高温、极端最低温、平均空气相对湿度、降水量、地表温度、地下 10 cm 温度和地下 20 cm 温度。所有气象数据均来自遵化市气象站。

### 1.4 数据处理及统计分析

使用 SPSS 23.0 软件对不同种源和树龄油松的年高生长量进行方差分析,使用 Canoco 5.0 软件对各种源油松年高生长量与气候因子进行冗余分析并制图。根据各气候因子的箭头长度判断其对油松年高生长量的影响力,箭头越长表示影响力越大;根据各气候因子与种源的夹角判断二者的相关性,小于 90°为正相关,大于 90°为负相关,等于 90°则无相关性。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同种源和树龄油松年高生长量的比较和分析

2.1.1 比较结果 对不同种源和树龄油松的年高生长量进行比较,结果见表 2。从同一种源 9 个树龄年高生长量最大值与最小值的差值看,陕西省黄陵县腰坪乡(P11)种源最大,为 22.35 cm;青海省互助县北山(P17)种源最小,为 5.44 cm。其中,P11 种源在树

表2 不同种源和树龄油松年高生长量的比较 ( $\bar{X}\pm SD$ )  
Table 2 Comparison on annual height growth increment of *Pinus tabuliformis* Carr. of different provenances and tree ages ( $\bar{X}\pm SD$ )

种源 <sup>1)</sup> Provenance <sup>1)</sup>	不同树龄的年高生长量/cm Annual height growth increment at different tree ages									均值 Average
	7 a	8 a	9 a	10 a	11 a	12 a	13 a	14 a	15 a	
P1	20.77±6.78	26.64±6.78	29.07±6.03	21.71±9.53	22.95±7.16	28.00±11.88	18.82±9.15	13.82±6.59	14.43±5.91	21.95±9.34
P2	19.53±9.72	26.75±9.72	29.81±5.79	26.47±8.58	23.78±5.53	27.34±7.74	18.85±7.91	12.47±5.60	13.18±6.87	21.81±9.32
P3	14.50±6.99	17.63±6.99	23.19±7.83	24.19±8.53	24.56±8.65	21.63±9.36	12.75±4.40	17.50±6.78	12.97±5.80	18.07±8.56
P4	15.79±5.95	17.09±5.95	21.74±7.22	19.38±6.75	23.24±8.25	27.74±14.28	13.82±6.79	11.03±6.31	11.81±5.44	17.96±8.21
P5	15.61±7.12	20.72±7.12	24.47±9.81	23.31±7.40	24.42±7.68	27.67±8.90	16.25±6.78	15.44±6.73	10.81±4.92	19.37±8.88
P6	16.03±5.98	31.91±5.98	27.06±9.07	24.72±6.42	25.88±6.11	32.50±10.20	15.44±5.76	13.61±5.71	10.69±5.26	21.47±10.30
P7	14.70±7.43	17.60±7.43	19.33±5.89	17.93±4.91	22.50±4.17	25.30±9.85	15.90±6.72	14.77±6.07	10.97±3.88	17.10±7.75
P8	13.60±4.44	20.56±7.58	21.74±8.25	20.62±8.47	20.76±6.58	22.76±9.40	11.71±4.85	18.59±8.88	12.94±5.78	17.88±8.11
P9	17.53±5.64	20.00±5.64	23.93±8.49	18.83±5.18	21.87±5.48	25.77±6.83	14.93±5.86	14.32±4.71	14.50±4.74	18.95±7.48
P10	12.94±4.42	19.19±4.42	19.69±5.25	18.19±7.20	19.47±7.32	23.47±9.20	16.50±6.01	14.66±6.82	11.41±5.18	16.94±7.31
P11	16.03±7.41	23.19±7.41	26.94±6.13	24.69±7.91	25.53±7.81	35.41±7.96	18.78±5.85	18.34±5.36	13.06±5.59	21.99±9.32
P12	18.29±6.98	23.43±6.98	34.93±9.89	32.14±7.46	29.21±9.45	32.14±10.23	16.79±4.85	16.32±6.75	14.68±5.44	23.50±10.65
P13	18.40±8.89	26.53±8.89	30.13±9.73	22.53±7.25	25.40±8.71	28.03±13.33	15.37±6.49	11.93±5.89	11.60±5.53	21.25±10.55
P14	12.93±5.01	16.59±7.09	20.00±6.01	20.56±7.59	22.88±6.84	20.22±7.58	12.94±6.93	14.03±7.00	11.63±5.31	16.57±7.34
P15	15.53±6.39	18.41±6.39	16.25±7.19	18.06±7.54	20.03±7.62	17.07±6.71	10.14±4.61	16.82±8.38	10.91±5.41	15.52±7.05
P16	22.25±8.93	28.47±8.93	24.75±11.49	19.88±9.02	21.97±7.31	27.34±8.47	13.97±5.33	13.84±6.43	11.31±5.15	20.48±10.11
P17	17.69±6.39	16.31±5.39	17.06±7.99	15.25±5.44	15.79±7.56	15.53±7.57	13.61±6.40	16.30±5.07	12.25±4.66	15.18±9.44
P18	17.18±8.02	17.79±8.74	21.35±10.66	23.08±11.00	17.83±8.67	20.33±11.25	11.00±6.19	9.56±4.22	6.81±3.05	16.57±7.95
P19	16.64±7.23	23.50±7.82	27.31±12.00	26.81±13.34	22.88±8.01	24.38±9.83	12.65±5.47	17.14±7.99	14.65±5.92	20.27±9.02
P20	16.75±5.87	21.44±5.87	27.19±8.43	25.63±6.48	24.38±7.74	33.44±8.68	16.62±6.12	15.29±7.14	15.25±6.63	21.46±9.30
P21	15.82±6.22	26.44±6.22	32.85±8.98	29.32±12.32	26.59±6.92	30.59±11.31	16.56±7.00	13.40±6.08	16.27±7.11	22.55±9.92
P22	15.40±5.75	19.53±5.75	20.79±6.30	29.50±12.68	30.07±12.10	31.17±9.35	17.23±8.52	13.23±6.30	12.00±4.94	20.22±9.89
P23	21.35±6.52	25.73±6.52	27.92±8.13	25.46±12.15	28.62±9.73	28.08±10.33	19.04±5.80	13.42±6.15	12.35±5.24	22.48±10.23
均值 Average	16.75±7.39	21.94±9.42	24.70±9.41	22.84±9.28	23.53±8.18	26.42±10.72	15.21±6.62	14.65±6.81	12.48±5.66	

<sup>1)</sup> P1, P2. 辽宁省 Liaoning Province: P1. 开原市八棵树镇 Bakeshu Town in Kaiyuan City; P2. 绥中县三山 Sanshan Mountain in Suizhong County. P3-P5. 内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region: P3. 克什克腾旗永镇 Heyong Town in Keshkten Banner; P4. 宁城县黑里河镇 Heiluhe Town in Ningcheng County; P5. 达茂旗乌拉山 Wula Mountain in Damao Banner. P6, P7, P23. 河北省 Hebei Province: P6. 迁西县达峪村 Dayu Village in Qianxi County; P7. 围场县燕格柏乡 Yangebai Township in Weichang County; P23. 遵化市东陵乡 Dongling Township in Zunhua City. P8-P10. 山西省 Shanxi Province: P8. 宁武县前吴家沟村 Qianwujiagou Village in Ningwu County; P9. 文水县孝文山 Xiaowen Mountain in Wenshui County; P10. 沁水县中村村 Zhongcun Village in Qinshui County. P11-P13. 陕西省 Shaanxi Province: P11. 黄陵县腰坪乡 Yaoping Township in Huangling County; P12. 洛南县黑山村 Heishan Village in Luonan County; P13. 宁陕县火地塘林场 Huoditang Forest Farm in Ningshan County. P14. 宁夏回族自治区贺兰县贺兰山 Helan Mountain in Helan County of Ningxia Hui Autonomous Region. P15, P16. 甘肃省 Gansu Province: P15. 靖远县哈思山 Hasi Mountain in Jingyuan County; P16. 两当县张家庄乡 Zhangjiazhuang Township in Liangdang County. P17. 青海省互助县北山 Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province. P18, P19. 四川省 Sichuan Province: P18. 九寨沟县南坪 112 林场 Nanping 112 Forest Farm in Jiuzhaigou County; P19. 理县 302 林场 302 Forest Farm in Lixian County. P20, P21. 河南省 Henan Province: P20. 栾川县老君山 Laojun Mountain in Luanchuan County; P21. 内乡县万沟村 Wangou Village in Neixiang County. P22. 山东省泰山后石坞 Houshiwu in Taishan Mountain of Shandong Province.

龄 12 a 的年高生长量最高 (35.41 cm), 在树龄 15 a 的年高生长量最低 (13.06 cm); P17 种源在树龄 7 a 的年高生长量最高 (17.69 cm), 在树龄 15 a 的年高生长量最低 (12.25 cm)。比较不同种源间年高生长量的均值, 陕西省洛南县黑山村 (P12) 种源最高 (23.50 cm), 变幅为 14.68 ~ 34.93 cm; P17 种源最低 (15.18 cm), 变幅为 12.25 ~ 17.69 cm。

从同一树龄 23 个种源年高生长量最大值与最小值的差值看, 树龄 12 a 最大, 为 19.88 cm; 树龄 13 a 最小, 为 8.90 cm。比较不同树龄间年高生长量的均值, 树龄 12 a 最高 (26.42 cm), 变幅为 15.53 ~ 35.41 cm; 树龄 15 a 最低 (12.48 cm), 变幅为 6.81 ~ 16.27 cm。

2.1.2 方差分析结果 不同树龄油松年高生长量的

种源间方差分析结果 (表 3) 表明: 树龄 14 a 的年高生长量在种源间存在显著 ( $P < 0.05$ ) 差异, 其余树龄

表3 不同树龄油松年高生长量的种源间方差分析  
Table 3 Analysis on variance of annual height growth increment among provenances of *Pinus tabuliformis* Carr. at different tree ages

树龄/a Tree age	均方 Mean square	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value
7	192.243	22	4.481	0.000
8	298.407	22	3.982	0.000
9	359.463	22	4.792	0.000
10	258.477	22	3.424	0.000
11	196.372	22	3.251	0.000
12	441.234	22	4.601	0.000
13	98.018	22	2.324	0.001
14	96.082	22	1.648	0.035
15	96.742	22	2.293	0.001



的年高生长量在种源间存在极显著 ( $P < 0.01$ ) 差异, 说明油松年高生长量的种源间差异很大。

不同种源油松年高生长量的树龄间方差分析结果(表4)表明:除 P17 种源外,其余 22 个种源的年高生长量在树龄间均存在极显著差异,说明油松年高生长量的树龄间差异很大。

2.1.3 变异分析结果 不同种源和树龄油松年高生长量的变异系数见表5。结果表明:供试各种源年高

生长量的变异系数为 18.53%~68.14%。比较不同种源 9 个树龄的年高生长量变异系数均值,四川省九寨沟县南坪 112 林场 (P18) 种源最大 (49.72%), 山西省文水县孝文山 (P9) 种源最小 (31.08%), 说明油松年高生长量的种源间差异很大。比较不同树龄 23 个种源的年高生长量变异系数均值, 树龄 14 a 最大 (45.10%), 树龄 8 a 最小 (32.39%), 说明油松年高生长量的树龄间差异也很大。

表4 不同种源油松年高生长量的树龄间方差分析

Table 4 Analysis on variance of annual height growth increment among tree ages of *Pinus tabuliformis* Carr. from different provenances

种源 <sup>1)</sup> Provenance <sup>1)</sup>	均方 Mean square	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value	种源 <sup>1)</sup> Provenance <sup>1)</sup>	均方 Mean square	自由度 Degree of freedom	F 值 F value	P 值 P value
P1	427.041	8	6.363	0.000	P13	739.081	8	9.563	0.000
P2	680.580	8	11.468	0.000	P14	265.016	8	5.644	0.000
P3	361.588	8	6.123	0.000	P15	195.066	8	4.076	0.000
P4	588.520	8	9.047	0.000	P16	610.653	8	7.880	0.000
P5	539.143	8	9.010	0.000	P17	52.607	8	0.519	0.841
P6	1 043.336	8	18.209	0.000	P18	407.844	8	4.764	0.000
P7	280.696	8	6.143	0.000	P19	456.473	8	4.977	0.000
P8	282.654	8	4.761	0.000	P20	731.206	8	12.377	0.000
P9	232.550	8	4.337	0.000	P21	1 097.670	8	14.534	0.000
P10	228.400	8	5.184	0.000	P22	774.667	8	8.299	0.000
P11	725.385	8	15.024	0.000	P23	513.323	8	6.641	0.000
P12	891.969	8	14.153	0.000					

<sup>1)</sup> P1, P2. 辽宁省 Liaoning Province: P1. 开原市八棵树镇 Bakeshu Town in Kaiyuan City; P2. 绥中县三山 Sanshan Mountain in Suizhong County. P3-P5. 内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region: P3. 克什克腾旗永镇 Heyong Town in Keshkten Banner; P4. 宁城县黑里河镇 Heilike Town in Ningcheng County; P5. 达茂旗乌拉山 Wula Mountain in Damao Banner. P6, P7, P23. 河北省 Hebei Province: P6. 迁西县达峪村 Dayu Village in Qianxi County; P7. 围场县燕格柏乡 Yangabai Township in Weichang County; P23. 遵化市东陵乡 Dongling Township in Zunhua City. P8-P10. 山西省 Shanxi Province: P8. 宁武县前吴家沟村 Qianwujiagou Village in Ningwu County; P9. 文水县孝文山 Xiaowen Mountain in Wenshui County; P10. 沁水县中村村 Zhongcun Village in Qinshui County. P11-P13. 陕西省 Shaanxi Province: P11. 黄陵县腰坪乡 Yaoping Township in Huangling County; P12. 洛南县黑山村 Heishan Village in Luonan County; P13. 宁陕县火地塘林场 Huoditang Forest Farm in Ningshan County. P14. 宁夏回族自治区贺兰县贺兰山 Helan Mountain in Helan County of Ningxia Hui Autonomous Region. P15, P16. 甘肃省 Gansu Province: P15. 靖远县哈思山 Hasi Mountain in Jingyuan County; P16. 两当县张家庄乡 Zhangjiasthuang Township in Liangdang County. P17. 青海省互助县北山 Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province. P18, P19. 四川省 Sichuan Province: P18. 九寨沟县南坪 112 林场 Nanping 112 Forest Farm in Jiuzhaigou County; P19. 理县 302 林场 302 Forest Farm in Lixian County. P20, P21. 河南省 Henan Province: P20. 栾川县老君山 Laojun Mountain in Luanchuan County; P21. 内乡县万沟村 Wangou Village in Neixiang County. P22. 山东省泰山后石坞 Houshiwu in Taishan Mountain of Shandong Province.

表5 不同种源和树龄油松年高生长量的变异系数

Table 5 Coefficient of variation of annual height growth increment of *Pinus tabuliformis* Carr. of different provenances and tree ages

种源 <sup>1)</sup> Provenance <sup>1)</sup>	不同树龄油松年高生长量的变异系数/% Coefficient of variation of annual height growth increment of <i>P. tabuliformis</i> at different tree ages									均值 Average
	7 a	8 a	9 a	10 a	11 a	12 a	13 a	14 a	15 a	
P1	32.64	25.45	20.74	43.90	31.20	42.43	48.62	47.68	40.96	37.07
P2	49.77	36.34	19.42	32.41	23.25	28.31	42.00	44.91	52.14	36.51
P3	48.21	39.65	33.76	35.26	35.22	43.27	34.51	38.74	44.72	39.26
P4	37.68	34.82	33.21	34.83	35.50	51.48	49.13	57.21	46.08	44.22
P5	45.61	34.36	40.09	31.75	31.45	32.16	41.72	43.56	45.49	38.47
P6	37.31	18.74	33.52	25.97	23.61	31.38	37.31	41.95	49.20	33.23
P7	50.54	42.22	30.47	27.38	18.53	38.93	42.26	41.10	35.37	36.31
P8	50.21	36.87	37.95	41.08	31.70	41.30	41.42	47.75	44.67	41.44
P9	32.17	28.20	35.48	27.51	25.06	26.50	39.25	32.91	32.69	31.08

续表5 Table 5 (Continued)

种源 <sup>1)</sup> Provenance <sup>1)</sup>	不同树龄油松年高生长量的变异系数/% Coefficient of variation of annual height growth increment of <i>P. tabulaeformis</i> at different tree ages									均值 Average
	7 a	8 a	9 a	10 a	11 a	12 a	13 a	14 a	15 a	
P10	34.16	23.03	26.66	39.58	37.60	39.20	36.42	46.52	45.40	36.51
P11	46.23	31.95	22.75	32.04	30.59	22.48	31.15	29.23	42.80	32.14
P12	38.16	29.79	28.31	23.21	32.35	31.83	28.89	41.36	37.06	32.33
P13	48.32	33.51	32.29	32.18	34.29	47.56	42.23	49.37	47.67	40.82
P14	38.79	42.74	30.05	36.92	29.90	37.49	53.55	49.89	45.66	40.50
P15	41.15	34.71	44.25	41.75	38.04	39.29	45.45	49.80	49.59	42.67
P16	40.13	31.37	46.42	45.37	33.27	30.98	38.15	68.14	63.22	44.12
P17	36.12	33.05	46.83	35.67	47.87	48.74	47.02	31.09	38.04	40.49
P18	46.67	49.13	54.93	47.66	48.63	55.34	56.27	44.14	44.72	49.72
P19	43.45	33.28	43.94	49.76	35.01	40.32	43.24	46.61	40.38	41.77
P20	35.04	27.38	31.00	25.28	31.75	25.96	36.82	46.70	43.47	33.71
P21	39.32	23.52	27.34	42.02	26.02	36.97	42.27	45.40	43.73	36.29
P22	37.34	29.44	30.32	42.97	40.24	30.00	49.45	47.62	41.17	38.72
P23	30.54	25.34	29.12	47.72	34.00	36.79	30.46	45.83	42.43	35.80
均值 Average	40.84	32.39	33.86	36.62	32.83	37.34	41.64	45.10	44.20	

<sup>1)</sup> P1, P2. 辽宁省 Liaoning Province: P1. 开原市八棵山镇 Bakeshu Town in Kaiyuan City; P2. 绥中县三山 Sanshan Mountain in Suizhong County. P3–P5. 内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region: P3. 克什克腾旗永合镇 Heyong Town in Keshkten Banner; P4. 宁城县黑里河镇 Heilhe Town in Ningcheng County; P5. 达茂旗乌拉山 Wula Mountain in Damao Banner. P6, P7, P23. 河北省 Hebei Province: P6. 迁西县达峪村 Dayu Village in Qianxi County; P7. 围场县燕格柏乡 Yangebai Township in Weichang County; P23. 遵化市东陵乡 Dongling Township in Zunhua City. P8–P10. 山西省 Shanxi Province: P8. 宁武县前吴家沟村 Qianwujiagou Village in Ningwu County; P9. 文水县孝文山 Xiaowen Mountain in Wenshui County; P10. 沁水县中村村 Zhongcun Village in Qinshui County. P11–P13. 陕西省 Shaanxi Province: P11. 黄陵县腰坪乡 Yaoping Township in Huangling County; P12. 洛南县黑山村 Heishan Village in Luonan County; P13. 宁陕县火地塘林场 Huoditang Forest Farm in Ningshan County. P14. 宁夏回族自治区贺兰县贺兰山 Helan Mountain in Helan County of Ningxia Hui Autonomous Region. P15, P16. 甘肃省 Gansu Province: P15. 靖远县哈思山 Hasi Mountain in Jingyuan County; P16. 两当县张家庄乡 Zhangjiazhuang Township in Liangdang County. P17. 青海省互助县北山 Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province. P18, P19. 四川省 Sichuan Province: P18. 九寨沟县南坪 112 林场 Nanping 112 Forest Farm in Jiuzhaigou County; P19. 理县 302 林场 302 Forest Farm in Lixian County. P20, P21. 河南省 Henan Province: P20. 栾川县老君山 Laojun Mountain in Luanchuan County; P21. 内乡县万沟村 Wangou Village in Neixiang County. P22. 山东省泰山后石坞 Houshiwu in Taishan Mountain of Shandong Province.

## 2.2 各种源油松年高生长量与气候因子的冗余分析

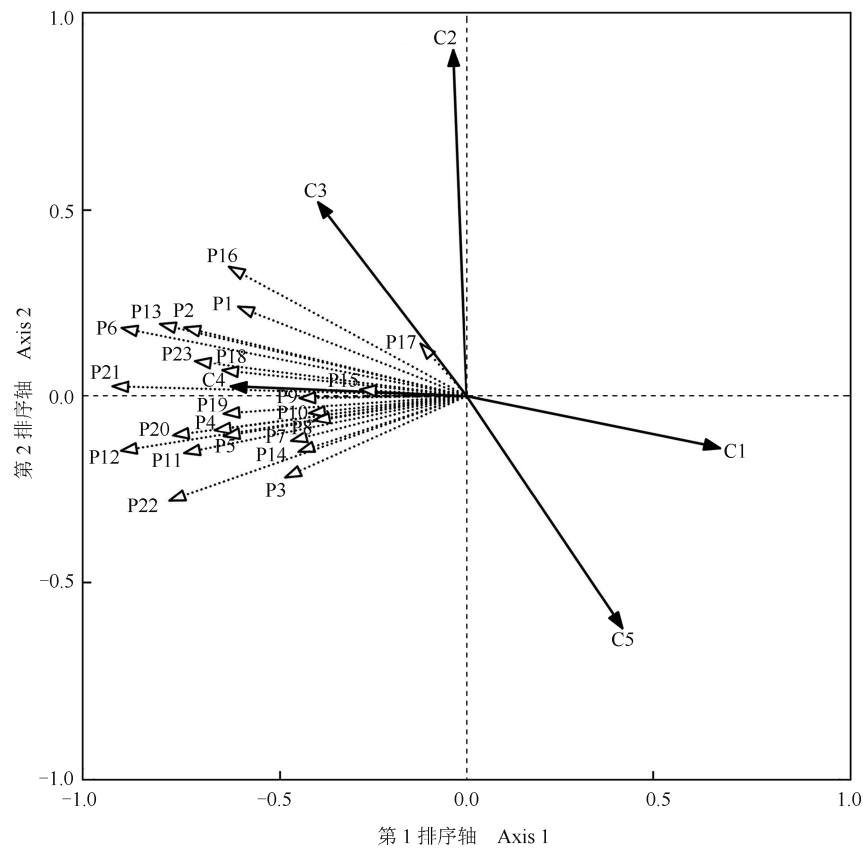
供试 23 个种源油松年高生长量与气候因子的冗余分析结果表明:共有 5 个气候因子显著( $P < 0.05$ )影响油松的年高生长量,影响力从大到小依次为当年 3 月至 5 月降水量、当年 3 月至 5 月地下 20 cm 温度、上一年 6 月至 8 月降水量、上一年 9 月至 11 月降水量、上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿度(图 1)。其中,上一年 9 月至 11 月降水量和上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿度与供试 23 个种源油松的年高生长量均呈正相关;上一年 6 月至 8 月降水量和当年 3 月至 5 月地下 20 cm 温度与供试 23 个种源油松的年高生长量均呈负相关;当年 3 月至 5 月降水量与 11 个种源油松的年高生长量呈正相关,与 12 个种源油松的年高生长量呈负相关。

## 3 讨论和结论

树木的年高生长量是评价树木高生长速度的重

要指标,不仅随树龄而变化,还受气候因子影响<sup>[21]</sup>。本研究结果表明:同一树龄不同种源间油松的年高生长量基本上存在极显著( $P < 0.01$ )差异,除青海省互助县北山(P17)种源外,其余 22 个种源不同树龄间油松的年高生长量也存在极显著差异。由于供试各种源油松的试验林田间条件和管理措施一致,排除了栽培和管理条件的干扰,初步判断造成相同树龄不同种源间油松年高生长量存在差异的原因是种源间变异,而造成相同种源不同树龄油松年高生长量差异的原因是气候因子。

研究表明:气候因子对树木生长存在滞后效应<sup>[26]</sup>。陈云明等<sup>[18]</sup>认为影响黄土丘陵区油松高生长的主导气候因子为上一年降水量,而李亚男<sup>[27]</sup>认为油松生长主要受上一年生长结束季降水量的影响。本研究结果表明:对油松年高生长量有显著( $P < 0.05$ )影响的 5 个气候因子中,上一年的气候因子有 3 个,分别为上一年 6 月至 8 月降水量、上一年 9 月至 11 月降水量和上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿



P1, P2. 辽宁省 Liaoning Province; P1. 开原市八棵树镇 Bakeshu Town in Kaiyuan City; P2. 绥中县三山 Sanshan Mountain in Suizhong County. P3-P5. 内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region; P3. 克什克腾旗合永镇 Heyong Town in Keshkten Banner; P4. 宁城县黑里河镇 Heilihe Town in Ningcheng County; P5. 达茂旗乌拉山 Wula Mountain in Damao Banner. P6, P7, P23. 河北省 Hebei Province; P6. 迁西县达峪村 Dayu Village in Qianxi County; P7. 围场县燕格柏乡 Yangebai Township in Weichang County; P23. 遵化市东陵乡 Dongling Township in Zunhua City. P8-P10. 山西省 Shanxi Province; P8. 宁武县前吴家沟村 Qianwujiagou Village in Ningwu County; P9. 文水县孝文山 Xiaowen Mountain in Wenshui County; P10. 沁水县中村村 Zhongcun Village in Qinshui County. P11-P13. 陕西省 Shaanxi Province; P11. 黄陵县腰坪乡 Yaoping Township in Huangling County; P12. 洛南县黑山村 Heishan Village in Luonan County; P13. 宁陕县火地塘林场 Huoditang Forest Farm in Ningshan County. P14. 宁夏回族自治区贺兰县贺兰山 Helan Mountain in Helan County of Ningxia Hui Autonomous Region. P15, P16. 甘肃省 Gansu Province; P15. 靖远县哈思山 Hasi Mountain in Jingyuan County; P16. 两当县张家庄乡 Zhangjiazhuang Township in Liangdang County. P17. 青海省互助县北山 Beishan Mountain in Huzhu County of Qinghai Province. P18, P19. 四川省 Sichuan Province; P18. 九寨沟县南坪 112 林场 Nanping 112 Forest Farm in Jiuzhaigou County; P19. 理县 302 林场 302 Forest Farm in Lixian County. P20, P21. 河南省 Henan Province; P20. 栾川县老君山 Laojun Mountain in Luanchuan County; P21. 内乡县万沟村 Wangou Village in Neixiang County. P22. 山东省泰山后石坞 Houshiwu in Taishan Mountain of Shandong Province. C1: 上一年 6 月至 8 月降水量 Precipitation from Jun. to Aug. in last year; C2: 当年 3 月至 5 月降水量 Precipitation from Mar. to May in current year; C3: 上一年 9 月至 11 月降水量 Precipitation from Sep. to Nov. in last year; C4: 上一年 3 月至 5 月平均空气相对湿度 Mean relative air humidity from Mar. to May in last year; C5: 当年 3 月至 5 月地下 20 cm 温度 Temperature at 20 cm underground from Mar. to May in current year.

图中仅展示与油松年高生长量显著 ( $P < 0.05$ ) 相关的气候因子 The figure only shows the climatic factors significantly ( $P < 0.05$ ) correlated with annual height growth increment of *Pinus tabulaeformis* Carr.

图 1 不同种源油松年高生长量与气候因子的冗余分析

Fig. 1 Redundancy analysis on annual height growth increment of *Pinus tabulaeformis* Carr. from different provenances with climatic factors

度。上一年 6 月至 8 月降水量与油松年高生长量呈显著负相关,说明随着上一年 6 月至 8 月降水量升高,供试种源油松的年高生长量明显减小。究其原因:油松属低耗水树种<sup>[28]</sup>,具有较强的耐旱性,且根系生长在 8 月较为旺盛;本研究试验地气候属于暖温带半湿润季风气候,每年的降水主要集中在 7 月和 8 月,上一年 6 月至 8 月降水量增大会导致土壤过于潮

湿,不利于油松根系生长,从而影响根系对水分和无机盐的吸收;上一年 6 月至 8 月的阴雨天多会造成油松生境光照不足,油松光合作用水平下降<sup>[29]</sup>,营养物质存储量降低,致使下一年油松高生长减缓。上一年 9 月至 11 月降水量与油松年高生长量呈显著正相关,说明随着上一年 9 月至 11 月降水量升高,供试种源油松的年高生长量明显增大。这是因为试验地在

每年9月至11月较为寒冷、干燥,充足的降水可促进油松冬芽发育,有利于下一年叶量增加,而叶量增加有利于光合作用增强,进而增加营养物质存储量;另外,9月至11月降水充足还有利于油松根系生长,促进下一年油松的高生长。上一年3月至5月平均空气相对湿度与油松年高生长量也呈显著正相关,说明随着上一年3月至5月平均空气相对湿度升高,供试种源油松的年高生长量明显增大。由于油松高生长季平均空气相对湿度增加可消除油松叶片的“午休”现象,促进叶片的气孔开放,提高净光合速率<sup>[30-31]</sup>,促进叶片光合作用和根系对养分的吸收,有利于营养物质的积累和储存,从而促进下一年油松的高生长。

值得注意的是,虽然对油松年高生长量有显著影响的当年气候因子仅2个(即当年3月至5月降水量和当年3月至5月地下20 cm温度),但这2个气候因子对油松年高生长量的影响力大于上一年的3个气候因子。当年3月至5月降水量与11个种源油松的年高生长量呈显著正相关,与其余种源的年高生长量呈负相关,说明随着当年3月至5月降水量升高,这11个种源油松的年高生长量增大,而其余种源油松的年高生长量却减小。推测这一研究结果可能与不同种源油松的水分利用能力差异有关<sup>[32]</sup>。部分种源在生长季降水量升高后,植株的水分吸收和光合能力增强,营养物质不断合成,有利于植株的高生长;而另一部分种源在生长季降水量过多时植株根系对水分和无机盐的吸收能力下降,光合作用减弱,营养物质合成水平下降,不利于植株的高生长。当年3月至5月地下20 cm温度与油松年高生长量呈显著负相关,说明随着当年3月至5月地下20 cm温度升高,23个种源油松的年高生长量减小。这可能与油松为深根性树种,吸收根主要分布在地下20~40 cm土层中,而地下20 cm温度在油松高生长季升高有关。升温可促进土壤水分蒸发<sup>[33]</sup>,增强油松根部的呼吸作用,增大养分和能量消耗<sup>[3,34]</sup>,体内储存的用于高生长的物质和能量被消耗,抑制油松高生长。

综上所述,油松的年高生长量在不同种源和树龄间基本上均存在极显著差异。水分因子,尤其是降水量是影响油松高生长的主导气候因子。

#### 参考文献:

[1] 王艺,张蕊,冯建国,等.不同种源南方红豆杉生长差异分析及早期速生优良种源筛选[J].植物资源与环境学报,2012,

- 21(4): 41-47.
- [2] 王标,虞木奎,王臣,等.不同种源麻栎苗期生长性状差异及聚类分析[J].植物资源与环境学报,2008,17(4): 1-8.
- [3] 唐光金,王进鑫,靳林.充分供水下几种幼树的高生长动态分析[J].西北林学院学报,2006,21(1): 54-56.
- [4] 符建明,沈熙环,朱少彬.14年生油松测定林树高生长分析[J].林业科学,1990,26(5): 457-460.
- [5] 刘春延,谷建才,李吉跃,等.塞罕坝华北落叶松生长与气候因子的相关分析[J].北京林业大学学报,2009,31(4): 102-105.
- [6] 杨凯,邓龙,李太烈.气候因子对长白落叶松年际高生长的影响[J].黑龙江气象,1994(4): 37-38.
- [7] 王伟峰,廖为明,王强,等.樟子松人工林树高生长对气候因子的响应研究[J].江西林业科技,2009,8(3): 1-5.
- [8] 涂洁.中亚热带红壤丘陵区湿地松生长与气候因子的相关分析[J].浙江林业科技,2010,30(1): 70-73.
- [9] 邹桂霞,高鹏,李晓华,等.气候因子对杨树速生林生长的影响[J].吉林林学院学报,1999,15(1): 3-5.
- [10] 周腊虎.河西走廊气候因子对杨树防护林生长量影响的差异性分析[J].甘肃农业大学学报,2002,37(4): 447-451.
- [11] 李永良.气候因子与西宁市人工青杨林年高生长量的相关性分析[J].安徽农业科学,2019,47(11): 210-212.
- [12] 秦光华,宋玉民,乔玉玲,等.旱柳苗高年生长与气象因子的灰色关联度[J].东北林业大学学报,2019,47(5): 42-45,51.
- [13] 肖瑜.环境因素对油松林木材生产影响的定量评价[J].应用生态学报,1990,1(3): 193-200.
- [14] 黄耀,王乃江,裴乔,等.庆阳地区油松人工林多功能评价研究[J].华南农业大学学报,2017,38(1): 109-115.
- [15] 苟志辉.施氮对油松幼苗生长及生理特性的影响[J].江苏林业科技,2019,46(6): 23-26.
- [16] 沈国舫.中国主要树种造林技术:上册[M].2版.北京:中国林业出版社,2020: 59-60.
- [17] 吕赞鄙,武康生,张成梁.石灰岩山地油松人工林年际高生长量与气象因子的相关分析[J].北京林业大学学报,1991,13(3): 101-104.
- [18] 陈云明,吴钦孝,刘向东,等.黄土丘陵区油松生长与气候因子相关分析[J].水土保持通报,1996,16(2): 38-42.
- [19] 丁晓纲,李吉跃,哈什格日乐.毛乌素沙地气候因子对樟子松、油松生长的影响[J].河北林果研究,2005(4): 7-11.
- [20] 杨美灵.蛮汉山樟子松、油松人工林生长规律及对环境响应研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学林学院,2008: 28-30.
- [21] 吕宁,张斌善,王培新,等.汉中RPA拌种飞播油松高生长与降水关系分析[J].西北林学院学报,2016,31(2): 140-148.
- [22] PENG J, PENG K, LI J. Climate-growth response of Chinese white pine (*Pinus armandii*) at different age groups in the Baiyunshan National Nature Reserve, central China [J]. Dendrochronologia, 2018, 49: 102-109.



- Bulletins, 1981, 33: 477-491.
- [31] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [32] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落叶 C : N : P 生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [33] 张珂, 陈永乐, 高艳红, 等. 阿拉善荒漠典型植物功能群氮、磷化学计量特征[J]. 中国沙漠, 2014, 34(5): 1261-1267.
- [34] PATTERSON T B, GUY R D, DANG Q L. Whole-plant nitrogen- and water-relations traits and their associated trade-offs in adjacent muskeg and upland boreal spruce species[J]. *Oecologia*, 1997, 110: 160-168.
- [35] LIVINGSTON N J, GUY R D, ETHIER G J. The effects of nitrogen stress on the stable carbon isotope composition, productivity and water use efficiency of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) seedlings[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1999, 22: 281-289.
- [36] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266.
- [37] THOMPSON K, PARKINSON J A, BAND S R, et al. A comparative study of leaf nutrient concentrations in a regional herbaceous flora[J]. *New Phytologist*, 1997, 136(4): 679-689.
- [38] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶养分的季节动态与回收效率[J]. 植物生态学报, 2001, 25(1): 76-82.
- [39] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 261-266.
- [40] 刘增文, 陈凯, 米彩虹, 等. 陕西关中地区常见树种落叶前 N、P、K 养分回流现象的研究[J]. 西北农林科技大学学报, 2009, 37(12): 98-104.
- [41] VERGUTZ L, MANZONI S, PORPORATO A, et al. Global resorption efficiencies and concentrations of carbon and nutrients in leaves of terrestrial plants[J]. *Ecological Monographs*, 2012, 82(2): 205-220.
- [42] 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 新疆塔里木河下游胡杨不同叶形水势变化研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 83-88.
- [43] 司建华, 常宗强, 苏永红, 等. 胡杨叶片气孔导度特征及其对环境因子的响应[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 125-130.

(责任编辑: 郭严冬)

(上接第41页 Continued from page 41)

- [23] DANG H, ZHANG Y, ZHANG K, et al. Climate-growth relationships of subalpine fir (*Abies fargesii*) across the altitudinal range in the Shennongjia Mountains, central China[J]. *Climatic Change*, 2013, 117(4): 903-917.
- [24] 陈礼芬, 黄小凤, 蔡楚雄, 等. 东莞生态公益林改造树种的早期生长季节节律及其与气候条件的关系[J]. 广东林业科技, 2007, 23(1): 28-33.
- [25] SUN J, LIU Y. Age-independent climate-growth response of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis* Carrière) in North China[J]. *Trees*, 2015, 29: 397-406.
- [26] 夏冰, 兰涛, 贺善安, 等. 西天目山黄山松阔叶林的冠层干扰与动态推测[J]. 植物资源与环境, 1995, 4(3): 15-20.
- [27] 李亚男. 黄土高原油松人工林碳储量与径向生长对气候的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学水土保持研究所, 2020: 27-35.
- [28] 杨建伟, 梁宗锁, 韩蕊莲, 等. 不同土壤水分下刺槐和油松的生理特征[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(3): 12-17.
- [29] 许玲玲, 同小娟, 张劲松, 等. 山西灵空山油松径向生长对气候变化的响应[J]. 中国农业气象, 2020, 41(6): 357-367.
- [30] 许大全, 李德耀, 沈允钢, 等. 田间小麦叶片光合作用“午睡”现象的研究[J]. 植物生理学报, 1984, 10(3): 269-276.
- [31] 张爽, 董然, 董妍, 等. 不同空气相对湿度对槭叶草生长及光合生理特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(3): 24-27, 36.
- [32] 王琰, 陈建文, 狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征[J]. 生态学报, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [33] 张晴, 于瑞德, 郑宏伟, 等. 天山东部不同海拔西伯利亚落叶松对气候变暖的响应分析[J]. 植物研究, 2018, 38(1): 14-25.
- [34] 乔晶晶, 王童, 潘磊, 等. 不同海拔和坡向马尾松树轮宽度对气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2231-2240.

(责任编辑: 佟金凤)