

11 个白杨派无性系抗旱性综合评价

郑 涛,樊军锋*,高建社,周永学

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

摘 要:以西北农林科技大学选育的 5 个 I-101(*Populus alba*) \times 84K(*P. alba* \times *P. glandulosa*)的优良杂种无性系(秦白杨 1 号、秦白杨 2 号、秦白杨 3 号、‘02-21-13’、‘02-3-32’)、6 个 I-101(*P. alba*) \times 毛白杨(*Populus tomentosa*)的优良杂种无性系(‘03-4-22’、‘04-14-15’、‘04-17-12’、‘07-17-18’、‘07-23-23’、‘07-30-11’)和 3 个对照无性系(84K、I-101、毛白杨)为供试材料,在不同程度水分胁迫下,对各无性系生长、生理差异进行分析。对各指标进行相关性分析,筛选适宜的指标,对各无性系抗旱能力进行综合评价。各无性系的大部分指标间存在显著差异,以叶片脯氨酸含量、叶片相对电导率、净光合速率、苗高、单叶面积、生物量为抗旱性综合评价的指标。结果表明,采用 TOPSIS 法评价各无性系的抗旱能力,抗旱能力较强的为‘02-21-13’、‘02-3-32’、‘03-4-22’、‘04-14-15’、‘07-17-18’秦白杨 1 号秦白杨 3 号。

关键词:白杨派;水分胁迫;抗旱性;TOPSIS;综合评价

中图分类号:S792.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2019)04-0101-06

On the Comprehensive Evaluation of Drought Resistance of 11 Poplar Clones

ZHENG Tao, FAN Jun-feng*, GAO Jian-she, ZHOU Yong-xue

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Taking five hybrids of I-101(*Populus alba*) \times 84K(*P. alba* \times *P. glandulosa*), six hybrids of I-101 \times *P. tomentosa* bred by Northwest A&F University and three control clones(84K, I-101, *P. tomentosa*) as experimental materials, the growth and physiology of various clones under different water stresses were observed. Correlation analyses between the indices were conducted to screen out suitable indices for the comprehensive evaluation of drought resistance of the clones. There were significant differences among the clones. Indices for the evaluation were the net photosynthetic rate, the single leaf area, seedling height, biomass, osmotic regulation ability and cell membrane permeability. The result of the application of the technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) indicated that the clones with strong drought resistance were ‘02-21-13’, ‘02-3-32’, ‘03-4-22’, ‘04-14-15’, ‘07-17-18’, Qin Baiyang-1 and Qin Baiyang-3.

Key words: Sect. *Leuce*; drought resistance; water stress; TOPSIS; comprehensive evaluation

杨树(*Populus*)在我国分布广泛,白杨派(*Leuce*)树种是西北的乡土树种,我国的干旱区域还集中在西北地区^[1],杨树的生长只能依靠当年的降雨和灌溉维持生长。在缺水严重的地区,杨树难以栽植或生长缓慢,难以发挥出杨树的巨大生态效益。

J. Levitt^[2]和 N. C. Turner^[3]等根据植物不同的抗旱机理,分为躲旱型、避旱型和耐旱型。植物的抗旱机理十分复杂,植株的形态、叶片的解剖结构和体内生理物质的变化都能影响植株的抗旱能力。这些指标之间互相影响,单一指标的评价,不能够反应

收稿日期:2018-09-07 修回日期:2019-03-09

基金项目:陕西渭河平原区白杨工业资源材高效培育技术研究(2016YFD060040302)。

作者简介:郑 涛,男,硕士在读,研究方向:林木遗传育种林业生物技术。E-mail:1518595978@qq.com

* 通信作者:樊军锋,男,博士,教授,研究方向:杨树新品种选育及油松遗传改良。E-mail:fanjf28@163.com

植物的抗旱能力,选取多指标综合评价的方法,能够较为准确地反映出植物的抗旱能力^[4]。选取的白杨派优良杂种无性系(*Populus tomentosa*)已经在新疆、青海、甘肃、宁夏、山西、陕西等西北省份进行区域栽培试验,筛选抗旱能力强的品种是推广栽植的重要环节。以选取的优良杂种无性系为试验材料、84K、I-101、毛白杨为对照,测定与抗旱有关的生理、生长指标,进行差异分析、相关性分析,对各无性系的抗旱能力进行初步比较,为白杨派无性系抗旱品种选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

参试材料包括 5 个 I-101(*P. alba*)×84K(*P. alba*×*P. glandulosa*)的优良杂种无性系(秦白杨 1 号、秦白杨 2 号、秦白杨 3 号、‘02-21-13’、‘02-3-32’)、6 个 I-101(*P. alba*)×毛白杨(*Populus tomentosa*)的优良杂种无性系(‘03-4-22’、‘04-14-15’、‘04-17-12’、‘07-17-18’、‘07-23-23’、‘07-30-11’)和 3 个对照无性系(84K、I-101、毛白杨)。所有供试材料均来源于周至渭河实验站。

1.2 试验方法

取各无性系 1 年生扦插苗的苗干截取插穗,于 2018 年 3 月中旬扦插于高为 30 cm、直径为 30 cm 的塑料盆中,各盆中装取 10 kg 关中平原的黄土盆中装土 10 kg,(田间持水量为 25%)。盆栽苗木放置于西北农林科技大学林学院实验楼后的科研大棚中,各无性系的扦插苗正常生长,于 6 月 10 日进行控水处理,控水 40 d。设置 100%(CK)、60%(I)、30%(II)3 种土壤含水量,每个土壤含水量水平设 3 次重复,每个重复 3 盆,完全随机区组排列。试验开始后,每天 8:00 和 18:00 采用称重法对各个处理进行人工补水,使各处理保持在设定含水量的范围内。控水结束后,测定各无性系幼苗的叶片净光合速率、蒸腾速率、脯氨酸含量、相对电导率及幼苗的生物量。

1.3 测定指标

1.3.1 苗高、地径 用皮尺、刻度尺测定幼苗株高,游标卡尺测定地径。

1.3.2 生物量 指标测定完毕后,采集各无性系苗木的茎、根、叶,将样品在 105℃下杀青 30 min,于 70℃下烘至恒重;并用 AM300 叶面积测定仪测定叶面积。

1.3.3 光合特性测定 Li-6400 型光合仪测定,在晴天 9:00—12:00 测定苗木同部位长势一致的功能叶片的净光合速率、蒸腾速率。

1.3.4 细胞膜透性 用相对电导率表示。使用 DDS-307A 电导仪测定无性系同部位长势一致功能叶片的电导值,相对电导率(%)=实测电导值/绝对电导值。

1.3.5 渗透调节 用叶片中脯氨酸含量表示,用茚三酮显色法^[4]测定无性系同部位长势一致功能叶片的脯氨酸含量。

1.4 数据分析方法及数学模型

无性系指标数据的综合评判采用模糊隶属函数进行定量转换,使用 EXCEL2007 进行数据统计,SPSS19.0 进行指标间的方差分析、相关性分析。

隶属函数公式为:

$$U(X_i)=\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{1}$$

式中, $U(X_i)$ 为隶属函数值, X_i 为无性系某项指标测定值, X_{\max} 和 X_{\min} 为所有参试无性系中某一指标内的最大值和最小值。

若某指标与综合评判结果为负相关,则用反隶属函数进行定量转换,计算公式为:

$$U(X_i)=1-\frac{X_i-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

各无性系抗旱能力综合评价采用 TOPSIS 法,使用 MATLAB 2014b 软件进行数据处理^[5]。

2 结果与分析

2.1 白杨派无性系抗旱能力综合评价指标体系

为了综合评价各无性系的抗旱能力,本试验根据 J. Levitt(1980)^[2]和 N. C. Turner(1983)^[3]对植物抗旱机理的相关研究,建立了白杨派无性系综合评价的评价指标体系(表 1),指标体系涵盖了无性系对干旱的适应能力和在干旱胁迫下的生产力,基于这 2 方面能够在抗旱能力的综合评价更加客观^[6]。

表 1 白杨无性系抗旱性评价指标体系

Table 1 Identification index system of drought resistance of poplar clones

性状	指标
干旱适应力	根茎比
	蒸腾速率
	渗透调节
	细胞质膜透性
干旱生产力	净光合速率
	单叶面积
	苗高
	地径
	根干重
	茎干重
	生物量

2.1.1 无性系对干旱的适应能力 蒸腾速率:处理Ⅱ与 CK 各白杨无性系的蒸腾速率均值的比值来表示,计算隶属函数值;在水分胁迫下,无性系的蒸腾呈现下降趋势来减少叶片水分的散失,维持植株体内水分的平衡。根茎比:处理Ⅱ与 CK 根/茎的均值相比来表示,计算隶属函数值。渗透调节:处理Ⅱ与 CK 叶片脯氨酸的含量均值的比值来表示,计算隶属函数值。细胞膜透性:处理Ⅱ与 CK 相对电导率均值的比值来表示,再计算隶属函数值。

表 2 白杨派无性系干旱适应力的综合评价

Table 2 The comprehensive evaluation of drought resistance in clonal system

无性系	渗透调节	膜透性	蒸腾速率	根茎比	综合评价	位次
秦白杨 1 号	1.000 0	0.874 5	0.436 5	0.230 1	0.635 3	2
秦白杨 2 号	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.789 0	0.447 3	7
秦白杨 3 号	0.098 0	0.615 9	0.319 7	0.000 0	0.258 4	14
02-21-13	0.140 2	0.621 0	0.522 6	0.403 7	0.421 9	8
02-3-32	0.770 6	0.494 1	0.623 8	1.000 0	0.722 1	1
03-4-22	0.290 6	0.211 0	0.659 0	0.722 5	0.470 8	6
04-14-15	0.339 8	0.456 1	1.000 0	0.735 0	0.632 7	3
04-17-12	0.428 2	0.704 2	0.102 4	0.447 7	0.420 6	9
07-17-18	0.755 8	0.470 8	0.785 2	0.507 2	0.629 7	4
07-30-11	0.015 4	0.000 0	0.937 9	0.364 3	0.329 4	13
07-23-23	0.060 8	0.263 0	0.444 8	0.878 5	0.411 8	10
84K	0.250 7	0.835 9	0.486 4	0.444 4	0.504 3	5
I-101	0.155 2	0.275 4	0.304 6	0.651 1	0.346 6	12
毛白杨	0.033 5	0.706 2	0.157 6	0.682 7	0.395 0	11

2.1.2 抗旱生产力 无性系的抗旱生产力用单叶面积、净光合速率、苗高、地径、茎干重、根干重、生物量来表示,以处理Ⅰ、处理Ⅱ统计得到的均值与 CK 的均值相比,计算隶属函数值。

表 3 表明,各无性系在中度水分胁迫下,抗旱生产力不同;在中度水分胁迫下,抗旱生产力较强的为‘02-3-32’‘02-21-13’‘03-4-22’‘04-14-15’‘07-17-18’、84K、秦白杨 2 号、秦白杨 3 号,在重度水分胁迫下表现较好的为‘02-21-13’‘07-17-18’‘07-30-11’‘07-23-23’、I-101、秦白杨 1 号、秦白杨 2 号、秦白杨 3 号。随着土壤含水量由 60%下降到 40%,抗旱生产力变化最大的无性系为‘03-4-22’‘04-14-15’‘07-30-11’、I-101、84K,‘03-4-22’由第 6 位下降为第 14 位,‘04-14-15’由第 1 位下降为第 13 位,84K 由第 2 位下降为第 11 位,‘07-30-11’由第 13 位升至第 4 位、I-101 由第 14 位升至第 5 位。

根据白杨派无性系在中度、重度水分胁迫下的抗旱适应能力和抗旱生产力,能够得到抗旱能力较强的无性系为‘02-21-13’‘07-17-18’、秦白杨 2 号,其中‘02-3-32’‘03-4-22’‘04-14-15’在抗旱适应力表现较好,‘02-21-13’‘07-17-18’在抗旱生产力上表现较好。

表 2 表明,白杨派无性系对干旱的适应能力不同,各无性系在中度和重度水分胁迫下呈现出不同的抗旱水平;大多数无性系的综合评价均高于对照品种毛白杨、I-101。供试材料中‘02-3-32’‘02-21-13’‘03-4-22’‘04-14-15’‘07-17-18’、84K、秦白杨 1 号、秦白杨 2 号等无性系对干旱适应性较强,但不同的无性系在抵御干旱的途径上却不一样,如秦白杨 1 号、‘07-17-18’在耐旱水平表现较好;‘02-3-32’‘03-4-22’‘04-14-15’在避旱能力上表现较好。

上述指标体系从对无性系干旱的适应能力和在干旱胁迫下的生产力,反映出白杨派无性系在不同程度水分胁迫下的抗旱水平。在林业的生产推广上,根据栽培地区土壤含水量的不同,可选择抗旱能力不同的品种^[7];如在土壤含水量较高的湿润、半湿润或灌溉方便的区域栽植,可根据中度水分胁迫下的抗旱生产力选择无性系;如在土壤含水量较低的干旱、半干旱或灌溉较为困难的区域栽植,可以选择重度水分胁迫下抗旱适应力高的品种,可根据重度水分胁迫下的抗旱生产力选择无性系;无性系的抗旱适应能力、生产力应根据不同方面来考虑,如在栽植成活率低、气候恶劣的栽植区域,就应首先考虑无性系的适应力^[8]。

2.2 白杨派无性系抗旱能力的综合评价

上述各特性可以直观地分析出各无性系的抗旱能力,但单一指标具有局限性,难以客观地反映出各无性系的抗旱能力^[9]。因此,白杨派无性系抗旱能力的综合评价指标从无性系对干旱的适应能力和生产力 2 个方面进行综合评价,筛选出具有代表性和测定法简单的测定指标,能够相对客观地体现出无性系的抗旱能力。

表 3 白杨派无性系抗旱生产力的综合评价

Table 3 The comprehensive evaluation of the drought-resistant productivity in clonal system

干旱胁迫	无性系	光合速率	单叶面积	茎干重	根干重	叶干重	地径	苗高	生物量	综合评级	位次
中度	秦白杨 1 号	1.000 0	0.023 0	0.678 6	0.634 9	0.778 3	0.757 1	0.248 1	0.668 6	0.598 6	9
	秦白杨 2 号	0.000 0	0.783 1	0.984 1	0.999 8	0.032 8	0.483 8	0.396 6	1.000 0	0.585 0	4
	秦白杨 3 号	0.300 5	0.011 5	0.866 8	0.413 1	0.319 3	1.000 0	0.392 6	0.709 4	0.501 7	7
	02-21-13	0.958 3	1.000 0	0.848 2	0.556 6	0.909 7	0.280 5	0.693 2	0.736 4	0.747 9	3
	02-3-32	0.813 3	0.048 6	0.660 1	0.711 8	0.687 2	0.497 1	0.446 0	0.683 8	0.568 5	8
	03-4-22	0.650 6	0.099 5	0.602 2	0.538 9	0.929 0	0.290 2	0.000 0	0.579 6	0.461 3	6
	04-14-15	0.347 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.381 9	0.629 9	0.000 0	0.169 9	1
	04-17-12	0.853 3	0.069 6	0.700 1	0.532 5	0.687 9	0.660 2	0.817 0	0.589 4	0.613 8	11
	07-17-18	0.202 8	0.980 1	1.000 0	0.495 5	0.119 4	0.596 4	0.653 4	0.797 9	0.605 7	5
	07-30-11	0.163 4	0.004 0	0.652 5	0.534 1	0.672 3	0.998 8	0.865 1	0.610 8	0.562 6	13
	07-23-23	0.945 1	0.166 4	0.360 9	0.382 3	0.088 2	0.894 7	0.586 5	0.375 4	0.474 9	12
	84K	0.393 1	0.516 2	0.897 2	0.661 3	0.377 3	0.547 0	0.148 0	0.787 4	0.540 9	2
	I-101	0.360 0	0.428 9	0.606 9	0.506 5	0.378 2	0.961 6	1.000 0	0.550 7	0.599 1	14
	毛白杨	0.266 0	0.406 6	0.748 3	0.680 3	1.000 0	0.000 0	0.749 5	0.932 7	0.597 9	10
重度	秦白杨 1 号	1.000 0	0.673 9	0.577 5	0.941 9	0.545 3	0.641 9	0.683 7	0.541 9	0.700 8	3
	秦白杨 2 号	0.416 7	0.671 1	0.500 7	0.694 4	0.187 1	0.490 9	0.820 5	0.540 8	0.540 3	8
	秦白杨 3 号	0.564 0	0.530 4	0.605 6	0.357 6	0.548 7	0.948 5	0.758 1	0.536 7	0.606 2	6
	02-21-13	0.809 7	1.000 0	0.738 4	0.754 5	1.000 0	0.528 3	0.685 9	0.720 1	0.779 6	2
	02-3-32	0.575 9	0.330 0	0.118 3	0.251 9	0.107 4	0.896 7	0.731 3	0.149 5	0.395 1	12
	03-4-22	0.616 5	0.097 7	0.000 0	0.000 0	0.311 7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.128 2	14
	04-14-15	0.349 1	0.057 0	0.082 5	0.112 3	0.000 0	0.219 3	0.296 4	0.089 8	0.150 8	13
	04-17-12	0.879 0	0.000 0	0.549 9	0.564 0	0.673 4	0.510 8	0.122 9	0.501 0	0.475 1	9
	07-17-18	0.460 4	0.755 9	1.000 0	1.138 5	0.380 3	0.760 3	0.831 8	1.000 0	0.790 9	1
	07-30-11	0.479 3	0.387 1	0.645 5	0.623 3	0.912 0	0.921 7	1.000 0	0.625 3	0.699 3	4
	07-23-23	0.912 8	0.543 2	0.338 8	0.517 7	0.503 8	0.587 2	0.584 9	0.378 9	0.545 9	7
	84K	0.330 8	0.242 4	0.310 6	0.282 8	0.688 8	0.584 9	0.563 5	0.282 6	0.410 8	11
	I-101	0.707 4	0.162 1	0.574 7	0.713 0	0.706 2	1.000 0	0.996 1	0.580 8	0.680 0	5
	毛白杨	0.000 0	0.601 1	0.395 7	0.738 7	0.492 7	0.443 1	0.495 3	0.592 8	0.469 9	10

表 4 抗旱适应力指标相关分析

Table 4 Correlation analysis of drought resilience index

指标	渗透调节	膜透性	蒸腾速率	根茎比	综合评价
渗透调节	1	0.200 5	0.245 6	−0.043 3	0.808 9
膜透性	−0.378 3	1	−0.617 6	−0.185 8	0.406 7
蒸腾速率	0.158 5	−0.316 1	1	0.038 2	0.394 2
根茎比	−0.231 4	−0.038 4	−0.366 3	1	0.396 0
综合评价	0.461 1	0.411 4	0.392 4	0.315 5	1

注:右上角为重度水分胁迫下抗旱适应性指标间的相关分析;左下角为中度水分胁迫。 $r_{0.05}=0.324\ 6$, $r_{0.01}=0.418\ 2$ 。表 5 同。

表 5 抗旱生产力指标相关分析

Table 5 Correlation analysis of drought resistance productivity index

指标	光合速率	单叶面积	茎干重	根干重	叶干重	地径	苗高	生物量	综合评价
光合速率	1	0.003 9	0.012 0	0.011 9	0.021 7	0.010 1	0.002 2	0.002 6	0.216 0
单叶面积	0.233 9	1	0.045 8	0.058 7	0.020 8	0.016 7	0.041 6	0.048 8	0.239 8
茎干重	0.295 9	0.563 3	1	0.070 3	0.040 8	0.039 1	0.544 8	0.665 8	0.548 5
根干重	0.035 5	0.347 9	0.581 4	1	0.032 1	0.334 6	0.049 3	0.472 5	0.353 0
叶干重	0.529 5	0.173 6	0.191 4	0.014 8	1	0.027 3	0.023 4	0.436 2	0.335 0
地径	0.014 6	0.334 8	0.222 0	0.003 0	0.020 5	1	0.066 1	0.435 3	0.438 0
苗高	0.155 3	0.125 7	0.066 4	0.018 0	0.012 7	0.017 3	1	0.444 2	0.443 8
生物量	0.295 9	0.563 3	1.000 0	0.030 1	0.015 7	0.015 9	0.004 5	1	0.646 4
综合评级	0.328 0	0.517 9	0.712 8	0.621 7	0.497 9	0.460 9	0.493 0	0.712 8	1

表 4 表明,抗旱适应力的 4 项指标间大部分未达到显著水平,说明各指标间相互独立;细胞膜透性、渗透调节与综合评价的相关性较大,达到显著水平。表 5 表明,抗旱生产力各项指标之间呈现正相关,各项指标与综合评级基本都达到了显著或极显著水平,说明各项指标均可以反映出无性系抗旱生产力的差异。

植株的形态的差异能够快速地反映出无性系对中度、重度水分胁迫的响应,可以作为评价植物抗旱能力的指标^[10]。杨敏生^[11]等研究结果表明,在相同条件下测定植物的生理指标,更能反映出无性系对中度、重度水分胁迫的响应,但是生理指标的测定必

须在特定的试验条件下完成,难以在林业生产上推广使用。对水分胁迫响应最大的是生物量的积累,不同无性系间的差异较大,尤其是在抗旱品种的选育、测定选育品种的抗旱生产力时,表现的效果较好^[12]。杨树是多年生植物,用扦插苗的抗旱能力来代替成年大田无性系的抗旱能力还要进一步的研究去鉴定^[13-14]。本试验所有材料均在相同的处理且在同一条件下测定,测定的结果具有可比对性,可以反映出各无性系之间的抗旱性强弱。因此,本试验综合评价时选取的抗旱指标为渗透调节能力、细胞质膜透性、净光合速率、苗高、单叶面积、生物量。

表 6 白杨派无性系抗旱能力的综合评价
Table 6 Comprehensive evaluation of drought resistance of *Leuce* clones

干旱胁迫	无性系	渗透调节	膜透性	光合速率	单叶面积	苗高	生物量	Ci	位次
中度	秦白杨 1 号	0.403 2	0.411 1	1.000 0	0.023 0	0.248 1	0.600 7	0.529 4	7
	秦白杨 2 号	0.305 7	0.595 8	0.000 0	0.783 1	0.396 6	0.871 0	0.529 5	5
	秦白杨 3 号	0.419 3	0.423 3	0.300 5	0.011 5	0.392 6	0.767 2	0.545 4	1
	02-21-13	0.143 9	0.333 3	0.958 3	1.000 0	0.693 2	0.750 8	0.541 7	2
	02-3-32	0.336 3	0.174 3	0.813 3	0.048 6	0.446 0	0.584 3	0.528 2	8
	03-4-22	0.921 5	0.115 0	0.650 6	0.099 5	0.000 0	0.533 1	0.531 2	4
	04-14-15	0.524 8	0.136 2	0.347 7	0.000 0	0.629 9	0.000 0	0.541 7	3
	04-17-12	1.000 0	0.298 7	0.853 3	0.069 6	0.817 0	0.619 7	0.526 9	11
	07-17-18	0.719 8	0.287 1	0.202 8	0.980 1	0.653 4	0.884 9	0.527 7	9
	07-30-11	0.487 1	0.000 0	0.163 4	0.004 0	0.865 1	0.577 5	0.524 0	14
	07-23-23	0.133 8	0.152 0	0.945 1	0.166 4	0.586 5	0.319 5	0.524 2	12
	84K	0.485 8	0.499 1	0.393 1	0.516 2	0.148 0	0.794 1	0.529 5	6
	I-101	0.165 4	0.131 9	0.360 0	0.428 9	1.000 0	0.537 2	0.524 1	13
	毛白杨	0.000 0	1.000 0	0.266 0	0.406 6	0.749 5	1.000 0	0.527 6	10
	秦白杨 1 号	1.000 0	0.874 5	1.000 0	0.673 9	0.683 7	0.577 5	0.527 2	9
重度	秦白杨 2 号	0.000 0	1.000 0	0.416 7	0.671 1	0.820 5	0.500 6	0.522 5	12
	秦白杨 3 号	0.098 0	0.615 9	0.564 0	0.530 4	0.758 1	0.605 5	0.529 3	7
	02-21-13	0.140 2	0.621 0	0.809 7	1.000 0	0.685 9	0.738 3	0.522 5	3
	02-3-32	0.770 6	0.494 1	0.575 9	0.330 0	0.731 3	0.118 3	0.538 8	4
	03-4-22	0.290 6	0.211 0	0.616 5	0.097 7	0.000 0	0.000 0	0.547 5	2
	04-14-15	0.339 8	0.456 1	0.349 1	0.057 0	0.296 4	0.082 4	0.572 4	1
	04-17-12	0.428 2	0.704 2	0.879 0	0.000 0	0.122 9	0.549 9	0.533 6	5
	07-17-18	0.755 8	0.470 8	0.460 4	0.755 9	0.831 8	1.000 0	0.527 2	8
	07-30-11	0.015 4	0.000 0	0.479 3	0.387 1	1.000 0	0.645 4	0.517 6	14
	07-23-23	0.060 8	0.263 0	0.912 8	0.543 2	0.584 9	0.338 8	0.524 4	11
	84K	0.250 7	0.835 9	0.330 8	0.242 4	0.563 5	0.310 5	0.530 8	6
	I-101	0.155 2	0.275 4	0.707 4	0.162 1	0.996 1	0.574 7	0.522 8	12
	毛白杨	0.033 5	0.706 2	0.000 0	0.601 1	0.495 3	0.580 1	0.524 4	10

上述 6 个抗旱指标中,净光合速率、苗高、单叶面积、生物量代表了抗旱生产力;渗透调节、膜透性代表了抗旱适应力。各项指标间的权重不同,采用 TOPSIS 法更能客观地反映出白杨派优良杂种无性系的抗旱能力;同时在林业生产上,要提高林木的抗旱适应力或抗旱生产力,就可以通过改变其权重来

进行选择^[15]。运用 MATLAB 软件采用 TOPSIS 进行排序,结果表明,中度水分胁迫下 14 个白杨无性系抗旱能力由强到弱的顺序为秦白杨 3 号、‘02-21-13’、‘04-14-15’、‘03-4-22’秦白杨 2 号、84K、秦白杨 1 号、‘02-3-32’、‘07-17-18’、毛白杨、‘04-17-12’、‘07-23-23’、I-101、‘07-30-11’;重度水分胁迫下由强

到弱的顺序为‘04-14-15’‘03-4-22’‘02-21-13’‘02-3-32’‘04-17-12’、84K、秦白杨 3 号、‘07-17-18’、秦白杨 1 号、毛白杨、‘07-23-23’、I-101、秦白杨 2 号、‘07-30-11’。

3 结论与讨论

杨树的抗旱性是受多因素影响、复杂的数量性状,不同的白杨派优良杂种无性系的耐旱和避旱能力也不一样,使得不同无性系对同一抗旱指标的抗旱响应也存在差异。外界自然环境复杂多变,人工盆栽控水不可能完全反映出自然条件的干旱情况,所以本试验在人工控水模拟干旱胁迫下测定的结果,可能与各无性系的真实抗旱能力有差别。但本试验所有材料均在相同的处理且在同一条件下测定,测定的结果具有可比对性,可以反映出各无性系之间的抗旱性强弱。

在中度和重度水分胁迫下,白杨派优良杂种无性系的指标大部分存在显著差异,选取叶片脯氨酸含量、叶片相对电导率、净光合速率、单叶面积、苗高、生物量作为综合抗旱能力的评价指标,供试的白杨派优良杂种无性系的抗旱能力大部分要强于作为对照品种,这表明白杨派的优良杂种无性系能够适应西北地区的干旱环境。分析指标间的相关性分析,使用 TOPSIS 法对 11 个白杨派无性系进行抗旱能力的综合评价,综合抗旱能力较强的无性系为‘02-21-13’‘02-3-32’‘03-4-22’‘04-14-15’‘07-17-18’、秦白杨 1 号、秦白杨 3 号。

参考文献:

[1] 杨敏生,裴保华,张树常. 树木抗旱性研究进展[J]. 河北林果研究,1997(1):90-96.
YANG M S, PEI B H, ZHANG S C. Research progress on drought resistance of trees[J]. Hebei Fruit Research, 1997(1): 90-96. (in Chinese)

[2] LEVITT J. Responses of Plant to Environmental Stress[M]. New York: New York Academic Press, 1980.

[3] TURNER N C. Adaptation to water deficits a changing perspective[J]. Aust. J. Plant Physiol, 1983, 13: 175-190.

[4] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2006.

[5] 高洪波, 马素萍. MATLAB 和 TOPSIS 算法在企业物流招标评估中的应用研究[J]. 物流技术, 2012, 31(23): 277-278, 296.
GAO H B, MA S P. Application of MATLAB and TOPSIS algorithm in enterprise logistics bidding evaluation [J]. Logistics Technology, 2012, 31(23): 277-278, 296. (in Chinese)

[6] 高建社, 王军, 周永学, 等. 5 个杨树无性系抗旱性研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2005(2): 112-116.

GAO J S, WANG J, ZHOU Y X, *et al.* Study on drought resistance of 5 poplar clones [J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Edi., 2005(2): 112-116. (in Chinese)

[7] 杨敏生, 黄选瑞, 李彦慧. 水分胁迫对白杨杂种无性系生理和生长的影响[J]. 河北林果研究, 1998(2): 99-102.
YANG M S, HUANG X R, LI Y H. Physiology and growth of hybrid clones of poplar in response to water stress [J]. Hebei Forest Fruit Research, 1998(2): 99-102. (in Chinese)

[8] 李彦慧, 周怀军, 杨敏生, 等. 杨树杂交育种的研究进展[J]. 河北农业大学学报, 2003, 26(增刊 1): 109-111.
LI Y H, ZHOU H J, YANG M S, *et al.* Research progress in hybrid breeding of poplar [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2003, 26(Supp. 1): 109-111. (in Chinese)

[9] 李瑞姣, 岳春雷, 李贺鹏, 等. 干旱胁迫对日本荚蒾幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 56-61.
LI R J, YUE C L, LI H P, *et al.* Effects of drought stress on the physiological and biochemical characteristics of *Viburnum japonicum* seedlings [J]. Journal of Northwestern Forestry College 2018, 33(2): 56-61. (in Chinese)

[10] 关春景, 焦孟月, 张彦妮. 8 个矮牵牛品种抗旱性综合评价分析[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 62-69.
GUAN C J, JIAO M Y, ZHANG Y N. Comprehensive evaluation and analysis of drought resistance of 8 *Petunia* cultivars [J]. Journal of Northwestern Forestry College, 2018, 33(2): 62-69. (in Chinese)

[11] 杨敏生, 梁海永, 王进茂, 等. 水分胁迫下白杨双交杂种无性系苗木生长研究[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(4): 1-6, 24.
YANG M S, LIANG H Y, WANG J M, *et al.* Study on seedling growth of poplar double-cross hybrid clones under water stress [J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2002, 25(4): 1-6, 24. (in Chinese)

[12] 杨传宝, 姚俊修, 李善文, 等. 白杨派无性系苗期对干旱胁迫的生长生理响应及抗旱性综合评价[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(5): 58-66.
YANG C B, YAO J X, LI S W, *et al.* Growth and physiological response to drought stress and comprehensive evaluation of drought resistance in Leuce clones at nursery stage [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(5): 58-66. (in Chinese)

[13] 焦绪娟. 几个杨树杂交无性系抗逆性研究与评价[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.

[14] 王孟本, 李洪建, 任建中, 等. 杨树杂交无性系品种抗旱性的比较研究[J]. 山西大学学报, 2002, 25(2): 176-179.
WANG M B, LI H J, REN J Z, *et al.* Comparative study on drought resistance of Poplar hybrid clones [J]. Journal of Shanxi University, 2002, 25(2): 176-179. (in Chinese)

[15] 郑书星, 樊军锋, 苏晓华. 欧洲黑杨无性系抗旱性综合鉴定研究[J]. 西北林学院学报 2005, 20(1): 57-64.
ZHENG S X, FAN J F, SU X H. Study on comprehensive of drought-resistance of *Populus nigra* [J]. Journal of Northwestern Forestry College 2005, 20(1): 57-64. (in Chinese)