

文章编号:1001-7380(2018)06-0001-07

盐碱地柳树生物能源林专用品种的选育

王伟伟^{1,2}, 何旭东^{1,2}, 郑纪伟^{1,2}, 隋德宗^{1,2}, 姜开朋^{1,2}, 王保松^{1,2*}

(1. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 2. 江苏省农业种质资源保护与利用平台, 江苏 南京 211153)

摘要:根据江苏沿海盐碱地培育柳树生物能源林的需要,利用前期初选的22个耐盐高生物量灌木柳无性系,通过2 a的田间对比试验,依据各无性系的保存率、生物量、低位发热量及折算成的单位面积标准煤产量,筛选出适合在盐碱地生长的柳树生物能源林专用品种,并在轻度、中度和重度含盐立地进行品种稳定性评价。结果表明:在中等含盐立地生长2 a后,22个灌木柳无性系保存率为27.31%—94.93%,盐害指数为0—86.20%,生物量为8.707—39.507 t/(hm²·a),低位发热量为12 580—14 641 J/g;筛选出的2521等12个优良无性系,平均生物量为21.151—39.507 t/(hm²·a),折合标准煤产量为10.280—17.388 t/(hm²·a)。AMMI模型稳定性分析结果表明,这12个无性系在3种立地的稳定性参数D_g值为0.188—3.360,稳定性顺序为2521>苏柳1053>2579>52-2>2352>35-13>2391>50-6>苏柳2345>2381>51-5>51-3。在轻盐立地上栽培的最适品种有51-3,51-5,2381,2521和苏柳1053;在中盐立地上栽培的最适品种有2521,50-6,2391,52-2和2352;在重盐立地上栽培的最适品种有2521,51-5,35-13和50-6,其中2521在3种立地均表现优良;3种立地对柳树无性系的鉴别力以轻盐立地最强,D_j值为4.192,中盐优于重盐立地,D_j值分别为2.516和1.760。

关键词:柳树;良种选育;生物能源林;稳定性;专用品种;盐碱地

中图分类号:S722.3⁺6;S759.4;S792.12

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1001-7380.2018.06.001

Breeding of special varieties of willow bio-energy forest in saline-alkali soil

Wang Weiwei^{1,2}, He Xudong^{1,2}, Zheng Jiwei^{1,2}, Sui Dezong^{1,2}, Jiang Kaipeng^{1,2}, Wang Baodong^{1,2*}

(1. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153 China; 2. Willow Nursery of the Jiangsu Provincial Platform for Conservation and Utilization of Agricultural Germplasm, Nanjing 211153 China)

Abstract: In order to meet the need of breeding willow bio-energy forest in saline-alkali soil in coastal areas of Jiangsu, that 22 salt-tolerant and high biomass shrub willow clones selected in early stage were used. After 2 years, field contrast examination, based on survival rate, biomass and low heat value of clones and conversion of standard coal output per unit area, special varieties of willow bio-energy forest suitable for growing in saline-alkali soil were selected, and the variety stability was evaluated in mild, moderate and severe salt-containing sites. The results indicate that in moderate salt-containing site, the survival rate of 22 shrub willow clones in 2 years was 27.31%—94.93%, salt injury index was 0—86.20%, biomass was 8.707—39.507 t/(hm²·a), low heat value was 12 580—14 641 J/g. Twelve superior clones were selected such as Clone 2 521, with average biomass of 21.151—39.507 t/(hm²·a), equivalent to 10.280—17.388 t/(hm²·a) standard coal output; The results of analysis of AMMI model's stability showed the stability parameter D_g value of 12 clones in 3 different kinds of sites was 0.188—3.360, the stability order was Clone 2521>1053>2579>52-2>2352>35-13>2391>50-6>2345>2381>51-5>51-3, the most suitable varieties for cultivation on mild salt stand were regarded as Clone 51-3, 51-5, 2381, 2521 and Clone 1053, the most suitable varieties for cultivation on moderate salt-containing site were regarded as Clone 2521, 50-6, 2391, 52-2 and 2352, and the most suitable varieties for cultivation on severe salt-containing site were

收稿日期:2018-11-20;修回日期:2018-11-30

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目“沿海地区高标准农田林网建设关键技术与示范”(LYKJ[2018]03);江苏省科技支撑计划(农业)项目“耐盐高生物量灌木柳新品种选育及高效栽培技术研究”(BE2013449)

作者简介:王伟伟(1986—),女,河南长垣人,硕士。主要从事植物生理生化的研究。

* **通信作者:**王保松(1965—),男,江苏江都人,研究员,大学本科毕业。主要从事林木遗传育种研究。E-mail:baosong66@sohu.com。

regarded as Clone 2521, 51-5, 35-13 and 50-6, Clone 2521 had excellent performance in 3 kinds of sites. The mild salt-containing site had the highest discriminability of willow clones, with Dj value of 4.192, moderate salt-containing site was better than severe salt-containing site, with Dj value of 2.516 and 1.760.

Key words: Willow; Breeding; Bio-energy forest; Stabilization; Special variety; Saline-alk alisoil

江苏沿海地区滩涂总面积 68.7 万 hm^2 , 约占全国滩涂总面积的 1/4, 且每年仍以 1 267 hm^2 的速度淤长^[1]。由于盐碱胁迫等原因, 沿海滩涂资源一直不能得到充分的利用, 因此, 研究具有经济价值的耐盐林木良种对沿海盐碱地的开发利用、改善海岸带的生态环境具有重要的意义。随着煤炭、石油等不可再生能源日渐减少, 世界发达国家纷纷转向发展和利用生物质能源^[2-3], 发展生物质能产业是我国缓解能源供应压力和解决环境问题的途径之一^[4]。

柳树是柳属 (*Salix*) 植物的统称, 其中的灌木类型具有生物量大、适应性强、繁殖容易、根系发达等优点, 广泛应用于生物质能源生产、土壤修复、水土保持等方面^[5-7], 已成为世界上公认的优质生物能源树种之一。瑞典国家能源委员会资助的“瑞典国家能源林计划”(NSEFP) 选取柳树作为主要的能源林树种; 美国橡树岭国家实验室 (Oak Ridge National Laboratory) 从事生物能源的研究, 选育出适合不同气候和土壤条件的优良柳树无性系; 地处寒温带的加拿大和北欧等国对柳树的能源林栽培进行了研究^[8]。

江苏省林业科学研究院积极响应江苏沿海开发的需要, 从 2004 年起开展了柳树耐盐碱、高生物量新品种选育及栽培技术研究工作^[9-13]。针对沿海滩涂的生境特点, 选育出适合苏北淤泥质滩涂生长的柳树生物能源专用新品种, 对改善沿海生态环境, 增加农民收入, 促进沿海清洁能源产业的持续发展有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

利用簸箕柳、蒿柳、二色柳、欧洲红皮柳、杞柳、银柳、灰柳和毛枝柳等进行种间杂交, 培育实生苗 10 万株以上, 选出初期生长优良的无性系 310 个, 并保存在盐城市大丰区川东镇海堤外轻度盐碱地上 (土壤含盐量为 0.1%—0.2%)。试验材料是根据各无性系生物量、病虫害危害及盐害情况初步筛选出的 51-3, 50-6 等性状较优的前 20 位无性系 (见表

1), 以通过江苏省林木良种审定委员会认定的苏柳 1053 和苏柳 2345 为对照。

1.2 研究方法

在江苏盐城市大丰区川东镇海堤外选取土壤含盐量为 0.2%—0.4% 试验地, 布置田间对比试验。按床宽 200 cm、沟深 30 cm 开沟做床。将直径约 0.8 cm 的 1 年生试验柳树枝条剪切成长 12 cm 的插条, 按株距 30 cm, 行距 100 cm, 进行扦插对比试验; 参试无性系采用随机区组设计, 4 次重复, 10 株为 1 小区进行对比试验, 2 a 后测定各无性系保存率、盐害指数 (见表 2)、含水率、生物量和低位发热量等指标进行分析评价。以折合的年单位面积标准煤产量为依据, 筛选较优良的无性系进行品种稳定性评价。

选取土壤含盐量分别 0.1%—0.2% (轻盐)、0.2%—0.4% (中盐) 和 0.4%—0.5% (重盐) 的 3 个试验地, 将筛选出的柳树无性系按随机区组设计, 10 株小区, 4 次重复, 进行无性系稳定性试验。2 a 后测定各无性系保存率、含水量和生物量等指标, 依据年单位面积标准煤产量数据, 利用改良的 AMMI 模型^[14-15]进行稳定性评价。

发热量采用河南鑫科分析仪器有限公司生产的 XKRL-3000A 微电脑全自动量热仪 (测温范围: 5—40 $^{\circ}\text{C}$; 温度分辨率: 0.000 1 K; 精密密度: $\leq 0.1\%$), 按照国家标准 GB 5186—1985《生物质燃料发热量测试方法》进行测定。

1.3 统计分析

数据统计分析均在 EXCEL 2007 和 DPS 16.05 软件的相关程序下完成。用保存率和盐害指数平方根的反正弦值进行数据分析。

盐害指数:

$$SI = \sum_{i=1}^6 (n_i \cdot K_i) / (5 \cdot \sum_{i=1}^6 n_i)$$

其中, n_i 为达到第 i 个等级的植株数量, K_i 为第 i 个等级的分值, i 取 1, 2, \dots , 6。

标准煤产量: $M = \rho \times c \times m \times Q / t$

其中, ρ 为栽培密度, c 为保存率, m 为单株生物量, Q 为低位发热量, t 为标准煤热值。

表 1 参试无性系

| 序号 | 系号 | 杂交组合 | 拉丁名 |
|----|---------|--------------|----------------------------------------------------------------------|
| 1 | 2352 | 簸箕柳×蒿柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. viminalis</i> |
| 2 | 2381 | 簸箕柳×蒿柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. viminalis</i> |
| 3 | 2391 | 二色柳×欧洲红皮柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. purpurea</i> |
| 4 | 2406 | 簸箕柳×蒿柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. viminalis</i> |
| 5 | 2521 | 欧洲红皮柳×欧洲红皮柳 | <i>S. purpurea</i> × <i>S. purpurea</i> |
| 6 | 2575 | 二色柳×(簸箕柳×杞柳) | <i>S. alberti</i> ×(<i>S. suchowensis</i> × <i>S. integra</i>) |
| 7 | 2577 | 二色柳×(簸箕柳×杞柳) | <i>S. alberti</i> ×(<i>S. suchowensis</i> × <i>S. integra</i>) |
| 8 | 2579 | (杞柳×蒿柳)×银柳 | (<i>S. integra</i> × <i>S. viminalis</i>)× <i>S. argyrea</i> |
| 9 | 2678 | 二色柳×灰柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. cinerea</i> |
| 10 | 2680 | 二色柳×灰柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. cinerea</i> |
| 11 | 2688 | 簸箕柳×黄花柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. caprea</i> |
| 12 | 2820 | (簸箕柳×蒿柳)×银柳 | (<i>S. suchowensis</i> × <i>S. viminalis</i>)× <i>S. argyrea</i> |
| 13 | 50-6 | 簸箕柳×银柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. argyrea</i> |
| 14 | 51-3 | 二色柳×银柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. argyrea</i> |
| 15 | 51-5 | 二色柳×银柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. argyrea</i> |
| 16 | 52-2 | 簸箕柳×银柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. argyrea</i> |
| 17 | △2 | 杞柳×钻石柳 | <i>S. integra</i> × <i>S. eriocephala</i> |
| 18 | 31-24 | 簸箕柳×(杞柳×簸箕柳) | <i>S. suchowensis</i> ×(<i>S. integra</i> × <i>S. suchowensis</i>) |
| 19 | 35-13 | 二色柳×白杞柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. integra</i> |
| 20 | P63 | 杞柳 | <i>S. integra</i> |
| 21 | 苏柳 1053 | 二色柳×毛枝柳 | <i>S. alberti</i> × <i>S. dasyclados</i> |
| 22 | 苏柳 2345 | 簸箕柳×杞柳 | <i>S. suchowensis</i> × <i>S. integra</i> |

表 2 柳树无性系盐害分级标准

| 序号 | 级别 | 分级标准 | 分值 K_i |
|----|-----|--------------------|----------|
| 1 | 1 级 | 基本无枯梢或仅个别侧枝顶端有枯梢 | 0 |
| 2 | 2 级 | 侧枝枯梢超过 1/3,但不到 1/2 | 1 |
| 3 | 3 级 | 侧枝枯梢超过 1/2,但主干没有枯梢 | 2 |
| 4 | 4 级 | 主干枯梢不到 1/4 | 3 |
| 5 | 5 级 | 主干枯梢接近 1/2 | 4 |
| 6 | 6 级 | 主干枯梢超过 1/2 或植株死亡 | 5 |

2 结果与分析

2.1 无性系选育

2.1.1 无性系保存率 22 个柳树无性系 2 年生保存率存在极显著($P<0.01$)差异,无性系平均保存率为 64.5%,苏柳 2345 保存率最高,为 94.9%,2820 保存率最低,为 27.3%,变异系数为 32.9%。22 个无性系保存率的多重比较结果(见表 3)表明,苏柳 2345,2678,2352,2391,苏柳 1053,51-6,2579 和 2521 等 8 个无性系平均保存率超过 80%,差异不显著,但显著高于 35-13 等 10 个无性系的保存率。

2.1.2 无性系的盐害指数 在中度含盐立地,22 个无性系盐害指数存在极显著($P<0.01$)差异,无性系平均盐害指数为 19.1%,其中 2820 盐害指数最高,为 86.2%,苏柳 2345,2521 和 2678 等 3 个无性系最低,为 0,变异系数为 111.9%。22 个无性系盐害指数多重比较结果(见表 3)表明,2820 最严重,与其余无性系差异达到极显著水平($P<0.01$);2688 等盐害指数超过 20.0%的 9 个无性系间差异未达到显著水平;苏柳 2345,2521,2678,31-24,2406,51-6,51-5,P63 等 8 个无性系间差异不显著,盐害指数介于 0—2.6% 之间,与其余无性系差异达到显著($P<0.05$)或极显著($P<0.01$)水平。

2.1.3 无性系生物量 按每公顷 33 333 株(株距 30 cm,行距 100 cm),根据各无性系鲜质量、含水量及保存率计算单位面积年均生物量。22 个无性系的生物量存在极显著($P<0.01$)差异,无性系平均生物量为 21.457 t/(hm²·a),变异系数为 38.5%。2521 生物量最高为 39.507 t/(hm²·a),是平均值的 1.8 倍,2688 最低,为 8.707 t/(hm²·a)。22 个柳树无性系生物量多重比较结果(见表 3)表明,2521 与除

表 3 柳树无性系保存率、盐害指数和生物量多重比较

| 无性系 | 保存率/% | 无性系 | 盐害指数/% | 无性系 | 生物量[t/(hm ² ·a)] |
|---------|----------------|---------|-------------|---------|-------------------------------|
| 苏柳 2345 | 94.9 Aa | 2820 | 86.2 Aa | 2521 | 39.507 Aa |
| 2678 | 92.5 ABa | 51-3 | 42.4 Bb | 50-6 | 34.577 ABab |
| 2352 | 87.3 ABab | 2579 | 40.6 BCb | 2391 | 32.057 BCb |
| 2391 | 87 ABab | △2 | 40.0 BCb | 52-2 | 30.954 BCb |
| 苏柳 1053 | 84.9 ABabc | 2575 | 37.0 BCb | 2352 | 30.458 BCbc |
| 50-6 | 84.5 ABabc | 2352 | 34.4 BCdb | 2579 | 25.642 CDcd |
| 2579 | 84.1 ABabc | 2381 | 28.5 BCdbce | 51-3 | 25.569 CDcd |
| 2521 | 82.3 ABCabc | 苏柳 1053 | 20.5 BCdbed | 苏柳 2345 | 22.869 DEde |
| 2577 | 72.4 ABCdbed | 35-13 | 20.3 BCdbed | 苏柳 1053 | 22.801 DEde |
| 51-3 | 69.8 ABCDEbed | 2688 | 20.0 BCdbed | 51-5 | 21.645 DEFdef |
| 2575 | 69.8 ABCDEbed | 2577 | 13.6 CDEcd | 35-13 | 21.578 DEFdef |
| 52-2 | 67.3 BCDEcde | 2680 | 10.7 DEFde | 2381 | 21.151 DEFdef |
| 35-13 | 59.8 CDEFdef | 2391 | 10.0 EFde | 2678 | 19.070 DEFGefg |
| 2381 | 57.2 DEFGdefg | 52-2 | 10.0 EFde | △2 | 17.510 EFGHfgh |
| P63 | 52.2 DEFGHefgh | P63 | 2.6 EFGef | 2577 | 17.353 EFGHfgh |
| 31-24 | 49.8 EFGHIghi | 51-5 | 1.3 EFGf | P63 | 16.102 FGHlghi |
| 2688 | 44.8 FGHlghij | 50-6 | 0.9 FGf | 31-24 | 15.358 FGHlghi |
| 2680 | 42.4 FGHlJghij | 2406 | 0.5 FGf | 2406 | 13.510 GHlJhij |
| △2 | 39.7 GHlJhij | 31-24 | 0.1 Gf | 2680 | 13.217G HlJhij |
| 2406 | 37.4 HlJijk | 2678 | 0.0 Gf | 2575 | 12.300 HlJij |
| 51-5 | 32.4 lJjk | 2521 | 0.0 Gf | 2820 | 10.1301 lJj |
| 2820 | 27.3 Jk | 苏柳 2345 | 0.0 Gf | 2688 | 8.707 Jj |

数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著 ($P<0.01$) 和差异显著 ($P<0.05$)

50-6外的所有无性系的差异达到极显著 ($P<0.01$) 水平;其次为 2391,52-2,2352 和51-3等 4 个无性系,平均生物量介于 25.569—32.057 t/(hm²·a),与 2678,△2,2577,P63,31-24,2406,2680,2575,2820 和 2688 等平均生物量低于 20 t/(hm²·a) 的 10 个无性系差异达到显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 水平。

2.1.4 无性系低位发热量 对 22 个无性系低位发热量间存在极显著 ($P<0.01$) 差异,22 个无性系平均值为14 143 J/g,变异系数为 3.5%。多重比较结果(见表 4)表明,51-5等 15 个柳树无性系间差异未达显著 ($P<0.05$) 水平,2352 和 2521 低位发热量最低,且与其他 20 个无性系的差异达到极显著 ($P<0.01$) 水平。

2.1.5 无性系综合评价 根据 22 个无性系 2 年生枝条低位发热量和生物量折算成标准煤的年产量(见表 4)进行综合评价。2521、50-6、2391、52-2、2352、51-3、2579、苏柳 2345、苏柳 1053、51-5、35-13 和 2381 等 12 个无性系每公顷年产低位发热量折算

成标准煤超过 10 t,且与其他无性系间差异达到极显著 ($P<0.01$) 水平。其中 2521 和50-6单位面积低位发热量最高,折算成标准煤分别为 17.388 t/(hm²·a) 和 17.082 t/(hm²·a),且与其他无性系间达到极显著 ($P<0.01$) 水平。因此选取 2521、50-6、2391、52-2、2352、51-3、2579、苏柳 2345、苏柳 1053、51-5、35-13和 2381 等 12 个耐盐高生物量柳树无性系进行稳定性测试。

2.2 无性系稳定性评价

表 5 为柳树无性系标准煤产量 AMMI 分析表。从表 5 可以看出,基因型、环境及交互作用方差均达到 1%显著水平,基因型、环境及交互作用平方和分别占处理平方和的 26.3%,25.5%和 48.2%,对产量变异影响最大的是基因与环境的交互作用,基因型和环境因素对产量变异影响相近。PCA1 和 PAC2 的平方和占交互作用平方和的 100%,整个互作的变异集中在前 2 个 PAC 轴上。

图 1 给出了 IPC1 和 IPC2 双标图。图 1 中越接近坐标原点的无性系越稳定,无性系在地点与原点

表 4 柳树无性系低位发热量和折算成标准煤年产量

| 无性系 | 低位发热量/(J/g) | 无性系 | 标准煤[t/(hm ² · a)] |
|---------|---------------|---------|----------------------------------|
| 51-5 | 14 641 Aa | 2521 | 17.388 Aa |
| 35-13 | 14 599 Aab | 50-6 | 17.082 Aa |
| 50-6 | 14 479 ABabc | 2391 | 15.724 Bb |
| 2678 | 14 471 ABabc | 52-2 | 14.833 Cc |
| 2820 | 14 425 ABabc | 2352 | 13.074 Dd |
| 2680 | 14 411 ABabc | 51-3 | 12.226 Ee |
| 2688 | 14 397 ABabc | 2579 | 12.119 Ee |
| P63 | 14 395 ABabc | 苏柳 2345 | 11.052 Ff |
| 2391 | 14 376 ABabc | 苏柳 1053 | 11.022 Ff |
| 2577 | 14 331 ABabcd | 51-5 | 10.813 Ff |
| 2575 | 14 326 ABabcd | 35-13 | 10.749 FGf |
| 2381 | 14 244 ABabcd | 2381 | 10.28 Gg |
| 苏柳 1053 | 14 167 ABabcd | 2678 | 9.416 Hh |
| 苏柳 2345 | 14 163 ABabcd | 2577 | 8.485 Ii |
| 2406 | 14 155 ABabcd | △2 | 8.434 Ii |
| △2 | 14 117 ABbcd | P63 | 7.909 Jj |
| 31-24 | 14 052 ABcd | 31-24 | 7.364 Kk |
| 52-2 | 14 044 ABcd | 2406 | 6.525 Ll |
| 51-3 | 14 014 ABcd | 2680 | 6.499 Ll |
| 2579 | 13 852 Bd | 2575 | 6.012 Mm |
| 2521 | 12 899 Ce | 2820 | 4.987 Nn |
| 2352 | 12 580 Ce | 2688 | 4.277 Oo |

数据后不同大、小写字母分别表示差异极显著 ($P<0.01$) 和差异显著 ($P<0.05$);标准煤低位发热量按 29 307.6 kJ/kg 计算

表 5 柳树无性系标准煤产量 AMMI 分析

| 变异来源 | df | SS | MS | F | Prob. |
|------|-----|-----------|---------|---------|-------|
| 总的 | 143 | 7 345.683 | 51.368 | | |
| 处理 | 35 | 6 913.979 | 197.542 | 49.419 | 0.000 |
| 基因 | 11 | 1 819.940 | 165.449 | 41.391 | 0.000 |
| 环境 | 2 | 1760.498 | 880.249 | 220.213 | 0.000 |
| 交互作用 | 22 | 3 333.541 | 151.525 | 37.907 | 0.000 |
| PCA1 | 12 | 3 161.561 | 263.463 | 65.911 | 0.000 |
| PCA2 | 10 | 171.980 | 17.198 | 4.302 | 0.000 |
| 残差 | 0 | 0.000 | 0.000 | | |
| 误差 | 108 | 431.704 | 3.997 | | |

连线上的垂直投影到原点的距离表示该无性系与这个地点交互作用的大小,连线越长交互作用越大,反之越小,如果垂直投影落在连线的反向延长线上则表示交互作用为负向。根据图 1,无性系 2521 和苏柳 1053 较为稳定,尤其是无性系 2521 在 3 个地点均表现出生长优势。51-3,51-5和 2381 在轻度含盐立地有较强的正向交互作用,而在中度和

重度含盐立地有负向交互作用;35-13在重度含盐立地有最强的正向交互作用,而在轻度含盐立地为负向交互作用;2391,50-6,2352 和52-2在中度含盐立地有正向交互作用。

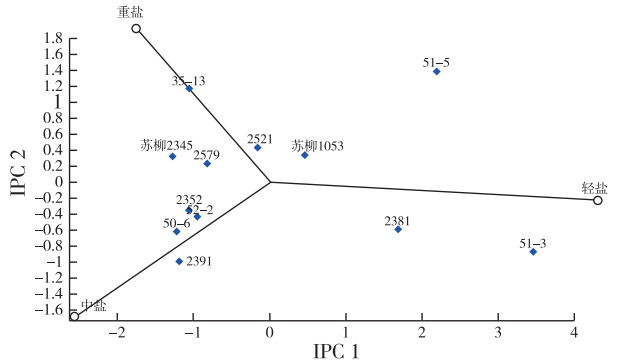


图 1 基因型 AMMI 双标图

表 6 列出了 12 个柳树无性系在 3 个栽培地点标准煤产量平均值、离差和稳定性参数。12 个无性系标准煤产量均值为12. 817 t/(hm² · a),大小排序为51-3>51-5>2521>2381>50-6>苏柳 1053>52-2>2391>2579>35-13>2352>苏柳 2345, 其中 51-3, 51-5,2521 和 2381 等 4 个无性系产量大于均值;12 个无性系在 3 个地点的稳定性参数 D_g 为 0. 188—3. 360,稳定性顺序为 2521>苏柳 1053>2579>52-2>2352>35-13>2391>50-6>苏柳 2345>2381>51-5>51-3。

表 6 无性系稳定性参数

| 无性系 | 产量平均 | 离差 | PCA1 | PCA2 | ASVi | D_g |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 苏柳 1053 | 12.555 | -0.262 | 0.462 | 0.339 | 0.597 | 0.457 |
| 苏柳 2345 | 8.112 | -4.706 | -1.281 | 0.326 | 1.399 | 1.250 |
| 2352 | 9.540 | -3.277 | -1.059 | -0.361 | 1.182 | 1.035 |
| 2381 | 13.341 | 0.524 | 1.682 | -0.600 | 1.885 | 1.643 |
| 2391 | 10.780 | -2.038 | -1.192 | -0.996 | 1.611 | 1.183 |
| 2521 | 17.474 | 4.656 | -0.165 | 0.430 | 0.464 | 0.188 |
| 2579 | 10.174 | -2.644 | -0.830 | 0.232 | 0.912 | 0.810 |
| 35-13 | 9.797 | -3.020 | -1.062 | 1.173 | 1.628 | 1.068 |
| 50-6 | 12.669 | -0.148 | -1.228 | -0.627 | 1.447 | 1.204 |
| 51-3 | 19.336 | 6.519 | 3.444 | -0.867 | 3.760 | 3.360 |
| 51-5 | 18.502 | 5.684 | 2.183 | 1.381 | 2.700 | 2.149 |
| 52-2 | 11.528 | -1.290 | -0.954 | -0.430 | 1.101 | 0.935 |

表 7 列出了 12 个柳树无性系的标准煤产量平均值在 3 个栽培地点的鉴别力值。 D_j 值越大鉴别力越强,轻盐立地的品种鉴别力最强,其次为中盐立地,重盐立地最弱。

表 7 地点对品种的鉴别力

| 地点 | 产量平均 | 离差 | PCA1 | PCA2 | Dj |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|
| 轻盐 | 16.986 | 4.168 | 4.304 | -0.224 | 4.192 |
| 中盐 | 13.037 | 0.219 | -2.553 | -1.688 | 2.516 |
| 重盐 | 8.429 | -4.388 | -1.751 | 1.912 | 1.760 |

3 结论与讨论

柳树是温带最速生的树种之一,具有适应性强、萌生能力强、易于更新、热值高等特点,在世界范围内广泛应用。针对特定的立地条件选育速生柳树优良品种是推进柳树生物能源林建设的重要手段。瑞典柳树人工林的干生物量平均值为 $10\text{--}12\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,最高可达 $30\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[16-17]。美国柳树无性系 SV1 生物产量达 $23.8\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[18]。加拿大柳树无性系 SX64 与 SX61 生物量分别为 $67.58\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $62.34\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[19]。李洪^[8]认为杞柳的生物量最大为 $11.27\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。本研究共选育 12 个优良无性系,其中无性系 51-3、51-5 和 2381 在轻度盐碱地上(土壤含盐量 $0.1\%\text{--}0.2\%$)单位面积平均生物量为 $51.194\text{--}80.561\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;无性系 2521 和 50-6 在中度盐碱地上(土壤含盐量 $0.2\%\text{--}0.4\%$)单位面积平均生物量分别为 $39.507\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $34.577\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$;无性系 2521 和 51-5 在重度盐碱地上(土壤含盐量 $0.4\%\text{--}0.5\%$),单位面积平均生物量分别为 $32.254\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 $25.886\text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。无性系 51-3 在轻盐立地上生物量约为瑞典柳树能源林最高产量的 2.6 倍,约为美国能源林柳树无性系 SV1 生物量的 3.4 倍;约为加拿大 SX64 与 SX61 2 个柳树无性系的生物量的 1.2 倍和 1.3 倍;约为杞柳的 7.1 倍。选育出适合在江苏沿海盐碱地生长的柳树能源林无性系,有利于改善沿海生态环境,提高土地利用效率,促进清洁能源产业的可持续发展。

造林密度的大小主要取决于无性系自身的特点,同时和土壤条件及经营强度密切相关,适宜的密度能提高能源林的生产力。同时造林密度还与收获期紧密相关,造林密度改变,其采伐期也会随之改变^[20]。通常来讲,国际上柳树能源林的栽植一般采用宽窄行,密度为 $15\ 000\text{--}20\ 000\text{ 株}/\text{hm}^2$,轮伐期为 $3\text{--}5\text{ a}$ ^[21-22]。李洪^[8]研究发现轮伐期为 2 a、密度 $15\ 000\text{ 株}/\text{hm}^2$ 时,柳树的年均单位面积生物量为最大。本研究柳树株距 30 cm,行距 100 cm,密度为

$33\ 333\text{ 株}/\text{hm}^2$,采伐时间为 2 a,与国外研究相比,本研究栽植密度较高,且轮伐期相对较短。有的无性系(如无性系 51-5)保存率低,但并未影响最终产量,可能是因密度降低,有利于保存株的生长,单株产量的增加弥补了数量上的不足。这种情况是否与初植密度过大有关,降低初植密度是否能提高保存率和单位面积产量有待于进一步研究。另外,有些无性系开始出现较严重的溃疡病(如无性系 2820),如果延长轮伐期是否会影响第 3 年的产量也需进一步研究。

热值是植物能量水平的一种度量,可反映植物对太阳辐射能的利用状况,也反映了植物组织对生态环境的适应性^[23-25]。1934 年向日葵不同部位叶片热值被首次测定^[26],此后开始了众多热值方面的研究。本研究采用春季萌发前的枝条测定低位发热量,无性系间存在显著差异。选取的 22 个无性系中低位发热量为 $12\ 580\text{--}14\ 641\text{ J/g}$,无性系 2521 和 2352 低位发热量最低,与其他无性系间存在极显著差异($P<0.01$),这种差异的出现是否和无性系组织结构有关,究竟是那些因素造成的,能否稳定遗传等均有待于进一步研究,为选育低位发热量高且生物量大柳树品种提供依据。张英楠等^[27]研究发现,5 年生乔木柳无性系 AAUSC 全株热值最高,为 $3.168\times 10^8\text{ kJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。李洪^[8]研究发现,3 个乔木柳(苏柳 795、苏柳 799 和苏柳 172)和 1 个灌木柳(杞柳)干质量热值为 2 年生大于 1 年生。本研究选育的 12 个无性系 2 年生热值平均为 $3.819\times 10^8\text{ kJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,超过 AAUSC 热值的 20.5%,但现在仅有 2 年生春季萌发前枝条热值数据,下一步应开展优良无性系不同轮伐期热值的研究。

品种稳定性是评价品种推广价值的一个重要参考指标^[14],由于基因与环境的互作,大多数作物在不同地区种植的表型值常常不一致,有时还有显著的差异。因而,分析基因型与环境互作的大小,找到一种既适合种植又能获得稳定高产的品种,一种有效的评价品种稳定性的方法和模型就显得格外重要^[28]。Kempton^[29]第 1 次将这 AMMI 模型应用于小麦区域试验资料的分析,现在 AMMI 模型已广泛应用于水稻等作物品种区域试验中基因型与环境互作产量特征分析中^[30-37]。本研究如用线性回归模型只能解释基因型与环境互作平方和的 85.882%,而 AMMI 模型交互作用主成分 PCA1 和 PCA2 解释了基因型与环境交互作用平方和的 100%,故采用改良的 AMMI 模型进行稳定性分析结

果较为可靠。品种稳定性高表明在各种立地上表现较一致,但稳定性弱的品种可能在特定立地表现优良,如无性系 51-3 在轻度盐碱地上生长迅速,而与中盐和重盐立地有较强的负向交互作用,这也是本研究扩大稳定系参试无性系的意义所在。

本研究采用年单位面积标准煤产量进行稳定性评价,这一指标综合了保存率、生物量、含水率、低位发热量等指标,是最终产品,与利用多项指标进行综合评价相比更加简洁,有更加实际的应用价值。

参考文献:

- [1] 崔士友,张蛟,翟彩娇.江苏沿海滩涂快速改良与高效利用研究进展[J].农学学报,2017,7(3):42-46.
- [2] DAS DK, CHATURVEDI OP. Energy dynamics and bioenergy production of *Populus deltoides* G-3 Marshplantation in eastern India [J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(1): 144-148
- [3] YEMSHANOV D, MCKENNEY D. Fast-growing poplar plantations as a bioenergy supply source for Canada [J]. Biomass and Bioenergy, 2008, 32(3): 185-197
- [4] 白卫国,张玲,翟明普.论我国林业生物质能源林培育与发展[J].林业资源管理,2007(2):7-10.
- [5] 张文辉,何景峰,周赛运.能源柳研究现状与国内引种栽培[J].生物质化学工程,2006,40(B12):38-45.
- [6] 施士争,潘明建,王保松,等.培育灌木柳生物质能源林的前景[J].江苏林业科技,2006,33(3):1-5.
- [7] 涂忠虞.柳树育种与栽培[M].南京:江苏科学技术出版社,1982.
- [8] 李洪.杨柳能源林种植密度和轮伐期试验及其燃烧特性分析[D].北京:中国林业科学研究院,2009.
- [9] SUI D Z, WANG B S, SHI S Z, et al. Change of protein expression during leaves of shrub willow clones in response to salt stress [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2015, 37(3): 1-15.
- [10] 施士争,隋德宗,王红玲,等.灌木柳速生无性系的耐盐性选择研究[J].西北林学院学报,2010,25(4):72-77.
- [11] 隋德宗,王保松,施士争,等.盐胁迫对灌木柳无性系幼苗生长及光合作用的影响[J].浙江林学院学报,2010,27(1):63-68.
- [12] 隋德宗,王保松,王伟伟.盐胁迫对灌木柳2个无性系渗透调节物质含量的影响[J].江苏林业科技,2014,41(6):1-3.
- [13] 王伟伟,乔志攀,何旭东,等.灌木柳种质资源的耐盐性变异[J].江苏林业科技,2016,43(6):15-19.
- [14] 吴为人.对基于 AMMI 模型的品种稳定性分析方法的一点改进[J].遗传,2000,22(1):31-32.
- [15] 杨涛,李加纳,唐章林,等.三种评价品种稳定性方法的比较[J].贵州农业科学,2006,34(1):28-31.
- [16] CHRISERSSON L, SENNERHY-FORSSE L. Willow and poplar research and plantations in Sweden today [J]. Swedish University of Agricultural Sciences, 1995.
- [17] GRANHALL U. Biological fertilization [J]. Biomass and Bioenergy, 1994, 6(1/2):81-91.
- [18] KOPP R F, WHITE E H, ABRAHAMSON L P, et al. Cutting cycle and spacing effects on biomass production by a willow clone in New York [J]. Biomass and Bioenergy, 1997, 12(5):313-319.
- [19] LABRECQUE M, TEODORESCU T I. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada) [J]. Biomass and Bioenergy, 2005, 29(7):1-9.
- [20] 康树珍,贾黎明,彭祚登,等.燃料能源林树种选育及培育技术研究进展[J].世界林业研究,2007,20(3):27-33.
- [21] MITCHELL C P, STEVENS EA, WATERS M P. Short-rotation forestry-operations, productivity and costs based on experience gains in the UK [J]. Forest Ecology and Management, 1999, 121(1/2):123-136.
- [22] NEUHAUSEN E F, ABRAHAMSON L P, WHITE E H, et al. Northeast energy perspective: Willow biomass-bioenergy industrial development [R/OL]. Paper to the First Conference of the Short Rotation Woody Crops Operations Working Group, Paducha, Kentucky, 23-25 September, 1996. <http://www.woodycrops.org/paducha/neuhausner.htm>.
- [23] 陈美玲,上官周平.四种园林植物热值与养分特征[J].应用生态学报,2008,19(4):747-751.
- [24] 林益明,林鹏,李振基,等.福建武夷山甜槠群落能量的研究[J].植物学报,1996,38(12):989-994.
- [25] 彭培好,王金锡,胡振宇,等.人工桉柏混交林生态系统的能量特征[J].应用生态学报,1998,9(2):113-118.
- [26] LONG F L. Application of calorimetric methods to ecological research [J]. Plant Physiology, 1934, 9(2):323-327.
- [27] 张英楠,芦静,张启昌,等.9个能源柳无性系的生物量、热值和能量现存量[J].北京林业大学学报,2016,38(9):55-61.
- [28] 杨涛,李加纳,唐章林,等.三种评价品种稳定性方法的比较[J].贵州农业科学,2006,34(1):28-31.
- [29] KEMPTON R A. The use of biplots in interpreting variety by environment interactions [J]. Journal of Agricultural Science, 1984, 103(1):123-125.
- [30] 余本勋,张时龙,何友,等. AMMI 模型在水稻品种区域试验中的应用[J].现代农业科技,2010(2):45-46.
- [31] 常磊,柴守玺. AMMI 模型在旱地春小麦稳定性分析中的应用[J].生态学报,2006,26(11):3677-3684.
- [32] 曾献英. AMMI 模型在棉花区域试验中的应用[J].棉花学报,2004,16(4):233-235.
- [33] 张锡顺,杨建国,刘旭云,等.双标图在蓖麻区域试验产量分析中的应用[J].西南农业学报,2007,20(5):917-920.
- [34] 张体德,郑永战,卫双玲,等.全国芝麻区域试验试验点合理性与代表性的评价[J].河南农业科学,2004(1):15-17.
- [35] 宿飞飞,陈伊里,吕典秋,等.用 AMMI 模型分析马铃薯淀粉品质性状的稳定性[J].东北农业大学学报,2009,40(11):18-22.
- [36] 董云,王毅,漆燕玲,等.应用 AMMI 模型分析评判甘肃省春油菜区试品种的稳定性及适应性[J].西北农业学报,2010,19(7):74-78.
- [37] 孙计平,李雪君,吴照辉,等.应用 AMMI 模型分析烤烟区试品种稳定性[J].中国农学通报,2011,27(19):263-267.