

文章编号: 1001-1498(2010)03-0425-05

11 个能源林杨柳无性系热值季节及年度变化

李洪¹, 胡建军^{1*}

(1 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 测定了 5 个乔灌木柳树无性系和 6 个杨树无性系夏季、冬季不同组分的干质量热值, 研究了 1 年生杨、柳无性系皮部和干部在夏季和冬季的干质量热值的变化情况, 以及随着平茬次数的增加 1 年生柳树无性系全株热值的变化规律。结果表明: 杨、柳树无性系不同组分在不同季节干质量热值的变化不完全一样, 但是在冬季皮部、干部和全株热值均比在夏季时高; 5 个柳树无性系不同季节年份的干质量热值变化规律基本一致, 冬季热值为 1 年生根 1 年生干 > 2 年生根 1 年生干 > 3 年生根 1 年生干, 柳树无性系间的 1 年生根 1 年生干冬季热值与 2 年生根 1 年生干冬季热值的差异极显著, 与 3 年生根 1 年生干冬季热值的差异显著, 灌木柳的热值比乔木柳的高; 6 个杨树无性系(1 年生根 1 年生干)的冬季全株干质量热值 > 夏季全株干质量热值, 但无性系间差异均不显著; 1 年生柳树全株冬季干质量热值普遍高于杨树。

关键词: 能源林; 杨树; 柳树; 干质量热值

中图分类号: S792.11 S792.12

文献标识码: A

Seasonal and Annual Dynamics of the Gross Caloric Value of Eleven Poplar and Willow Clones

LI Hong, HU Jian-jun

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: The gross caloric value of five *Salix* and six *Populus* clones harvested in summer and winter were determined to explore the change of gross caloric value on one-year-old poplar and willow bark and trunk in the two seasons. And the gross caloric value change on the whole tree of one-year-old willow clones after several harvests were also discussed. The results show that the gross caloric value of different fractions of willow and poplar are not the same. However, the gross caloric values of the bark, trunk and the whole tree in winter were higher than those in summer; the variation of five willow clones were consistent with each other, the gross caloric value of one-year-old trunk with one-year-old root in winter > the gross caloric value of one-year-old trunk with two-year-old root in winter > the gross caloric value of one-year-old trunk with three-year-old root in winter, the gross caloric value of one-year-old trunk with one-year-old root in winter and that of one-year-old trunk with two-year-old root in winter among different willow clones reached significant level at $P = 0.01$, the gross caloric value of one-year-old trunk with three-year-old root in winter among different willow clones reached significant level at $P = 0.05$, the gross caloric value of shrub willow were higher than that of tree willow; Concerning six poplar clones, the gross caloric value of one-year-old trunk with one-year-old root in winter was bigger than that in summer, the gross caloric value

收稿日期: 2009-02-12

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题“能源林培育技术”(2006BAD18B01)和国家林业局“948”项目“杨树生物能源品种选育栽培技术引进”(2006-4-121)

作者简介: 李洪(1983—),女,山西孟县人,在读硕士,主要从事杨柳能源林研究。

* 通讯作者: E-mail: hujj@caf.ac.cn

among different of poplar clones did not reach significant level and was similar. The whole tree gross caloric value of one-year-old willow clones was higher than those of poplar clones.

Key word: energy forest; poplar; willow; gross caloric value

植物的热值与其品种的自身因素和所生存的生态环境有密切关系,热值的大小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^[1-3]。干质量热值(gross caloric value, GCV)指的是单位质量的干物质在完全燃烧的情况下释放的总热量,单位为 $J \cdot g^{-1}$ 或 $kJ \cdot g^{-1}$ ^[4]。近年来,许多学者对植物热值进行了研究,涉及的内容有植物热值与营养元素的关系^[5-7]和影响植物热值的因素^[8],以及热值在植物不同器官中流动分配等研究^[9-10]。

杨树和柳树是我国主要造林树种,具有分布广、生长快、成材早、产量高、热值高、易于更新以及木材用途广泛等特点^[11]。自20世纪后期,化石能源渐趋枯竭以及全球温室效应加剧,促使主要发达国家开始调整以化石燃料为主导的能源结构,制订新的能源发展战略;而我国实现可持续发展、提高人民生活水平的先决条件就是解决能源问题,因此,对可再生能源的研究、开发和利用是当前重要的国策^[12-13]。杨柳科植物是重要的木质能源树种,柳树能源林的研究、开发和大规模利用以瑞典和北美为先导^[14-16]。进入21世纪,我国也开始杨柳能源林培育系统研究,植物热值作为生物质能源的一个关键指标,成为能源品种培育的重要研究内容。本文研究了5个柳树无性系和6个杨树无性系在不同季节、不同年份干质量热值的变化规律,为确定能源林采伐期和加工利用提供参考,进而为将来大面积营建能源林提供依据,推动我国能源林建设的进程。

1 能源试验林概况

北京玉泉山柳树能源试验林位于 $39^{\circ}53' \sim 40^{\circ}09' N$, $116^{\circ}03' \sim 116^{\circ}23' E$,属暖温带半湿润气候区,年平均气温 $13^{\circ}C$,年平均降水量 $506.7 mm$,全年降水的75%集中在夏季,7、8月常有暴雨。无霜期189 d,全年光照时数 $2700 h$ 。参试的5个柳树无性系均来自江苏林业科学研究院,2个乔木柳分别为:苏柳799(*Salix* × *Jiangsuensis* CL 'J-799')、苏柳172(*S.* × *Jiangsuensis* CL 'J-172');3个灌木柳分别为:银芽柳(*S. leucopithecica* Kimura)、蒿柳(*S. viminalis* L)、绵毛柳(*Salix erioclada*)。2006年4月中旬,采用

1年生插穗扦插造林,插穗长度为 $10 \sim 15 cm$,扦插密度为 $30 cm \times 40 cm$ 。

河南焦作杨树源能试验林位于 $35^{\circ}8' N$, $113^{\circ}17' E$,属温带气候,年平均气温为 $15.2^{\circ}C$,年平均降水量为 $625.4 mm$,相对湿度61%,无霜期224 d,全年光照时数 $2434 h$ 。参试材料为:3个美洲黑杨(*Populus deltoids* Bart.)种内杂交无性系(无性系号为313、239、276)、1个美洲黑杨引进种50号杨(*P. deltoides* Bart. cv. '55/65')、1个美洲黑杨 × 马氏杨派间杂种110(*P. deltoides* × *P. maximowiczii*)、1个欧美杨无性系2001(*P. nigra* × *P. deltoides*)。2008年3月12—15日,采用1年生插穗扦插造林,插穗长为 $10 \sim 15 cm$,扦插密度为 $30 \times 40 cm$ 。除正常浇水、锄草外,不做任何修枝、抹芽处理。

2 研究方法

2.1 采样方法

杨柳树取样分别在2008年夏季(8月)和冬季(12月)取样,每个无性系选取6株长势中等的植株,距离地面 $5 cm$ 处砍伐,除去叶片,其中3株进行剥皮,树皮、树干以及另3株整株材料分别装袋。不同根龄(1~3年)生长1年的柳树无性系取样分别是在2006年12月和2007年12月采样,各无性系选择3株长势中等的植株,距地面 $5 cm$ 处砍伐,除去叶片,剪短装袋。以上将所有材料带回实验室,在 $85^{\circ}C$ 恒温烘箱烘干至恒质量,剪成碎片,用植物粉碎机粉碎,过60目筛子后保留在塑料袋中。

2.2 测定方法

采用Par6300全自动氧弹热量仪(美国)测定植物样品干质量热值,测定环境温度控制在 $25^{\circ}C$,室内无强烈的冷源、热源及空气对流,每次试验前用标准物质苯甲酸标定。将粉碎的样品用压片机压片,样品质量控制在 $0.6 \sim 0.7 g$ 每个试样重复2~3次,测量误差不超过 $0.1 kJ \cdot g^{-1}$ 。

2.3 数据处理

采用SPSS软件(15.0)对数据进行统计分析。采用RANK过程对数据进行正态分布检验后进行单因素方差分析,然后用LSD法进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 1年生杨树和柳树无性系树皮质量占植株的比例

由表1可看出: 1年生杨柳无性系树皮质量占植株的比例随季节而异, 夏季为23.85%~34.41%, 占植株比例最大的是苏柳172, 为34.41%; 冬季为21.87%~29.51%。方差分析结果表明: 夏季和冬季的树皮质量占植株的比例各无性系间差异均不显著, 同一无性系不同季节树皮质量占植株的比例差异也不显著。除银芽柳、蒿柳皮部质量占植株比例冬季高于夏季外, 其它苏柳799、苏柳172、绵毛柳3个柳树无性系和6个杨树无性系的皮部质量占植株比例冬季均低于夏季。与Bojana^[17]测定的1年生杨柳无性系树皮占全株的比例(19.0%~26.7%)相近。

3.2 5个柳树无性系干质量热值比较

植物的自身组成、结构、功能、营养条件和植物所含营养成分、光照强度、日照长短、土壤类型等诸多因素均影响植物的热值^[18-19]。方差分析结果表明: 5个柳树无性系间的夏季皮部、夏季干部、冬季皮部干质量热值的差异均极显著($P < 0.01$), 冬季干部和1年生根1年生干夏季全株干质量热值的差异显著($P < 0.05$)。从表2看出: 在夏季和冬季, 5个柳树无性系不同组分的干质量热值变化不同, 总

表1 1年生杨柳无性系树皮质量占植株的比例

杨柳无性系		夏季皮部质量 占植株比例/%	冬季皮部质量 占植株比例/%
柳树	苏柳 799	27.92 ± 8.12	24.85 ± 3.75
	苏柳 172	34.41 ± 5.82	27.52 ± 3.98
	银芽柳	23.85 ± 0.83	25.67 ± 1.09
	蒿柳	27.87 ± 2.56	29.51 ± 0.76
杨树	绵毛柳	29.17 ± 1.14	27.63 ± 3.22
	313	28.48 ± 1.20	23.14 ± 1.74
	239	26.23 ± 1.00	23.82 ± 3.57
	50号杨	28.36 ± 1.40	21.87 ± 0.81
	110	27.48 ± 3.40	23.16 ± 1.78
	2001	25.51 ± 3.60	24.79 ± 3.33
	276	27.80 ± 2.30	23.88 ± 0.51

注: 数据为3次重复的平均值, 采样时间为2008年夏季(8月)和冬季(12)月。

体趋势是皮部 < 全株 < 干部, 冬季皮部、干部和全株的热值都比夏季的高。值得注意的是从夏季到冬季, 干部干质量热值增加的幅度(0.90~1.14 kJ·g⁻¹)和全株热值增加的幅度(0.55~1.12 kJ·g⁻¹)大于皮部干质量热值增加的幅度(0.46~0.83 kJ·g⁻¹), 其中, 绵毛柳的夏季和冬季皮部的热值最大, 分别为18.98、19.44 kJ·g⁻¹, 均显著高于其他几个柳树无性系, 究其原因是由于绵毛柳树皮表面有较多的绒毛; 苏柳799的夏季和冬季干部的热值最大, 分别为18.47、19.38 kJ·g⁻¹, 均显著高于其他几个柳树无性系。灌木柳夏季和冬季全株热值均高于乔木柳。

表2 1年生柳树无性系不同组分干质量热值的比较

组分	热值/(kJ·g ⁻¹)				
	乔木		灌木		
	苏柳 799	苏柳 172	银芽柳	蒿柳	绵毛柳
夏季皮部	17.81 ± 0.31 ^a	17.94 ± 0.30 ^a	17.55 ± 0.09 ^a	17.92 ± 0.22 ^a	18.98 ± 0.02 ^b
夏季干部	18.47 ± 0.15 ^c	18.11 ± 0.07 ^{ab}	18.38 ± 0.03 ^{bc}	18.37 ± 0.06 ^{bc}	18.25 ± 0.01 ^{ab}
冬季皮部	18.32 ± 0.05 ^a	18.46 ± 0.21 ^{ab}	18.36 ± 0.05 ^a	18.75 ± 0.19 ^{bc}	19.44 ± 0.20 ^c
冬季干部	19.38 ± 0.09 ^b	19.25 ± 0.03 ^{ab}	19.35 ± 0.00 ^b	19.37 ± 0.05 ^b	19.15 ± 0.12 ^{ab}
1年生根1年生干全株(夏季)	18.18 ± 0.14 ^{ab}	17.92 ± 0.12 ^a	18.27 ± 0.05 ^{ab}	18.49 ± 0.06 ^b	18.36 ± 0.40 ^b
1年生根1年生干全株(冬季)	19.62 ± 0.10 ^d	19.36 ± 0.15 ^a	19.76 ± 0.13 ^{bc}	20.02 ± 0.12 ^d	19.84 ± 0.03 ^{cd}
2年生根1年生干全株(冬季)	18.74 ± 0.11 ^a	19.03 ± 0.37 ^{ab}	19.32 ± 0.18 ^{bcd}	19.48 ± 0.18 ^{cd}	19.62 ± 0.07 ^d
3年生根1年生干全株(冬季)	18.98 ± 0.22 ^{ab}	18.67 ± 0.07 ^a	19.10 ± 0.19 ^{bc}	19.04 ± 0.30 ^{ab}	19.48 ± 0.20 ^{cd}

注: 不同上标小写字母表示同行数据差异显著, 相同上标小写字母表示同行数据差异不显著; 不同下标小写字母表示同列数据差异显著, 相同下标小写字母表示同列数据差异不显著; ±后的数值为标准差。1年生根1年生干指2006年扦插当年的材料, 2年生根1年生干指平茬1次后生长1年的材料, 3年生根1年生干指平茬2次后生长1年的材料。

方差分析表明: 5个柳树无性系的1年生根的全株热值(冬季)极显著高于2年生根的全株热值(冬季), 显著高于3年生根的冬季全株热值(冬季)。从表2还看出: 蒿柳的1年生根的全株冬季热

值最高为20.02 kJ·g⁻¹, 显著高于苏柳799、苏柳172和银芽柳, 与绵毛柳差异不显著; 绵毛柳的2年生根1年生干和3年生根的全株冬季热值最高, 分别为19.62、19.48 kJ·g⁻¹, 均分别显著高于苏柳

799 和苏柳 172。银芽柳、蒿柳、绵毛柳 3 个灌木柳的冬季全株热值都比同年份的 2 个乔木柳苏柳 799 和苏柳 172 的高。除苏柳 799 外, 4 个柳树无性系冬季全株干质量热值均随着平茬次数的增加而逐年降低, 1 年生根的全株热值最大, 其次为 2 年生根全株, 3 年生根全株热值最小, 逐年降低幅度为 1.8% ~ 4.9%。

3.3 6 个 1 年生杨树无性系干质量热值的比较

经方差分析, 无论是在夏季采伐, 还是在冬季采伐, 6 个 1 年生杨树无性系(1 年生根)的全株干质量热值无显著差异, 因此, 这 6 个杨树无性系均适宜用作能源林品种。由表 3 可以看出: 6 个 1 年生杨树无性系(1 年生根)在夏季皮部、干部、全株的干质量热

值分别为 17.00 ~ 17.98、18.18 ~ 18.35、18.24 ~ 18.49 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$; 在冬季皮部、干部、全株的干质量热值分别为 18.97 ~ 19.44、19.23 ~ 19.39、19.28 ~ 19.45 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。不同组分在夏季和冬季的干质量热值变化规律有所不同, 同一无性系的夏季皮部、干部和全株干质量热值间的变化较大(0.82 ~ 1.82 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$), 而在冬季的变化较小(0 ~ 0.34 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)。6 个杨树无性系夏季皮部干质量热值均显著低于干部和全株, 干部与全株间干质量热值无显著差异, 而冬季皮部、干部、全株干质量热值间均差异不显著。各杨树无性系冬季皮部、干部和全株的干质量热值均显著高于夏季对应的干质量热值, 故在杨树休眠期采伐能源林能够利用较多的能量。

表 3 1 年生杨树(1 年生根)无性系不同组分干质量热值的比较

组分	干质量热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)					
	313	239	50 号杨	110	2001	276
夏季皮部	17.61 ±0.02a	17.00 ±0.02a	17.48 ±0.03a	17.98 ±0.04a	17.54 ±0.04a	17.64 ±0.01a
夏季干部	18.35 ±0.02b	18.34 ±0.02b	18.24 ±0.05b	18.28 ±0.02b	18.30 ±0.00b	18.18 ±0.01b
冬季皮部	19.44 ±0.23c	18.97 ±0.10c	19.43 ±0.06c	19.37 ±0.14c	19.43 ±0.06c	19.30 ±0.11d
冬季干部	19.36 ±0.05c	19.23 ±0.18c	19.39 ±0.11c	19.37 ±0.05c	19.39 ±0.11c	19.31 ±0.12d
夏季全株	18.49 ±0.07b	18.24 ±0.06b	18.30 ±0.19b	18.45 ±0.13b	18.36 ±0.03b	18.42 ±0.02c
冬季全株	19.28 ±0.08c	19.31 ±0.01c	19.40 ±0.16c	19.37 ±0.07c	19.40 ±0.16c	19.45 ±0.05d

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著, 相同小写字母表示差异不显著, ±后的数值为标准差。1 年生根 1 年生干指 2008 年扦插当年的材料。

3.4 杨柳无性系干质量热值比较

杨柳在分类上属杨柳科(Salicaceae)植物, 不仅在分类上具有相似性, 生物学特性也相近, 如萌生能力强、易繁殖、生长周期短等, 多用作生物质能源方面。11 个杨柳无性系的夏季全株干质量热值都低于其冬季热值, 其中 1 年生柳树无性系冬季全株干质量热值为 19.36 ~ 20.02 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 1 年生杨树无性系干质量热值为 19.28 ~ 19.45 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。经方差分析, 除苏柳 172 外, 其它 5 个柳树无性系的冬季干质量热值都显著高于杨树各无性系, 而且各杨柳无性系冬季干质量热值均极显著高于夏季; 因此, 对于杨柳能源林采伐利用以在其休眠期进行为宜。

4 结论与讨论

(1) 试验的杨柳树在同一季节同一无性系的皮部热值普遍低于干部和全株热值, 结果与咎启杰等^[20]对无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)和海桑(*S. caseolaris*)的研究结果一致, 其原因是植物树皮对矿物质元素的吸收和积累能力较强, 因此其矿物质元素含量较高, 含有较多的灰分物质^[21]; 而且, Bojana

等^[17]和 Tharakan 等^[22]研究表明, 树皮的灰分含量是干部的 5 ~ 6 倍, 所以树皮的热值比较低; 而且本文作者在测定树皮热值的过程中, 观测到一些白色或灰绿色物质, 这些物质具体是哪些矿物元素组成, 需要进一步检测分析。

(2) 夏季杨柳树无性系的皮部、干部、全株干质量热值的差异较冬季大, 因为夏季树木生长旺盛, 各组分比较活跃, 尤其是皮部进行营养物质及矿物质元素的运输而冬季植株处于休眠状态。冬季各组分的热值较夏季高, 因为从夏季到秋冬季节, 气温逐渐降低, 积累有机物质促使植物体增加能量来增强抗寒能力, 因而干质量热值明显提高, 也可证明冬季比较适合采伐。

(3) 对不同根龄(1 ~ 3 a)生长 1 年的柳树不同无性系全株冬季热值的测定表明, 随着平茬次数的增加热值普遍降低, 降低的幅度为 1.8% ~ 4.9%, 可能是随着平茬次数的增加, 促进了植株萌条数量的增多和植株的生长, 使得单位质量植株的能量分配有所减少。Bojana 等^[17]对 1 年生、2 年生以及多年生(8 ~ 14 年)杨柳无性系树皮占植株的比例以

及不同组分的热值研究表明, 树皮占植株的比例随着生长年份的增加而降低, 而全株热值呈现先增高(2年生最高)后降低的趋势。由于能源林利用的生物物质与其生物量和热值有关, 因此选择一个合适的轮伐期还需要结合种植密度和单位面积生物量进行综合考虑。杨柳能源林种植后第1年冬季或第2年春季进行平茬, 然后以3~4年的轮伐期进行采伐^[23-26]。轮伐期对植物热值的大小有影响, 因此对不同轮伐期杨柳的热值测定具有重要意义, 有关测定研究正在进之中。

参考文献:

- [1] 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 植物热值及其生物生态学属性 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1095 - 1103
- [5] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分 [J]. 生态学报, 1999, 19 (6): 832 - 836
- [6] 徐永荣, 张万均, 冯宗炜, 等. 天津滨海盐渍土上几种植物的热值和元素含量及其相关性 [J]. 生态学报, 2003, 23 (3): 450 - 455
- [7] 林益明, 郭启荣, 叶功富, 等. 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征 [J]. 生态学报, 2004, 24 (10): 2217 - 2225
- [8] 方运霆, 莫江明, 李德军, 等. 鼎湖山马尾松群落能量分配及其生产的动态 [J]. 广西植物, 2005, 25 (1): 26 - 32
- [9] 官丽莉, 周小勇, 罗 艳. 我国植物热值研究综述 [J]. 生态学杂志, 2005, 24 (4): 452 - 457
- [10] 王文清, 叶庆华, 王笑梅, 等. 盐胁迫对木榄幼苗各器官热值、能量积累及分配的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12 (1): 8 - 12
- [11] 方升佐, 徐锡增, 单兴寿, 等. 杨树超短轮伐期经营的生产力及材性的研究 [J]. 林业科学, 1996, 32(4): 334 - 341
- [12] 汪有科. 世界各国能源林的研究与发展综述 [J]. 水土保持通报, 1989, 9 (5): 52 - 57
- [13] 万 劲, 方升佐, 翟学昌. 四个杨树无性系苗期能源林相关特性的研究 [J]. 林业科技开发, 2007, 21(3): 16 - 19
- [14] 方升佐, 黄宝龙. 瑞典能源林的研究及发展概况 [J]. 世界林业研究, 1997, 10 (3): 66 - 71
- [15] Siren G, Mitchell C P. Forest energy and the fuelwood crisis [R]. Proceedings of IUFRO Project group. Sweden: IUFRO, 1984
- [16] Parikka M. Global biomass fuel resources [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 613 - 620
- [17] Bojana K, Spiro K, Sasa O. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood [J]. Biomass and Bioenergy, 2002, 23: 427 - 432
- [18] 祖元刚. 能量生态学引论 [M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990
- [19] 谭忠奇, 林益明, 丁印龙, 等. 五种丛生状棕榈植物叶热值的月变化 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (7): 1135 - 1138
- [20] 曾启杰, 王伯荪, 王勇军, 等. 深圳福田无瓣海桑—海桑林能量的研究 [J]. 应用生态学报, 2003, 14 (2): 170 - 174
- [21] 王立海, 孙墨珑. 东北12种灌木热值与碳含量分析 [J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(5): 42 - 46
- [22] Tharakan P J, Volk T A, Abrahamson L P, *et al.* Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25: 571 - 580
- [23] Volk T A, Verwijst T, Tharakan P J, *et al.* Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2004, 2: 411 - 418
- [24] Laureysens I, Bogaert J, Blust R, *et al.* Biomass production of 17 poplar clones in a short rotation coppice culture on a waste disposal site and its relation to soil characteristics [J]. Forest Ecology and Management, 2004, 187: 295 - 309
- [25] 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: 1 - 9
- [26] Aylott M J, Casella E, Tubby I, *et al.* Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow [J]. New Phytologist, 2008, 170: 358 - 370