

# 浑善达克沙地 14 种植物热值特征\*

高 凯<sup>1\*</sup> 韩国栋<sup>1,2</sup> 于永奇<sup>1</sup> 张丽娟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028043; <sup>2</sup> 内蒙古农业大学生态环境学院, 呼和浩特 010018)

**摘 要** 通过对浑善达克沙地 14 种主要野生植物根、茎、叶、果实等器官进行取样,测定其热值、灰分、矿质元素,同时对各项指标的相关性进行分析,来探讨浑善达克沙地主要植物作为生物燃料供给料的潜力及植物热值对灰分和矿质元素含量的响应。结果表明:14 种野生植物全株热值范围为  $16.18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (猪毛菜)~ $20.23 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (小叶锦鸡儿),平均值为  $18.80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,该值高于全球陆生植物平均热值;14 种沙生植物的全株热值顺序为:小叶锦鸡儿>沙蒿>地烧瓜>冷蒿>木岩黄芪>扁蓿豆>糙隐子草>沙鞭>沙芦草>叉分蓼>冰草>细叶莛尾>木地肤>猪毛菜;14 种植物灰分范围  $3.98\%$  (沙鞭)~ $12.18\%$  (猪毛菜),全株灰分含量顺序为猪毛菜>木地肤>地烧瓜>细叶莛尾>叉分蓼>小叶锦鸡儿>沙蒿>冰草>扁蓿豆>沙芦草>冷蒿>木岩黄芪>糙隐子>沙鞭;热值与灰分呈极显著负相关 ( $P<0.01$ ),与碳、氮含量呈极显著正相关 ( $P<0.01$ ),热值与金属矿质元素呈负相关,与非金属矿质元素呈正相关,但均不显著。浑善达克沙地主要野生植物热值均高于当前主要生物质原材料(柳枝稷、玉米秸秆、王草等),说明该地区植物具有作为能源植物的潜力。

**关键词** 热值;灰分;碳;氮;矿质元素;浑善达克沙地

**中图分类号** Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)2-0341-06

**Characterization of caloric values in 14 plant species in Hunshandake Sandy Land.** GAO Kai<sup>1\*\*</sup>, HAN Guo-dong<sup>1,2</sup>, YU Yong-qi<sup>1</sup>, ZHANG Li-juan<sup>1</sup> (<sup>1</sup> Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, Inner Mongolia, China; <sup>2</sup> College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China). Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(2): 341–346.

**Abstract:** Wild plants can be served as potential sources of bio-fuel production. We determined the caloric values, ash contents, concentrations of C, N and mineral elements of 14 plant species in Hunshadake Sandy Land of Inner Mongolia. We also examined the relationship between caloric value and ash content and the contents of other mineral elements. The results showed that the caloric value ranged from  $16.18$  to  $20.23 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  across all species, with a mean value of  $18.80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , which is higher than that of worldwide terrestrial plants. The caloric values of the 14 species were in order of *Caragana microphylla*>*Artemisia desertorum*>*Cynanchum thesioides*>*Artemisia sievsiana*>*Hedysarum fruticosum*>*Trigonella ruthenica*>*Cleistogenes squarrosa*>*Psammochloa villosa*>*Agropyron mongolicum*>*Polygonum divaricatum*>*Agropyron cristatum*>*Iris tenuifolia*>*Kochia prostrate*>*Salsola collina*. The ash contents of the 14 species ranged from  $3.98\%$  to  $12.18\%$ , with the order of *S. collina*>*K. prostrate*>*C. thesioides*>*I. tenuifolia*>*P. divaricatum*>*C. microphylla*>*A. desertorum*>*A. cristatum*>*T. ruthenica*>*A. mongolicum*>*A. sievsiana*>*H. fruticosum*>*C. squarrosa*>*P. villosa*. Across the 14 species, the caloric value was negatively correlated with ash content ( $P<0.01$ ) and positively correlated with both C and N concentrations (all  $P<0.01$ ). Moreover, the caloric value was negatively correlated with the concentrations of metal elements, and positively correlated with the concentrations of non-metal elements ( $P>0.05$ ). Our results indicated that these wild plants could be served as an important source of bio-energy, as their ca-

\* 内蒙古自然科学基金项目(2013MS0525)和内蒙古自治区科技重大专项“不同生态类型区域生态监测与评估及风险预测技术研究”资助。

\*\* 通讯作者 E-mail: gaokai555@126.com

收稿日期: 2014-07-04 接受日期: 2014-09-12

loric values were much higher than that of the commonly used biomass for bio-energy (such as switch grass, corn stalk and king grass) in this region.

**Key words:** caloric value; ash; C; N; mineral element; Hunshandake Sandy Land.

热值作为植物的重要属性之一,具有一定的稳定性,是衡量绿色植物光合作用固定日光能的能力和评价植物第一性生产力的重要指标,是评价植物营养价值高低及植物能用潜力的重要内容。草地植物热值的研究还涉及到植物能量的固定、转化、利用及饲用价值高低及品质等多方面,在理论和生产实践中均具有重大意义(祖元刚等,1987)。

国外从20世纪30年代便有关于向日葵叶片热值的相关报道(Long, 1934)。此后,热值被越来越多的学者所重视,从个体水平、种群水平和群落水平对生态系统中物质的热值高低及热值的变化机制等进行了大量研究(Singh *et al.*, 1980; 龙世友等, 2013),涉及到草原生态系统、森林生态系统、湖泊生态系统中的个体、种群及群落的能值及能量流动循环等相关领域(Miller *et al.*, 1990; Lemenih *et al.*, 2004)。国内关于热值的研究主要从20世纪70年代末开始,具有代表性的是杨福国等(1978)对草甸常见植物的热值的报道。在此之后,我国学者对东北羊草(*Leymus chinensis*)草原和内蒙古羊草草原的植物和群落的热值进行了研究(郭继勋等, 2001; 鲍雅静等, 2003)。植物种类、养分含量、组织器官和物候期等植物内在因素以及土壤类型、光照强度、日照时数等环境因素均是影响热值的主要原因(任海等, 1999)。

在能源植物评价和筛选过程中,灰分和矿物质元素含量也是重要的参考指标。灰分是影响热值的重要因素,已有研究证实,植物体内灰分含量每升高1%则该植物热值约降低 $0.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cassida *et al.*, 2005);矿物质元素除了对热值有一定影响外,其在能源植物到生物乙醇转化过程中,一部分矿质元素(尤其碱金属)在高温燃烧情况下,产生大量的腐蚀性物质以及废渣,导致转化率下降,其中腐蚀性物质对设备造成破坏,增加转化成本(Thompson *et al.*, 2003; Laser *et al.*, 2009)。因此,在对能源植物研究过程中,灰分和矿质元素含量的研究是必要的。

本文通过对内蒙古浑善达克沙地主要植物的热值、灰分、碳、氮及部分矿质元素含量测定,研究植物种类、器官、灰分、碳、氮和矿质元素对植物热值的影响及其相关性,既丰富了国内关于沙地植物热值与

矿质元素之间相关性的研究内容,为沙地能用植物筛选提供参考。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 自然概况

研究地点位于内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场境内的中国科学院内蒙古草原生态系统定位站沙地样地,地理位置为 $43^{\circ}26'N-44^{\circ}08'N, 116^{\circ}04'E-117^{\circ}05'E$ ,海拔1200 m左右。中温带半干旱草原气候,冬季寒冷干燥,夏季较为温和湿润。年均温为 $0.6^{\circ}C$ ,1和7月平均气温分别为 $-21.3$ 和 $18.6^{\circ}C$ ,无霜期91 d。草原植物生长期约150 d。多年平均降水量约为350 mm,其中5—9月的降水量占年降水量的86%。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 取样方法** 于2013年8月分别对沙地样地内糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、木地肤(*Kochia prostrata*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、叉分蓼(*Polygonum divaricatum*)、木岩黄芪(*Hedysarum fruticosum*)、地烧瓜(*Cynanchum thesioides*)、扁蓿豆(*Trigonella ruthenica*)、冷蒿(*Artemisia sieversiana*)、沙芦草(*Agropyron mongolicum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、细叶鸢尾(*Iris tenuifolia*)和沙鞭(*Psammochloa villosa*)等14种常见植物进行分物种整株取样(根系取样土壤深度为50 cm),每种植物取25株,同时对地上部分进行茎、叶及果实的分离,将5株植物的各器官进行混合,带回实验室备用。

**1.2.2 室内分析** 将上述所采集的植物样品带回实验室在 $105^{\circ}C$ 下进行杀青30 min,之后在 $70^{\circ}C$ 条件下烘干至恒重、粉碎、混匀。用美国PARR公司生产的PARR6400型氧弹式热量计进行热值测定;灰分含量的测定用干灰化法,即将样品在马福炉 $550^{\circ}C$ 下灰化5 h后测定其灰分含量;全碳用 $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ 氧化法测定;全氮采用开氏定氮法进行测定(鲍士旦, 2000);矿质元素利用美国Thermo公司生产iCAP6000型号的电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

1.3 数据处理

全株热值(地上)=(叶片热值×叶片重量+茎秆热值×茎秆重量+果实热值×果实重量)/(叶片种类+茎秆重量+果实重量)

全株灰分含量(地上)=(叶片热灰分含量值×叶片重量+茎秆灰分含量×茎秆重量+果实灰分含量×果实重量)/(叶片种类+茎秆重量+果实重量)

采用 SAS 进行数据相关性和方差分析。

2 结果与分析

2.1 热值

表 1 给出了所调查的 14 种沙生植物的全株及各器官的热值,这些沙生植物的全株平均热值为 18.80 MJ·kg<sup>-1</sup>,最高值为 20.23 MJ·kg<sup>-1</sup>(小叶锦鸡儿),最小值为 16.18 MJ·kg<sup>-1</sup>(猪毛菜);14 种沙生植物的全株热值顺序为:小叶锦鸡儿>沙蒿>地烧瓜>冷蒿>木岩黄芪>扁蓿豆>糙隐子草>沙鞭>沙芦草>叉分蓼>冰草>细叶鸢尾>木地肤>猪毛菜;从科的水平来看,在沙生环境条件下豆科(小叶锦鸡儿、木岩黄芪、扁蓿豆)和菊科(冷蒿、沙蒿)的热值均高于禾本科(糙隐子草、沙鞭和沙芦草);从生活型水平来看,灌木(小叶锦鸡儿、沙蒿、冷蒿、木岩黄芪)热值要高于其他草本植物(扁蓿豆、糙隐子草、沙鞭、沙芦草、叉分蓼、冰草、细叶鸢尾、木地肤和猪毛菜);通过单因素方差分析表明小叶锦鸡儿显著高于其他各种植物热值( $P<0.05$ ),沙蒿、地烧瓜、冷蒿、木岩黄芪和扁蓿豆的热值显著高于糙隐子草、沙

鞭、沙芦草、叉分蓼、冰草、细叶鸢尾、木地肤和猪毛菜( $P<0.05$ )。

通过对 14 种植物根、茎、叶和果实热值平均数进行比较可以看出(表 1),各器官之间热值顺序为果实>叶片>茎秆>根系。而同一种植物的根、茎、叶和果实的热值大小关系因植物种类的不同而有所区别,其中根系热值在测定的 14 种植物中始终显著低于茎、叶和果实的热值( $P<0.05$ )(猪毛菜除外)。其中地烧瓜茎、叶和果实的热值之间没有表现出显著差异,其热值顺序为叶片>果实>茎秆;冰草、叉分蓼、沙芦草和木地肤茎、叶和果实的热值大小关系为果实>茎秆>叶片,其中果实和茎秆的热值显著高于叶片( $P<0.05$ ),而果实和茎秆之间未表现出显著差异;猪毛菜根、茎、叶和果实热值的大小顺序为果实>根系>茎秆>叶片,其中果实热值显著高于其他器官( $P<0.05$ ),根系热值显著低于果实而高于叶片和茎秆( $P<0.05$ ),叶片和茎秆之间差异不显著;隐子草、小叶锦鸡儿、木岩黄芪、扁蓿豆、冷蒿、沙蒿和沙鞭茎、叶和果实的热值大小关系为叶片和果实的热值显著高于茎秆( $P<0.05$ ),而叶片和果实热值之间的差异不显著。

在 14 种植物中根热值最高的是木岩黄芪(18.66 MJ·kg<sup>-1</sup>),最低的是沙芦草(9.51 MJ·kg<sup>-1</sup>);茎热值最高的是木岩黄芪(19.53 MJ·kg<sup>-1</sup>),最低的是猪毛菜(15.64 MJ·kg<sup>-1</sup>);叶片热值最高的是小叶锦鸡儿(21.12 MJ·kg<sup>-1</sup>),最低的是猪毛菜(15.15 MJ·kg<sup>-1</sup>);果实热值最高的是小叶锦鸡儿

表 1 14 种植物热值 (MJ·kg<sup>-1</sup>)  
Table 1 Caloric values of the 14 plant species

种类	茎	叶	果实	根	全株(地上)
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	18.62±0.16 Fb	19.12±0.11 Ea		13.06±2.34 Fc	18.87±0.13 C
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	15.64±0.34 Ic	15.15±0.33 Hc	17.76±0.27 Ea	16.63±0.34 Eb	16.18±1.05 E
木地肤 <i>Kochia prostrata</i>	17.92±0.33 Ha	17.08±1.04 Gb	18.18±0.41 Da	15.55±0.21 Ec	17.73±0.95 D
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	18.19±0.44 Ga	17.80±0.58 Fb	18.89±0.40 Da	8.90±1.90 Gc	18.30±0.23 C
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	19.11±0.42 Db	21.12±0.46 Aa	20.47±1.10 Aa	18.52±0.35 Ac	20.23±0.23 A
叉分蓼 <i>Polygonum divaricatum</i>	18.29±0.24 Gb	17.81±0.17 Fc	19.26±1.95 Ca	16.18±0.49 Ed	18.45±0.62 C
木岩黄芪 <i>Hedysarum fruticosum</i>	19.53±0.34 Ab	20.23±0.66 Ca		18.66±0.38 Ac	19.47±0.20 B
地烧瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	19.49±0.21 Ba	19.69±0.23 Da	19.60±0.40 Ba	17.90±0.31 Bb	19.59±0.51 B
扁蓿豆 <i>Trigonella ruthenica</i>	18.89±0.04 Eb	19.78±0.15 Da		18.00±0.13 Bc	19.33±0.27 B
冷蒿 <i>Artemisia sieversiana</i>	19.24±0.66 Cb	20.28±0.14 Ca	19.12±0.24 Cb	17.97±0.37 Bc	19.55±0.61 B
沙芦草 <i>Agropyron mongolicum</i>	18.81±0.26 Ea	18.22±0.50 Fb	18.67±0.17 Da	9.51±1.75 Fc	18.57±0.53 C
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	18.91±1.01 Db	20.38±0.58 Ba	19.55±0.29 Aa	18.00±0.76 Bb	19.61±0.18 B
细叶鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i>		17.95±0.28 Fa		17.21±0.39 Cb	17.95±0.72 D
沙鞭 <i>Psammochloa villosa</i>	18.42±0.10 Fb	19.13±0.30 Ea	18.58±0.22 Db	17.10±0.71 Dc	18.71±1.02 C
平均值	18.54	18.84	19.01	15.94	18.80

数值为平均值±标准差。不同大写字母表示不同植物种之间在  $P<0.05$  水平上差异显著,不同小写字母表示同种植物不同器官之间在  $P<0.05$  水平上差异显著。下同。

(20.47 MJ · kg<sup>-1</sup>),最低的是猪毛菜(17.76 MJ · kg<sup>-1</sup>)。

2.2 灰分含量

从表 2 可以看出,植物全株(地上)灰分含量范围为 4.15%~12.18%,其中猪毛菜最高(12.98%),沙鞭最低(3.98%),14 种植物全株灰分含量顺序为猪毛菜>木地肤>地烧瓜>细叶鸢尾>叉分蓼>小叶锦鸡儿>沙蒿>冰草>扁蓿豆>沙芦草>冷蒿>木岩黄芪>糙隐子>草沙鞭,总体来看豆科(小叶锦鸡儿、扁蓿豆和木岩黄芪)、菊科(冷蒿、沙蒿)和禾本科(糙隐子草、沙芦草和沙鞭)3 科植物的灰分含量低于猪毛菜、木地肤、地烧瓜、细叶鸢尾和叉分蓼,这种变化趋势与热值的大小关系相反,这也体现了灰分对植物干重热值的影响关系;而在菊科、豆科和禾本科中却以禾本科植物(糙隐子草 4.15%、沙芦草 6.25%和沙

鞭 3.98%)灰分含量最低。

通过对植物茎、叶、果实和根系灰分含量的单因素方差分析(表 2)可以看出,作为同一种植物其根、茎、叶和果实灰分含量均表现出显著差异( $P<0.05$ ),但是根、茎、叶和果实灰分含量的大小关系因植物种类的不同而表现出不同的顺序,其中根系和叶片灰分含量高于茎秆和果实。

2.3 相关性

由表 3 可以看出,热值与灰分含量之间呈现极显著负相关关系( $P<0.01$ ),与碳、氮之间呈现显著正相关关系,与镁之间呈现显著负相关关系( $P<0.05$ ),与铝、钙、钾、钠之间呈现负相关关系但不显著,与磷、硫、硅之间呈正相关关系但不显著;灰分与碳、磷、硅之间呈负相关关系,与碳之间显著相关

表 2 14 种植物灰分含量(%)

Table 2 Ash contents of the 14 plant species

种类	茎	叶	果实	根	全株(地上)
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	3.68±0.30 Fc	4.63±0.58 Ib		9.45±0.84 Ea	4.15±0.23 G
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	10.37±0.97 Ab	15.11±1.08 Aa	12.47±0.81 Ac	12.09±1.04 Bc	12.98±0.41 A
木地肤 <i>Kochia prostrata</i>	8.76±1.84 Bc	11.73±0.49 Cb	12.16±0.58 Ab	16.83±1.07 Aa	10.88±0.82 B
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	4.60±0.56 Ec	10.73±1.06 Da	4.60±0.80 Cc	6.90±0.71 Fb	6.64±0.41 D
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	7.07±1.01 Cb	9.52±1.33 Ea	4.18±0.72 Dc	8.23±1.11 Fb	6.92±0.61 D
叉分蓼 <i>Polygonum divaricatum</i>	5.09±0.72 Dc	9.33±0.52 Fb	6.44±0.78 Bc	11.48±1.90 Ca	6.95±0.27 D
木岩黄芪 <i>Hedysarum fruticosum</i>	3.86±0.55 Fb	7.13±1.02 Ha		4.98±0.40 Gb	5.50±0.39 F
地烧瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	4.82±0.34 Ec	14.64±0.70 Ba	4.31±0.44 Cc	11.43±0.82 C b	7.92±0.42 C
扁蓿豆 <i>Trigonella ruthenica</i>	4.30±0.99 Fc	7.98±0.71 Ga		6.57±0.73 Gb	6.14±0.74 E
冷蒿 <i>Artemisia sievrsiana</i>	4.22± 0.44 Fc	6.25±0.87 Hb	6.38±0.45 Bb	10.82±1.27 Da	5.62±0.83 F
沙芦草 <i>Agropyron mongolicum</i>	4.12± 0.12 Fd	7.89±2.31 Gb	4.61±0.75 Cc	9.82±1.32 Ea	6.25±0.91 E
沙蒿 <i>Artemisia desertorum</i>	4.21± 0.32 Fd	7.50±1.26 Gb	5.92±0.32 Bc	10.24±2.32 Da	6.71±0.34 D
细叶鸢尾 <i>Iris tenuifolia</i>		7.07±1.17 Hb		15.56±2.10 Aa	7.07±0.45 C
沙鞭 <i>Psammodhloa villosa</i>	4.09± 0.42 Fb	4.43±0.83 Ia	3.53±0.36 Dc	7.01±0.92 Fa	3.98±0.15 G

数值为平均值±标准差。不同大写字母表示不同植物种之间在  $P<0.05$  水平上差异显著,不同小写字母表示同种植物不同器官之间在  $P<0.05$  水平上差异显著。下同。

表 3 热值与灰分、碳和化学元素含量之间相关关系分析

Table 3 Pearson's correlation coefficients among caloric values, ash contents and concentrations of chemical elements

	热值	灰分	碳	氮	铝	钙	钾	镁	钠	磷	硫	硅
热值	1											
灰分	-0.603 **	1										
碳	0.532 *	-0.490 *	1									
氮	0.547 *	0.340	-0.023	1								
铝	-0.402	0.866 **	0.224	-0.401	1							
钙	-0.446	0.743 **	0.124	-0.392	0.503 *	1						
钾	-0.302	0.701 **	0.702 **	-0.102	0.336	0.299	1					
镁	-0.457 *	0.504 *	0.213	-0.637 **	0.323	0.403	0.344	1				
钠	-0.102	0.043	-0.201	0.186	-0.058	0.253	0.133	-0.219	1			
磷	0.273	-0.132	0.301	0.302	-0.103	-0.053	0.273	-0.223	0.701 **	1		
硫	0.160	0.550 *	0.900 **	-0.240	0.327	0.243	0.619 **	0.276	0.011	0.367	1	
硅	0.324	-0.201	0.282	0.364	-0.264	-0.463	0.232	-0.128	0.248	0.668 **	0.343	1

\*  $P<0.05$ , \*\*  $P<0.01$ 。



( $P < 0.05$ ), 与磷和硅之间相关性不显著。灰分与其他元素之间均呈现正相关关系, 其中与铝、钙和钾之间达到极显著 ( $P < 0.01$ ), 与镁、硫之间达到显著 ( $P < 0.05$ ); 其他元素之间相关性分析可以看出, 碳与钾、碳和硫、钾和硫、钠和磷、磷和硅之间表现为极显著的正相关关系 ( $P < 0.01$ ); 氮和镁之间表现为极显著负相关关系 ( $P < 0.01$ )。

### 3 讨 论

热值是能源植物评价和筛选过程中的重要参考标准之一。本文所测定的内蒙古浑善达克沙地小叶锦鸡儿、沙蒿、冷蒿、沙鞭等 14 种植物热值中除猪毛菜和木地肤低于世界陆地植物平均热值 ( $17.78 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (Lin *et al.*, 2008) 水平外, 其他 12 种植物热值均高于该值; 其中小叶锦鸡儿、木岩黄芪、冷蒿、沙蒿等 5 种植物热值高于中国海南热带植物平均热值 ( $19.46 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (Lin *et al.*, 2008); 而与当前占主导地位的生物质能源供给原材料相比 (柳枝稷:  $18.69 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 玉米秸秆:  $16.64 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 王草:  $17.68 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) (Liao *et al.*, 2004; 李高扬等, 2007) 所测 14 种植物热值均接近或高于各类能源植物供给料的热值。上述分析结果表明, 所测定的沙地植物在一定意义上具有成为生物质能源的潜力。

植物热值的高低在一定程度上反映了其光合作用固定日光能的多少, 是植物的重要属性之一, 具有一定稳定性。因此, 利用热值的相关概念研究植物对日光能、水分等自然资源利用情况比单一生物量的测定更为准确 (Jordan, 1971)。自 20 世纪 30 年代, 热值便是科研工作者关注的热点内容, 在研究过程中发现热值高低因植物种类、器官、生境条件、营养物质含量等因素具有一定关系 (任海等, 1999)。生境条件作为影响热值的主要因素之一, 本文测定的沙地 15 种植物平均热值为  $18.80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其他学者在对东北草甸植物热值测定过程中发现其平均热值为  $17.95 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (郭继勋等, 2001), 还有学者对内蒙古羊草草原主要优势种热值测定过程中发现平均热值为  $18.76 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  (高凯等, 2012), 通过上述结果对比进一步证实了环境因素对植物热值的影响。本研究通过对沙地 14 种植物热值比较得出, 小叶锦鸡儿热值最高, 菊科和禾本科次之, 杂类草热值最低, 该结果与在羊草草甸草原与羊草典型草原的研究结果相一致 (郭继勋等, 2001; 高凯等, 2012), 说明物种之间热值的差异主要由其自身的生态学特

性和遗传学特性所决定, 是植物对环境因素的一种适应能力的表现。在羊草草甸草原、羊草典型草原以及本研究中的沙地等 3 种生境条件下均以小叶锦鸡儿的热值最高, 其原因可能是热值高低与植物的木质化程度具有一定关系, 木质化程度高其植物体内含的 C 则比较高, 而 C 是植物体内主要参与燃烧的元素, 同时本项研究中除了小叶锦鸡儿热值较高外, 菊科植物的热值也高于禾本科及杂类草, 而菊科植物木质化程度明显高于禾本科和杂类草, 该结果也进一步说明了植物木质化程度高低对热值具有一定的影响。

灰分作为影响热值的主要内在因素也一直被研究者所关注。大量研究表明热值与灰分之间呈现负相关关系, 本研究也得出相同结论。其原因要从构成灰分的主要成分角度进行分析, 在灰分构成中主要是一些矿物质元素 (钙、镁等), 这些矿物质元素无法参与燃烧释放热量, 最终将反应到植物热值的高低。本研究在对热值与矿物质元素相关性分析中也可以证实这一点, 通过相关性分析看出热值与 C、N 等非矿主元素之间表现为正相关关系, 而与铝、钙、钾、镁等矿物质元素之间则表现为负相关关系。

### 4 结 论

14 种野生植物全株平均热值为  $18.80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 该值高于全世界陆生植物平均热值; 猪毛菜热值最低  $16.18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 小叶锦鸡儿热值最高  $20.23 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 沙鞭灰分含量最低 3.98%, 猪毛菜灰分含量最高 12.18%; 热值与灰分显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 热值和碳、氮含量之间存在极显著正相关关系 ( $P < 0.01$ ), 金属矿质元素与热值之间呈负相关关系, 非金属矿质元素与热值之间呈正相关关系, 但均不显著。

### 参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社.
- 鲍雅静, 李政海. 2003. 内蒙古羊草草原群落主要植物的热值动态. 生态学报, **23**(3): 606-613.
- 高 凯, 谢中兵, 徐苏铁, 等. 2012. 内蒙古锡林河流域羊草草原 15 种植物热值特征. 生态学报, **32**(2): 588-594.
- 郭继勋, 王若丹, 包国章. 2001. 东北羊草草原主要植物热值. 植物生态学报, **25**(6): 746-750.
- 李高扬, 李建龙, 王 艳, 等. 2007. 优良能源植物筛选及评价指标探讨. 可再生能源, **25**(6): 84-89.
- 龙世友, 鲍雅静, 李政海, 等. 2013. 内蒙古草原 67 种植物碳含量分析及与热值的关系研究. 草业学报, **22**(1):

- 112–119.
- 任海, 彭少麟. 1999. 鼎湖山森林生态系统演替过程中的能量生态特征. *生态学报*, **19**(6): 817–822.
- 杨福国, 何海菊. 1983. 高寒草甸地区常见植物热值的初步研究. *植物生态学报*, **7**(4): 280–288.
- 祖元刚, 祝廷成. 1987. 羊草种群的能量流动及其稳定性分析. *植物生态学报*, **29**(1): 95–103.
- Cassida KA, Muir JP, Hussey MA. 2005. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in south central US environments. *Crop Science*, **45**: 682–692.
- Laser M, Larson E, Dale B. 2009. Comparative analysis of efficiency, environmental impact, and process economics for mature biomass refining scenarios. *Biofuels Bioproducts & Biorefining*, **3**: 247–270.
- Lemenih M, Bekele T. 2004. Effect of age on caloric value and some mechanical properties of three *Eucalyptus* species grown in Ethiopia. *Biomass Bioenergy*, **27**: 223–232.
- Liao CP, Wu CZ, Yan YJ. 2004. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass Bioenergy*, **27**: 119–130.
- Long FL. 1934. Application of calorimetric methods to ecological research. *Plant Physiology*, **9**: 323–337.
- Lin H, Cao M. 2008. Plant energy storage strategy and caloric value. *Ecological Modelling*, **217**: 132–138.
- Jordan CF. 1971. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage. *Journal of Ecology*, **59**: 127–142.
- Miller PM, Eddleman LE, Kramer S. 1990. Allocation patterns of carbon and minerals in juvenile and small-adult *Juniperus occidentalis*. *Forest Science*, **36**: 734–747.
- Singh AK, Misra KN, Ambash RS. 1980. Energy dynamics in a savanna ecosystem in India. *Japanese Journal of Ecology*, **3**: 295–305.
- Thompson DN, Shaw PG, Lacey JA. 2003. Post-harvest processing methods for reduction of silica and alkali metals in wheat straw. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **105**: 205–218.
- 
- 作者简介 高凯, 男, 1979年生, 博士, 副教授。E-mail: gaokai555@126.com
- 责任编辑 王伟
-