

内蒙古锡林河流域羊草草原主要建群植物热值及灰分动态变化*

高 凯¹ 朱铁霞¹ 王其兵^{2**}

(¹ 内蒙古民族大学农学院, 内蒙古通辽 028043; ² 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘 要 草地植物作为生物燃料供给料已经被人们所提及, 而植物的热值和灰分含量作为评价生物燃料质量的重要指标, 却很少被人们研究。本文通过对内蒙古锡林河流域羊草草原 5 种多年生禾本科植物(羊草、冰草、大针茅、羽茅和隐子草)的热值和灰分进行测定, 探讨了植物热值和灰分的月变化及二者之间相关性。结果表明: 5 种植物干重热值及去灰分热值月变化均为单峰形变化曲线, 干重热值的最大值出现在 8 月($19.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), 去灰分热值最大值出现的月份因植物种类不同而表现一定的差异; 灰分含量的月变化趋势表现为先降低后升高; 冰草、大针茅和隐子草干重热值与灰分含量之间表现为极显著线性负相关($P < 0.01$), 羽茅干重热值与灰分之间表现为显著线性负相关($P < 0.05$), 而羊草干重热值与灰分含量之间的相关性不显著。

关键词 热值; 灰分; 相关性; 锡林河流域; 羊草草原

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)3-0557-04

Dynamic variations of caloric value and ash content of five dominant grass species in a *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin of Inner Mongolia. GAO Kai¹, ZHU Tie-xia¹, WANG Qi-bing^{2**} (¹ Department of Agronomy, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, Inner Mongolia, China; ² Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(3): 557–560.

Abstract: Grassland plants have been recognized as the feedstocks for biofuel production, but their caloric value and ash content, as the important indicators for assessing the quality of biofuels, are rarely documented. This paper measured the caloric value and ash content of five dominant grass species (*Leymus chinensis*, *Agropyron cristatum*, *Stipa baicalensis*, *Achnatherum sibiricum*, and *Cleistogenes squarrosa*) in a *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin of Inner Mongolia over a growth season, and approached the monthly variations of and the correlation between the caloric value and ash content. The dynamic variations of dry mass caloric value and ash-free caloric value of the five species followed a single peak pattern. The highest dry mass caloric value ($19.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) was observed in August, but the months the maximum ash-free caloric value was observed varied with the plant species. The monthly variations of the ash content of the plant species all showed a trend of decreasing in early growth season and increasing later. There was a significant negative linear correlation ($P < 0.05$) between the dry mass caloric value and ash content of the five plant species except *L. chinensis*.

Key words: caloric value; ash; correlation; Xilin River Basin; *Leymus chinensis* steppe.

关于热值的研究, 从 20 世纪 30 年代国外便有相关报告 (Long, 1934)。之后国外学者从生物个

体、种群和群落等不同组织水平对热值、群落热值等进行了大量研究 (Golley, 1961; Bliss, 1962; James & Smith, 1978; Singh *et al.*, 1980)。而国内关于热值的研究直到 20 世纪 70 年代才出现相关报告, 如对草甸常见植物热值的报道 (杨福囤和何海菊, 1983)。所谓热值是指单位质量干物质完全燃烧所释放的热

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KSCX2-YW-G-036, KSCX-YW-Z-1022) 资助。

** 通讯作者 E-mail: qwang@ibcas.ac.cn

收稿日期: 2011-08-16 接受日期: 2011-12-13

量,是评价绿色植物光合作用固定日光能的能力和评价植物营养价值高低的重要指标之一。同时,热值与植物干物质结合是评价生态系统初级生产力的重要内容,在生态系统的研究过程中热值是必不可少的参数之一(鲍雅静和李政海,2003)。

多年生禾本科植物作为内蒙古锡林河流域羊草草原主要建群植物(姜恕,1985),其具有植株高大、生长速度快、生物质产量高等特点(宁祖林等,2005),并且这类植物还具有总灰分含量低、含碳量高、粗蛋白含量高等优点(席庆国和刘玉新,2005)。在生产实践中,其既是家畜采食的主要牧草,同时还可以通过燃烧来生产热能和电能,也可以通过固化、汽化和液化等手段合成相应的生物能源(生物汽油、生物乙醇、生物柴油等)(解新明等,2008)。目前国内对这类禾草作为生物质能源的研究与开发工作相对较少,有关它们热值的动态研究也鲜见报道。本文通过对内蒙古羊草草原主要建群多年生禾本科植物的热值和灰分含量的动态变化进行了研究,从能源利用的角度认识它们的生物质特性,从而为天然羊草草原多年生禾本科植物作为生物质能源的开发和利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 自然概况

研究地点位于中国科学院内蒙古草原生态系统定位站(43°26'N—44°08'N, 116°04'E—117°05'E)羊草样地,该区海拔1200 m左右,属温带草原区典型草原栗钙土亚区。气候属中温带半干旱草原气候,冬季受蒙古高压控制,寒冷干燥,夏季受海洋性季风的一定影响,较为温和湿润。3—5月常有大风,月均风速达 $4.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。年均温 $0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,1月和7月平均气温分别为 $-21.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $18.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,无霜期91 d。草原植物生长期约150 d。多年平均降水量约350 mm,其中5—9月的降水量占年降水量的86%。

以羊草为主要建群种的羊草-大针茅草原群落,是本地区典型草原的主要群落类型之一。羊草群落的植物种86种(常见者45种),分属于28科,67属(姜恕,1985)。其中广旱生根茎禾草羊草(*Leymus chinensis*)外,大针茅(*Stipa grandis*)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum*)和冰草(*Agropyron cristatum*)等旱生密丛禾草构成群落的主体,占群落生物量的60%以上。

1.2 植物样品采集及测定方法

1.2.1 取样方法 在1979年围封至今的羊草样地内选取地形和植物群落组成一致的地段,于2010年6月1日、7月1日、8月1日、9月1日分别对群落的主要植物羊草、冰草、大针茅、羽茅、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)等5种多年生禾本科植物进行分物种取样,每种植物5次重复,任何两次重复之间的距离不低于30 m。

1.2.2 室内分析 将上述所采集的植物样品用 $70 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱烘干至恒重、粉碎。用美国PARR公司生产的PARR6300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 $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下灰化5 h后测定其灰分含量。

相关计算与数据统计方法

去灰分热值 = 干重热值 / (1 - 灰分含量)

数据分析采用SAS 8.0软件对数据进行单因素方差分析,对干重热值和灰分含量进行了线性拟合。

2 结果与分析

2.1 5种植物干重热值及月变化

内蒙古锡林河流域羊草草原5种主要建群禾本科植物(冰草、大针茅、羽茅、羊草和隐子草)热值从6—10月均表现出先增加后降低的变化趋势,并且8月均表现出较高的热值;冰草6—10月热值范围为 $17.59 \sim 19.05 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,各月热值顺序为8月>7月>9月>6月>10月,8月份冰草的热值要显著高于6、7、9、10月的热值,7、9月热值显著高于6、10月($P < 0.05$);大针茅热值范围为 $19.40 \sim 17.80 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,各月份热值顺序为8月>9月>10月>7月>6月,8、9、10月热值显著高于6、7月($P < 0.05$);羽茅6—10月热值范围为 $17.79 \sim 19.41 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,各月份热值顺序为9月>8月>10月>7月>6月,8、9月冰草的热值要显著高于6、7、10月,7、10月热值显著高于6月($P < 0.05$);羊草6—10月热值范围为 $18.30 \sim 19.48 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,各月份热值顺序为8月>9月>10月>7月>6月,8月的热值要显著高于6、7、9、10月的热值,7、9、10月热值显著高于6月($P < 0.05$);隐子草6—10月热值范围为 $16.93 \sim 18.92 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,各月热值顺序为9月>8月>10月>7月>6月,7、8、9、10月的热值要显著高于6月的热值($P < 0.05$),7、8、9、10月热值之间没有表现出显著差异(表1)。

表 1 5 种植物干重热值的动态变化 (MJ · kg⁻¹)
Table 1 Dynamic changes in caloric values of 5 plant species

植物名称	时间(年-月-日)				
	2011-6-1	2011-7-1	2011-8-1	2011-9-1	2011-10-1
冰草	17.69±0.13 c	18.64±0.11 b	19.05±0.16 a	18.36±0.20 b	17.59±0.07 c
大针茅	17.80±0.15 c	18.39±0.50 b	19.40±0.12 a	19.04±0.02 a	18.98±0.16 a
羽茅	17.79±0.05 c	18.52±0.12 b	19.40±0.12 a	19.41±0.01 a	18.68±0.30 b
羊草	18.30±0.08 b	18.36±0.12 b	19.48±0.15 a	19.01±0.35 b	18.71±0.12 b
糙隐子草	16.93±0.08 b	18.44±0.37 a	18.66±0.11 a	18.92±0.16 a	18.62±0.04 a

数值为平均值±标准差,同行字母表示不同月份之间在 0.05 水平下差异显著。

表 2 5 种植物灰分含量的动态变化 (%)
Table 2 Dynamic changes in ash contents of 5 plant species

植物名称	时间(年-月-日)				
	2011-6-1	2011-7-1	2011-8-1	2011-9-1	2011-10-1
冰草	7.20±0.52 a	6.34±0.88 b	4.80±0.45 c	3.99±0.16 d	5.89±0.32 b
大针茅	7.31±0.38 a	5.18±0.28 b	4.30 ±0.47 c	3.96±0.10 d	4.02±0.23 d
羽茅	6.11±0.18 a	5.95±0.12 b	5.43±0.11 b	4.16±0.13 c	4.06±0.62 c
羊草	7.78±0.60 a	6.67±0.13 b	5.47±0.20 c	4.20±0.10 d	4.06±0.09 d
糙隐子草	8.22±0.31 a	7.22±0.31 b	6.22±0.31 c	4.52±0.30 d	4.56±0.49 d

数值为平均值±标准差,同行字母表示不同月份之间在 0.05 水平下差异显著。

2.2 5 种植物灰分含量及月变化

由表 2 可知,内蒙古锡林河流域主要建群禾本科植物其灰分含量从 6—10 月均表现出降-升的变化趋势,6—9 月各种植物灰分含量呈现下降趋势,10 月只有冰草灰分含量表现为上升趋势,且 5 种多年生禾本科植物其 6 月灰分含量要显著高于 7、8、9、10 月 ($P<0.05$)。

2.3 主要建群植物干重热值与灰分相关性分析

对内蒙古锡林河流域羊草草原 5 种建群多年生禾本科植物干重热值与灰分含量进行相关性分析(表 3)。结果表明,冰草、大针茅和糙隐子草干重热值与灰分含量之间表现为极显著线性负相关 ($P<0.01$),羽茅干重热值与灰分之间表现为显著线性负相关 ($P<0.05$),而羊草干重热值与灰分含量之间的相关性不显著。

2.4 5 种植物去灰分热值及月变化

内蒙古锡林河流域羊草草原 5 种建群多年生禾本科植物去灰分热值的月动态并没有表现出一致的

变化规律。其中冰草、大针茅 9 月去灰分热值最高,羽茅 8 月最高,羊草和隐子草 7 月最高;冰草去灰分热值范围为 18.33 ~ 20.01 MJ · kg⁻¹,其中 10 月去灰分热值显著低于 6、7、8、9 月 ($P<0.05$),6、7、8、9 月之间没有表现出显著差异;大针茅去灰分热值范围为 19.20 ~ 20.27 MJ · kg⁻¹,其中 6、7 月去灰分热值显著低于 8、9、10 月 ($P<0.05$),6、7 月之间及 8、9、10 月之间没有表现出显著差异;羽茅去灰分热值

表 3 5 种植物干重热值与灰分含量的关系
Table 3 Relationships of gross caloric values and ash contents of 5 plant species

种类	方程	相关系数 (r)	样本数 (n)
冰草	$y = -0.109x + 19.14$	0.549 **	25
大针茅	$y = -0.105x + 19.56$	0.579 **	25
羽茅	$y = -0.090x + 19.48$	0.402 *	25
羊草	$y = -0.054x + 19.21$	0.261	25
糙隐子草	$y = -0.122x + 19.29$	0.528 **	25

y 为干重热值 (MJ · kg⁻¹), x 为灰分含量 (%); * 表示显著水平为 0.05, ** 表示显著水平为 0.01。

表 4 5 种植物去灰分热值的动态变化 (MJ · kg⁻¹)
Table 4 Dynamic changes in ash-free caloric values of 5 plant species

植物名称	时间(年-月-日)				
	2011-6-1	2011-7-1	2011-8-1	2011-9-1	2011-10-1
冰草	19.49±0.14 a	19.11±0.22 a	19.90±0.30 a	20.01±0.15 a	18.33±0.09 b
大针茅	19.20±0.12 b	19.39±0.49 b	19.84±0.07 a	20.27±0.13 a	19.76±0.18 a
羽茅	19.57±0.03 b	19.69±0.15 b	20.51±0.15 a	20.24±0.13 a	19.49±0.33 b
羊草	19.85±0.14 a	20.60±0.17 a	19.67±0.15 a	19.82±0.37 a	19.53±0.11 a
糙隐子草	18.44±0.09 b	20.11±0.18 a	19.67±0.39 a	19.83±0.24 a	19.50±0.07 a

数值为平均值±标准差,同行字母表示不同月份之间在 0.05 水平下差异显著。

范围为 $19.49 \sim 20.51 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 8、9 月去灰分热值显著高于 6、7、10 月 ($P < 0.05$), 6、7、10 月之间及 8、9 月之间没有表现出显著差异; 羊草去灰分热值范围为 $19.53 \sim 20.51 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 各月之间没有表现出显著的差异; 隐子草去灰分热值范围为 $18.44 \sim 20.11 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 6 月去灰分热值显著高于 7、8、9、10 月 ($P < 0.05$), 7、8、9、10 月之间没有表现出显著差异(表 4)。

3 讨论

植物热值受到植物物种、组织器官、养分含量、物候期等内在因素及日照时数、土壤类型、光强等外在因素的影响(祖元刚和祝廷成, 1987; 郭继勋等, 2001; 鲍雅静和李政海, 2003; 咎启杰等, 2003; 郭水良, 2005)。灰分作为植物干重热值的重要影响因素, 学者们对二者之间关系进行了大量研究, 有研究表明, 灰分含量每升高 1%, 其热值约降低 $0.2 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Cassida *et al.*, 2005)。本研究中, 灰分与热值之间也呈现为负相关关系, 其原因可能是灰分组成成分中以不能够参与燃烧的各种矿质元素(钙、镁等)(藏惠林, 1984), 这些成分在植物体内含量高低, 将直接影响到植物燃烧的放热量, 最终将以植物热值的高低来反映。

热值作为植物的重要属性, 具有一定的稳定性。同时在植物生长发育过程中由于其生活史对策的不同, 尤其是草本植物, 因其与木本植物相比, 个体较小, 具有强烈的季节变化特点, 随着生长季的起始和结束, 光合产物在地上与地下的储运也迅速完成, 在这一过程中, 植物热值也会表现出相对明显的季节变化(鲍雅静和李政海, 2003; 赫翠等, 2008)。在对热值动态变化研究过程中也进一步验证了这一个规律。如刘世荣等(1992)研究表明, 叶片热值在 6 月达到最大值, 之后逐渐减小, 到生长季末期降到最低值; 枝条热值在生长季中期变化平缓, 但在生长季末期出现略微增加的趋势; 郭继勋和王若丹(2000)研究发现, 植株最大值出现在 7 月中旬, 茎最大值出现在 5 月初。叶的热值变化从 5 月初—7 月中旬基本上呈上升趋势, 然后保持相对平稳。穗的热值变化从 6 月初—7 月中旬呈逐渐上升。本研究通过对内蒙古锡林河流域羊草草原主要建群禾本科植物热值动态变化研究发现, 热值的月变化均表现为先增加后降低的变化趋势, 并且各种植物干重热值最高值均出现在 8 月(隐子草出现在 9 月), 该结论也进一步表明植物热值的动态变化规律; 而干重热值月变化和去灰分热值月变化趋势并不一致, 其主要原因

为不同月份灰分含量之间存在一定的差异(表 2)。因此, 建议在对不同植物种类或不同生态环境下的同种植物的热值比较时, 应采用去灰分热值以消除灰分含量不同造成的影响; 同时本研究中的物种植物之间热值也存在一定差异, 其主要原因植物种类不同, 决定其具有不同的生态学特性和遗传学特性, 不同的生长发育节律和对外界光、水、肥等环境因素的利用能力, 植物间这些差别将导致其物质和能量积累能力的差异, 能量积累量的差异则通过植物热值大小关系来反映。

参考文献

- 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.
- 藏惠林. 1984. 植物灰分组成的主组元分析. 植物学通报, **2**(4): 31–34.
- 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.
- 郭继勋, 王若丹. 2000. 东北草原优势植物羊草热值和能量特征. 草业学报, **9**(4): 28–32.
- 郭水良, 黄华, 晁柯, 等. 2005. 金华市郊 10 种杂草的热值和灰分含量及其适应意义. 植物研究, **25**(4): 460–464.
- 赫翠, 李洪远, 姜超, 等. 2008. 北方半干旱区河流湿地优势植物的热值. 生态学杂志, **27**(12): 2094–2098.
- 姜恕. 1985. 中国科学院内蒙古草原生态系统定位站的建立和研究工作概述//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究(第 1 集). 北京: 科学出版社: 1–10.
- 解新明, 周峰, 赵燕慧, 等. 2008. 多年生能源禾草的产能和生态效益. 生态学报, **28**(5): 2329–2342.
- 刘世荣, 王文章, 王明启. 1992. 落叶松人工林生态系统净初级生产力形成过程中的能量特征. 植物生态学与地植物学学报, **16**(3): 209–219.
- 宁祖林, 陈慧娟, 王珠娜, 等. 2005. 几种高大禾草热值和灰分动态变化研究. 草业学报, **19**(2): 241–247.
- 席庆国, 刘玉新. 2005. 高大禾草加工技术概况. 草业科学, **22**(1): 32–33.
- 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.
- 咎启杰, 王伯荪, 王勇军. 2003. 深圳福田无瓣海桑-海桑林能量的研究. 应用生态学报, **14**(2): 170–174.
- 祖元刚, 祝廷成. 1987. 羊草种群的能量流动及其稳定性分析. 植物学报, **29**(1): 95–103.
- Bliss LC. 1962. Caloric and lipid content in alpine tundra plants. *Ecology*, **43**: 753–757.
- Cassida KA, Muir JP, Hussey MA. 2005. Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in south central US environments. *Crop Science*, **45**: 682–692.
- Golley FG. 1961. Energy values of ecological materials. *Ecology*, **42**: 581–584.
- James TD, Smith DW. 1978. Seasonal changes in the caloric values of the leaves and twigs of *Populus tremuloides*. *Canadian Journal of Botany*, **56**: 1804–1805.
- Long FL. 1934. Application of calorimetric methods to ecological research. *Plant Physiology*, **9**: 323–337.
- Singh AK, Misra KN, Ambash RS. 1980. Energy dynamics in a savanna ecosystem in India. *Japanese Journal of Ecology*, **30**: 295–305.

作者简介 高凯, 男, 1979 年生, 副教授, 主要从事草地资源与利用方面的研究. E-mail: gaokai555@126.com

责任编辑 刘丽娟