

氮肥对菊芋生物量、热值和灰分含量的影响

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: 探讨氮肥对菊芋生物量、热值和灰分含量的影响, 为菊芋氮肥管理提供理论参考。于2010年在内蒙古锡林河流域利用弃耕地进行菊芋种植, 设置0、2.5、5、7.5、10 g/m² 5个施氮水平, 对不同施氮水平条件下菊芋的生物量、热值和灰分进行测定。结果表明, 氮肥施入能够提高菊芋生物量、能量积累量和热值, 最佳施氮量5~7.5 g/m²; 各器官热值顺序为根系>茎秆>块茎>叶片; 能量积累量顺序为块茎>茎秆>叶片>根系; 灰分含量顺序为叶片>茎秆>根系>块茎。

关键词: 菊芋; 热值; 能量; 灰分; 氮肥

中图分类号: S566.9.062

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2012)02-0512-06

Effects of nitrogen fertilization on biomass, caloric value and ash content of *Helianthus tuberosus* L.

GAO Kai¹, ZHU Tie-xia¹, WANG Qi-bing^{2*}

(1 Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028043, China;

2 Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: In this paper, the effects of nitrogen fertilization on biomass, caloric value and ash content of *Helianthus tuberosus* L. was studied. The experiment was carried out in the abandoned land in Xilin River Basin of Inner Mongolia in 2010 with 5 nitrogen treatments, 0, 2.5, 5, 7.5 and 10 g/m². The caloric values, ash contents and dry biomass of leaves, stems, tubers and roots were measured after the harvest. The results show the biomass, energy accumulation amount and caloric value are improved by the use of nitrogen fertilizer, and the best N treatment is 5~7.5 g/m². The caloric values are in order of root > stem > tuber > leaf, the energy accumulation amounts are tuber > stem > leaf > root, and the ash contents are leaf > stem > root > tuber.

Key words: *Helianthus tuberosus* L.; caloric value; energy; ash; nitrogen fertilizer

发展生物质资源是开发利用可再生能源和减少经济发展过程对化石燃料依赖的重要途径^[1-2], 但须避免“与人争粮”和“与粮争地”的矛盾。因此某些生态适应性强、能够在较差环境下规模化种植的作物成为生物质能源供给料的首选。菊芋(*Helianthus tuberosus* L.) 又名洋姜、鬼子姜, 菊科向日葵属, 多年生草本植物。茎秆中纤维素含量高, 块茎中含丰富的菊糖、果糖及低聚糖, 是生产糖和生物乙醇的上等原料^[3-5]。菊芋对生境要求低, 具有喜肥耐贫瘠、喜湿耐旱、喜温耐寒、耐盐碱等优点^[6-7]。

在我国自然环境较差, 无法进行农作物生产的地区具有一定栽培优势。

菊芋作为一种比较耐贫瘠的植物^[8], 在其种植过程中肥料管理比较粗放。然而氮肥仍是获得高产优质菊芋产品的前提保障。已有研究表明氮肥施入能够有效地提高菊芋生物量, 同时氮肥过量也将导致茎、叶徒长从而影响到地下块茎的产量^[8-12]; 还有学者通过对海水灌溉条件下进行氮、磷、钾等肥料的施加发现, 肥料不但能够提高海水的利用效率和减轻海水中盐分对菊芋的伤害, 而且能够提高菊

收稿日期: 2011-08-15 接受日期: 2011-12-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KSCX2-YW-G-036); 内蒙古民族大学创新团队项目(2008BAD95B03)资助。

作者简介: 高凯(1979—), 男, 吉林农安人, 博士, 主要从事草地资源与利用研究。E-mail: gaokai555@126.com

* 通讯作者 E-mail: qwang@ibcas.ac.cn

芋的产量和品质^[13-16]。在生物质能源供给料选择和品质评价过程中,灰分和热值也是重要的考核指标。其中灰分含量对原材料产热量具有重要影响,已有研究表明,灰分含量每升高 1%,其热值约降低 0.2 MJ/kg^[17]。由生物质原材料到生物燃料(生物乙醇或生物柴油)的转化过程中,需要经过一系列的热化学反应。而灰分所含的矿质元素,尤其是碱金属在高温燃烧情况下,会产生大量的废渣及大量的腐蚀性物质,导致生物能源物质转化率下降,其中的大量腐蚀性物质会对转化设备造成破坏,从而增加转化成本^[18-21]。

当前菊芋研究主要集中在产量、菊糖含量、茎叶的饲用价值及菊粉、乙醇生产工艺等方面^[22-24]。而对菊芋能用潜力的研究相对较少,因此通过对菊芋生物量、热值、能量积累及灰分含量等指标的测定对其能用潜力和品质特性进行研究是非常必要的,并通过不同施肥水平的设置,为锡林河流域菊芋栽培管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本项研究地点位于内蒙古锡林郭勒盟白音锡勒牧场境内。年均温为 0.6 °C,无霜期 91d 左右,多年平均降水量约为 350 mm,其中 5~9 月份的降水量占年降水量的 86%。菊芋种植地为弃耕地。于 2004 年进行翻耕,之后一直闲置。本项目于 2010 年开始,当年 5 月份对菊芋种植地进行翻耕平整,翻耕深度为 50 cm。种植前测定土壤全氮含量为 1.14g/kg;土壤有机质含量 20.4 g/kg;pH 值为 6.97。

1.2 试验设计

试验材料为 2010 年 5 月种植的菊芋,品种为神菊 2 号(由大连神菊菊芋生态有限公司提供),该品种属于白皮菊芋系列。菊芋采用平畦播种,株距 30 cm,行距 40 cm,播种深度 15 cm。选取重量为 30~40 g,无病、无伤的块茎作种。氮肥处理设 0、2.5、5、7.5、10 g/m² 5 个水平,分别以 N0、N2.5、N5、N7.5、N10 表示。施肥选择在苗期和现蕾期两个时期进行,每次施肥量为总施肥量的 50%。每个处理 5 个重复,小区面积 10 m × 10 m,随机排列,小区间距离 1.5 m。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生物量的测定 2010 年 9 月 30 日以菊芋单

株为取样对象,在每个小区内随机选取 10 株,首先齐地面取每株的地上生物量,将茎、叶分离。同时进行每株地下根系和块茎的取样,根据每株根系实际情况挖坑,尽量取到完整的根系,并将根系和块茎分离,用清水洗净。在烘干过程中将菊芋的叶片、茎秆、块茎和根系分别烘干,称取其干重,粉碎后带回实验室进行热值测定。

1.3.2 热值、灰分测定 测定热值之前,先将粉碎的样品放在 80 °C 烘箱内烘 2 h,之后用美国 PARR 公司生产的 PARR6300 型氧弹式热量计分别测定根系、茎秆、叶片和块茎的热值。灰分含量的测定用于灰化法,即将样品在马福炉 550 °C 下灰化 5 h 后测定其灰分含量。

1.4 相关计算与数据处理

各器官能量积累量均以菊芋单株为单位 (MJ/plant) 进行计算:

根系能量积累量 = 根系热值 × 根系生物量

块茎能量积累量 = 块茎热值 × 块茎生物量

茎秆能量积累量 = 茎秆热值 × 茎秆生物量

叶片能量积累量 = 叶片热值 × 叶片生物量

全株能量积累量 = 根系 + 块茎 + 茎秆 + 叶片 (能量积累量)

全株热值 (MJ/kg) = 全株能量积累量 / 全株生物量

全株灰分含量 (%) = [(根系灰分 × 根系生物量) + (块茎灰分 × 块茎生物量) + (茎秆灰分 × 茎秆生物量) + (叶片灰分 × 叶片生物量)] / 全株生物量 × 100

试验数据用 Excel 和 SAS 统计软件进行整理和统计分析,采用 *t*-test 比较不同处理间各参数的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 氮肥处理对菊芋生物量积累的影响

由表 1 可知,菊芋根系、茎秆、块茎和叶片生物量在不同氮肥处理条件下表现出一致的大小关系,其中块茎生物量最高,根系生物量最低;不同氮肥处理条件下,除根系外 N5 条件下菊芋单株总生物量及茎秆、叶片和块茎生物量均显著高于其他处理条件 ($P < 0.05$),而 5 种处理水平之间生物量的高低顺序因组织器官的不同而表现出一定的差异。

表 1 氮肥处理对菊芋各器官和单株生物量的影响 (g/plant)

Table 1 The effect of nitrogen fertilization on biomass of different organs of *Helianthus tuberosus* L.

| 处理 Treatment | 根系 Root | 茎秆 Stem | 块茎 Tuber | 叶片 Leaf | 全株 Total plant |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| N0 | 26.83 ± 6.29 c | 29.65 ± 4.63 e | 54.81 ± 3.56 b | 35.26 ± 6.37 c | 146.56 ± 22.36 c |
| N2.5 | 29.04 ± 4.16 b | 46.07 ± 6.30 c | 48.60 ± 4.05 b | 38.29 ± 4.84 c | 162.00 ± 10.13 c |
| N5 | 44.44 ± 6.26 a | 72.19 ± 7.59 a | 78.26 ± 4.14 a | 69.67 ± 7.98 a | 264.55 ± 17.42 a |
| N7.5 | 41.19 ± 5.93 a | 51.64 ± 8.06 b | 53.67 ± 4.05 b | 54.10 ± 9.12 b | 200.59 ± 15.69 b |
| N10 | 29.70 ± 2.72 a | 34.19 ± 5.62 d | 45.83 ± 7.31 b | 38.96 ± 6.47 c | 148.68 ± 8.25 c |

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant among treatment at the 5% level.

2.2 氮肥处理对热值的影响

表 2 显示,在同一氮肥处理条件下,菊芋根系、茎秆、叶片和块茎热值基本表现出一致的大小关系,即,根系 > 茎秆 > 块茎 > 叶片。其中在 N7.5 和 N10 两个处理下,根系、茎秆、块茎和叶片热值均表现出显著差异 ($P < 0.05$); N0 和 N2.5 处理下,根系和茎秆的热值显著高于块茎和叶片,块茎的热值显著高于叶片 ($P < 0.05$); 在 N5 处理条件下,根系和

茎秆热值差异不显著,但均高于块茎和叶片,而块茎又显著高于叶片 ($P < 0.05$); 不同氮肥处理相比较,根系、块茎和全株的热值没有表现出显著差异; 茎秆热值在 N0 和 N5 处理条件下显著高于 N2.5、N7.5 和 N10, N2.5 显著高于 N7.5 和 N10 处理, N7.5 和 N10 处理之间差异不显著 ($P < 0.05$); 叶片热值除 N2.5 处理显著低于 N0、N5、N7.5 和 N10 外,其它 4 个处理间没有显著差异 ($P < 0.05$)。

表 2 氮肥处理对菊芋各器官热值的影响 (MJ/kg)

Table 2 The effect of nitrogen fertilization on caloric values of different organs of *Helianthus tuberosus* L.

| 处理 Treatment | 根系 Root | 茎秆 Stem | 块茎 Tuber | 叶片 Leaf | 全株 Total plant |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|
| N0 | 16.95 ± 0.08 Aa | 16.99 ± 0.07 Aa | 16.36 ± 0.04 Ab | 15.78 ± 0.04 Ac | 16.51 ± 0.11 A |
| N2.5 | 16.93 ± 0.23 Aa | 16.75 ± 0.09 Bb | 16.37 ± 0.06 Ab | 15.53 ± 0.32 Bc | 16.55 ± 0.07 A |
| N5 | 17.01 ± 0.16 Aa | 16.94 ± 0.09 Aa | 16.40 ± 0.07 Ab | 15.85 ± 0.08 Ac | 16.54 ± 0.10 A |
| N7.5 | 17.05 ± 0.11 Aa | 16.62 ± 0.01 Cb | 16.43 ± 0.01 Ac | 15.93 ± 0.09 Ad | 16.43 ± 0.02 A |
| N10 | 16.86 ± 0.08 Aa | 16.62 ± 0.02 Cb | 16.31 ± 0.05 Ac | 15.93 ± 0.04 Ad | 16.39 ± 0.03 A |

注 (Note): 不同大写字母表示不同氮处理间在 0.05 水平差异显著,不同小写字母表示不同器官之间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different capital letters are significant among different N treatments at the 5% level, and by different small letters are significant among different organs at the 5% level.

2.3 氮肥处理对根、茎、叶及块茎能量积累的影响

从表 3 可以看出,全株和茎秆能量积累量在 N5 和 N7.5 处理下显著高于 N0、N2.5 和 N10,而 N5 和 N7.5 之间, N0、N2.5 和 N10 之间没有显著差异 ($P < 0.05$); 根系能量积累量 N7.5 处理显著高于 N0、N2.5、N5 和 N10,但后四者之间没有显著差异 ($P < 0.05$); N5 处理的叶片能量积累量显著高于其他 4 个处理,后四者之间也没有明显差异 ($P < 0.05$); 块茎能量积累量 N5 显著高其他 4 个处理, N7.5 又显著高于 N0、N2.5 和 N10,而后 3 者之间没有显著差

异 ($P < 0.05$)。同一氮肥处理条件下,菊芋根系、茎秆、块茎和叶片的能量积累量基本表现出一致的大小关系,其顺序为块茎 > 茎秆 > 叶片 > 根系; 其中 N0、N5 和 N7.5 块茎能量积累量显著高于茎秆、根系和叶片 ($P < 0.05$), N0 处理条件下根系、茎秆和叶片之间的能量积累量没有显著差异, N5 和 N7.5 两个处理条件下茎秆能量积累量显著高于根系和叶片 ($P < 0.05$), 根系和叶片之间没有显著差异; N2.5 和 N10 茎秆和块茎能量积累量显著高于根系和叶片,茎秆和块茎及根系和叶片之间差异不显著。

表 3 氮肥处理对菊芋各器官能量积累量的影响 (MJ/plant)

Table 3 The effect of nitrogen fertilization on energy accumulation amounts of different organs of *Helianthus tuberosus* L.

| 处理 Treatment | 根系 Root | 茎秆 Stem | 块茎 Tuber | 叶片 Leaf | 全株 Total plant |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| N0 | 0.51 ± 0.07 Bb | 0.59 ± 0.08 Bb | 0.82 ± 0.08 Ca | 0.56 ± 0.09 Bb | 2.48 ± 0.14 B |
| N2.5 | 0.62 ± 0.09 Bb | 0.77 ± 0.05 Ba | 0.92 ± 0.14 Ca | 0.64 ± 0.04 Bb | 2.95 ± 0.15 B |
| N5 | 0.64 ± 0.20 Bc | 0.95 ± 0.21 Ab | 1.16 ± 0.17 Aa | 0.79 ± 0.07 Ac | 3.53 ± 0.57 A |
| N7.5 | 0.73 ± 0.04 Ac | 0.89 ± 0.08 Ab | 1.05 ± 0.12 Ba | 0.66 ± 0.14 Bc | 3.33 ± 0.28 A |
| N10 | 0.50 ± 0.04 Bb | 0.62 ± 0.10 Ba | 0.75 ± 0.12 Ca | 0.57 ± 0.10 Bb | 2.43 ± 0.30 B |

注 (Note): 不同大写字母表示不同氮处理间在 0.05 水平差异显著, 不同小写字母表示不同器官之间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different capital letters are significant among different treatments at the 5% level, and by different small letters are significant among different organs at the 5% level.

2.4 氮肥处理菊芋灰分含量的影响

不同处理之间相比, 根系、块茎和叶片的灰分含量没有差异 (表 4), 茎秆灰分含量 N5 处理显著高于其他各处理, N7.5 和 N10 显著高于 N0 和 N2.5, N7.5 和 N10 及 N0 和 N2.5 之间没有显著差异 ($P > 0.05$); 全株灰分含量 N5 和 N7.5 显著高于 N0、N2.5 和 N10, N5 和 N7.5 及 N0、N2.5 和 N10 没有显著差异 ($P > 0.05$); 同一氮肥处理条件下, 器官之

间的灰分含量表现出相近的变化趋势, 其顺序为叶片 > 茎秆 > 根系 > 块茎, 叶片灰分含量最高, 其显著高于根系、茎秆和块茎 ($P < 0.05$), N0 和 N2.5 两个处理条件下, 根系、茎秆和块茎灰分含量之间没有表现出显著差异, N5 和 N7.5 处理茎秆的灰分含量要显著高于根系和块茎, 而块茎和根系之间没有表现出显著差异, N10 处理条件下根系、块茎、叶片和茎秆 4 者之间均表现出显著差异 ($P < 0.05$)。

表 4 氮肥处理对菊芋各器官灰分含量的影响 (%)

Table 4 The effect of nitrogen fertilization on ash content of different organs of *Helianthus tuberosus* L.

| 处理 Treatment | 根系 Root | 茎秆 Stem | 块茎 Tuber | 叶片 Leaf | 全株 Total plant |
|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|
| N0 | 6.26 ± 0.41 Ab | 9.90 ± 0.99 Cb | 5.77 ± 0.20 Ab | 19.65 ± 0.87 Aa | 10.04 ± 0.91 B |
| N2.5 | 6.24 ± 0.36 Ab | 7.64 ± 0.56 Cb | 6.13 ± 0.11 Ab | 18.86 ± 0.29 Aa | 9.59 ± 0.72 B |
| N5 | 6.81 ± 0.37 Ac | 13.29 ± 0.12 Ab | 5.78 ± 0.49 Ac | 20.45 ± 0.14 Aa | 11.87 ± 0.92 A |
| N7.5 | 6.60 ± 0.22 Ac | 10.96 ± 0.94 Bb | 6.03 ± 0.11 Ac | 19.69 ± 0.26 Aa | 11.1 ± 0.98 A |
| N10 | 6.47 ± 0.27 Ad | 10.63 ± 0.55 Bb | 6.11 ± 0.03 Ac | 18.40 ± 0.53 Aa | 10.44 ± 0.73 B |

注 (Note): 不同大写字母表示不同氮处理间在 0.05 水平差异显著, 不同小写字母表示不同器官之间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different capital letters are significant among different N treatments at the 5% level, and by different small letters are significant among different organs at the 5% level.

3 讨论

3.1 氮肥对生物量的影响

在菊芋肥料的研究过程中, 大量结果表明施加氮肥、磷肥和钾肥均能够有效地促进菊芋地上和地下干物质积累, 并且肥料配合施用效果更好, 同时在氮肥施用时要注意用量, 如氮肥过量将会导致地上植株徒长, 块茎产量下降^[8-12]; 同时在沿海地区海水

灌溉条件下, 施氮也能够有效地提高和改善菊芋的产量和品质^[13-15]。本研究在不同氮素水平下, 对其根、茎、叶和块茎的生物量进行测定, 结果表明, 施氮肥能够提高菊芋各器官生物量的积累, 但二者之间并不是呈现正相关关系, 而是生物量积累随着施氮量的增加表现为先增加后降低的变化趋势, 并且在 5 ~ 7.5 g/m² 之间达到最高值。表明在菊芋氮肥管理过程中应该适量施用, 才能够获得较高的

产量。

3.2 氮肥对热值、能量积累量和灰分的影响

热值作为植物的重要属性,既具相对的稳定性,同时也受很多因素的影响。如植物种类、器官、生境条件、气候条件、植物物候变化、生存空间等外在因素及植物组成物质成分、灰分、矿质元素含量等内在因素对植物热值均具有不同程度的影响^[25]。本文通过对不同施肥处理下菊芋根、茎、叶和块茎热值的比较发现,各器官热值的大小顺序基本为根系>茎秆>块茎>叶片,该结果与前人研究结论并不完全一致。前人研究认为,能量流动过程是导致各器官热值高低的主要原因,并且得出叶>枝>干>根的顺序^[26-27]。而本文研究中根系的热值最高,叶片热值最低。其可能的原因是菊芋生长发育规律所致,因取样阶段属于菊芋块茎膨胀期,营养物质由茎、叶向根系及块茎运输,促使其地下营养物质大量积累,尤其是糖分的积累,从而导致菊芋根系、块茎热值高于茎秆和叶片热值^[28-29]。施氮肥是提高植物物质和能量贮备的重要措施之一,已有研究表明,施氮肥能显著提高水稻、五节芒各组织器官的热值^[30-31],本文通过对不同氮肥处理条件下根、茎、叶、块茎及全株热值和能量积累量的比较也得出同样的结论。其原因主要是施氮能够提高植物光合能力,促进植物体内有机物质的积累,提高植物体内碳素含量,碳素是主要燃烧对象,这可能是热值提高的主要原因。同样随着光合作用的提高,其物质积累量必然上升,在热值和生物量均增加的前提下,会导致能量积累量的提高。

灰分是作为植物能用价值和饲用价值评价过程中的重要参考指标,也是进行能用潜力研究过程中的重要内容。其中灰分与热值之间的关系更是热值研究过程中的重要内容。已有研究表明灰分和植物热值之间存在负相关关系^[32-33],还有研究表明灰分含量每升高1%其热值约降低0.2 MJ/kg^[18]。在本项研究也可以得出相同的变化规律,从表2和表4中不难发现热值高的部位其对应灰分含量则比较低。尤其是叶片和块茎更为明显。通过对菊芋各部位(根、茎、叶、块茎)灰分的比较可以发现,叶片的灰分含量始终处于较高,其主要原因是叶片为植物的生命活动旺盛部位,其中的各种矿质元素丰富,而灰分就是植物体中无法燃烧的那部分物质的总和。同时其他学者关于灰分在植物内各部位分布情况的研究过程中,也发现在植物各个组成部分中叶片的灰分含量始终处于较高水平。

4 结论

氮肥能够有效地提高菊芋个体生物量及能量积累量,且在施氮量为5~7.5 g/m²时效果最佳;氮肥能够提高菊芋根、茎、叶、块茎及全株的热值;各器官热值的大小为根系>茎秆>块茎>叶片,能量积累量的大小为块茎>茎秆>叶片>根系,灰分含量的大小顺序为叶片>茎秆>根系>块茎。

参考文献:

- [1] 石元春. 发展生物质产业[J]. 发明与创新, 2005, (5): 4-6.
Shi Y C. Developing the biomass industrials [J]. Invent. Innovation, 2005, (5): 4-6.
- [2] Hoogwijk M, Faaij A, Broek R *et al.* Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy[J]. Biomass Bioenergy, 2003, 25(2): 119-133.
- [3] Underkofler L A, McPherson W K. Alcoholic fermentation of Jerusalem artichoke[J]. Int. Eng. Chem., 1937, 29(10): 1160-1164.
- [4] Maria D C, Pedro A, Marina S *et al.* Clone precocity and the use of *Helianthus tuberosus* L. stems for bioethanol[J]. Ind. Crops Prod., 2006, 24: 314-320.
- [5] Chabbert N, Braun Ph, Guirand J P *et al.* Productivity and fermentability of Jerusalem artichoke according to harvesting date [J]. Biomass, 1983, 3(3): 209-224.
- [6] 马玉明, 龙锋. 我国东部沙地菊芋生长的调查研究[J]. 中国草地, 2001, 23(6): 42-44.
Ma Y M, Long F. Investigation on *Helianthus tuberosus* L. growing in sandy land of the eastern China[J]. Grassl. China, 2001, 23(6): 42-44.
- [7] 孔涛, 吴祥云, 刘玲玲, 闫晗. 风沙地菊芋的主要生态学特性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1763-1766.
Kong T, Wu X Y, Liu L L, Yan H. Main ecological characteristics of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) in aeolian sandy land[J]. Chin. J. Ecol., 2009, 28(9): 1763-1766.
- [8] Soja G, Dersch G, Praznik W. Harvest dates, fertilizer and varietal effects on yield, concentration and molecular distribution of fructan in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) [J]. J. Agron. Crop Sci., 1990, 165: 181-189.
- [9] Denoroy P. The crop physiology of *Helianthus tuberosus* L.: A model oriented view[J]. Biomass Bioenergy, 1996, 11(1): 11-32.
- [10] Soja G, Haunold E. Leaf gas exchange and tuber yield in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus*) cultivars[J]. Field Crops Res., 1991, 26(3-4): 241-252.
- [11] 赵秀芳, 杨劲松, 蔡彦明, 等. 苏北滩涂区施肥对菊芋生长和土壤氮素累积的影响[J]. 农业环境学报, 2003, 29(3): 521-526.
Zhao X F, Yang J S, Cai Y M *et al.* Effects of fertilization on the growth of Jerusalem artichoke and soil nitrogen accumulation in the coastal area of north jiangsu province[J]. J. Agro-Environ.

- Sci. , 2003, 29(3) : 521-526.
- [12] 钟启文, 刘素英, 王丽慧, 等. 菊芋氮、磷、钾吸收积累与分配特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4) : 948-952.
Zhong Q W, Liu S Y, Wang L H *et al.* Absorption, accumulation and allocation of nitrogen, phosphorus and potassium of Jerusalem artichoke[J]. Plant Nutr. Fert. Sci. , 2009, 15(4) : 948-952.
- [13] 隆小华, 刘兆普, 陈铭达, 等. 半干旱区海涂海水灌溉菊芋氮肥效应的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 30(2) : 114-119.
Long X H, Liu Z P, Chen M D *et al.* Study of nitrogen fertilizer effect with seawater irrigation on *Helianthus tuberosus* in sea-beach of semi-arid region[J]. J. Soil Water Conserv. , 2005, 30(2) : 114-119.
- [14] 隆小华, 刘兆普, 陈铭达, 等. 半干旱地区海涂海水灌溉菊芋盐肥耦合效应的研究[J]. 土壤学报, 2005, 42(1) : 91-97.
Long X H, Liu Z P, Chen M D *et al.* Coupling effect of salt and fertilizer application on *Helianthus tuberosus* irrigated with seawater in semiarid region[J]. Acta Pedol. Sin. , 2005, 42(1) : 91-97.
- [15] 隆小华, 刘兆普, 徐文君. 海水处理下菊芋幼苗生理生化特性及磷效应的研究[J]. 植物生态学报, 2006, 30(2) : 307-310.
Long X H, Liu Z P, Xu W J. Effects of seawater treatments on the physiological and biochemical characteristic of *Helianthus tuberosus* seedlings and response to phosphorus supply[J]. J. Plant Ecol. , 2006, 30(2) : 307-310.
- [16] 黄增荣, 隆小华, 李洪燕, 等. 江苏北部滨海盐土盐肥耦合对菊芋生长和产量的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(4) : 709-715.
Huang Z R, Long X H, Li H Y *et al.* Coupling effect of salt and fertilizer application on *Helianthus tuberosus* in soils of North Jiangsu coastal mudflat different in salt concentration[J]. Acta Pedol. Sin. , 2010, 47(4) : 709-715.
- [17] 鲍雅静, 李政海. 内蒙古羊草草原群落主要植物的热值动态[J]. 生态学报, 2003, 23(3) : 606-613.
Bao Y J, Li Z H. Dynamics of caloric values of major plant species in *Leymus chinensis* steppe of Inner Mongolia[J]. Acta Ecol. Sin. , 2003, 23(3) : 606-613.
- [18] Cassida K A, Muir J P, Hussey M A *et al.* Biofuel component concentrations and yields of switchgrass in south central U. S. environments[J]. Crop Sci. , 2005, 45(2) : 682-692.
- [19] Obernberger I, Biedermann F, Widmann W, Riedl R. Concentrations of inorganic elements in biomass fuels and recovery in the different ash fractions[J]. Biomass Bioenergy, 1997, 12(3) : 211-224.
- [20] Stone K C, Hunt P G, Cantrell K B, Ro K S. The potential impacts of biomass feedstock production on water resource availability[J]. Bioresour. Technol. , 2010, 101(6) : 2014-2025.
- [21] Laser M, Larson E, Dale B *et al.* Comparative analysis of efficiency, environmental impact, and process economics for mature biomass refining scenarios[J]. Biofuels Bioprod. Biorefining, 2009, 3(2) : 247-270.
- [22] 邓云波, 孙志良, 葛冰, 谭运华. 一种新型饲料添加剂—菊糖[J]. 湖南畜牧兽医, 2005, (6) : 29-30.
Deng Y B, Sun Z L, Ge B, Tan Y H. A new type feed additive: Inulin[J]. Hunan J. Animal Sci. Veterinary Med. , 2005, (6) : 29-30.
- [23] Sanchez O J, Cardona C A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks[J]. Biore-sour. Technol. , 2008, 99(13) : 5270-5295.
- [24] Zubr J, Pedersen H S. Characteristics of growth and development of different Jerusalem artichoke cultivars Inulin and inulin containing crops[J]. Stud. Plant Sci. , 1993, (3) : 11-19.
- [25] 任海, 彭少麟. 鼎湖山森林生态系统演替过程中的能量生态特征[J]. 生态学报, 1999, 19(6) : 817-822.
Ren H, Peng S L. The characteristics of ecological energetics of the forest ecosystem in the successional process in Dinghushan, Guangdong, China[J]. Acta Ecol. Sin. , 1999, 19(6) : 817-822.
- [26] 陈灵芝, 黄建辉. 暖温带生态系统结构与功能的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1997. 163-172.
Chen L Z, Huang J H. The study of structure and function of warm-temperate ecosystem[M]. Beijing: Science Press, 1997. 163-172.
- [27] 郭继勋, 王若丹, 包国章. 东北羊草草原主要植物热值[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6) : 746-750.
Guo J X, Wang R D, Bao G Z. Caloric value of northeast aneu-rolepidium Chinense grassland species [J]. Acta Phytoecol. Sin. , 2001, 25(6) : 746-750.
- [28] Denoroy P. The crop physiology of *Helianthus tuberosus* L. : A model oriented view[J]. Biomass Bioenergy, 1996, 11(1) : 11-32.
- [29] Thompson D N, Shaw P G, Lacey J A. Post-harvest processing methods for reduction of silica and alkali metals in wheat straw [J]. Appl. Biochem. Biotechnol. , 2003, 105(1-3) : 205-218.
- [30] 陈慧娟, 张卓文, 宁祖林, 等. 施肥对五节芒热值和表型性状的影响[J]. 草业科学, 2009, 26(8) : 63-67.
Chen H J, Zhang Z W, Ning Z L *et al.* Effect of fertilization on the caloric value and morphological properties of *Miscanthus floridulus*[J]. Pratac. Sci. , 2009, 26(8) : 63-67.
- [31] 杨京平, Wekesa Boniface, 姜宁, 陈杰. 不同氮素水平下气象因子对两种水稻热值影响的分析[J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3) : 233-236.
Yang J P, Wekesa B, Jiang N, Chen J. Analysis of climatic factor effects on the caloric value of two rice varieties under different nitrogen levels[J]. Chin. J. Rice Sci. , 2001, 15(3) : 233-236.
- [32] Williams K, Percival F, Merino J. Estimation of tissue construction cost from heat of combustion and organic nitrogen content[J]. Plant Cell Environ. , 1987, 10(9) : 725-734.
- [33] 杨福国, 何海菊. 高寒草甸地区常见植物热值的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7(4) : 280-288.
Yang F T, He H J. A preliminary study on caloric of common plants in alpine meadow[J]. Acta Phytoecol. Geobot. Sin. , 1983, 7(4) : 280-288.