

北京地区 14 份柳枝稷生物量及分配差异研究

赵春桥^{1,2}, 范希峰², 侯新村², 朱毅², 岳跃森², 胡跃高¹, 武菊英²

(¹ 中国农业大学农学与生物技术学院, 北京 100193;

² 北京市农林科学院草业与环境研究发展中心/农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

摘要: 采用 14 份柳枝稷开展盆栽试验, 研究了在北京地区条件下其生物量差异及分配规律。结果表明, 低地型柳枝稷 Kanlow 生物量最高, 其茎秆、地上部和整株生物量分别达到 175.48 g/株、299.18 g/株和 447.66 g/株, 而高地型柳枝稷 Nebraska 生物量最低, 其茎秆、地上部和整株生物量分别为 29.86 g/株、58.08 g/株和 140.51 g/株。就柳枝稷整株植株而言, Kanlow 地上部生物量分配比例最高, 达到 63.13%, S2 最低, 为 40.55%, Kanlow 地上部营养器官生物量分配比例最高, 达到 48.67%, Nebraska 最低, 为 31.88%。就柳枝稷地上部而言, Alamo、Kanlow 和 Trailblazer 茎秆生物量分配比例及茎叶比均较高, 分别为 35.91% 和 2.75, 37.09% 和 2.56, 34.39% 和 2.48。起源纬度显著影响了柳枝稷的生物量及其分配, 就柳枝稷整株植株而言, 起源纬度与柳枝稷生物量显著负相关, 与地下部生物量分配比例显著正相关, 与地上部、种子和茎生物量分配比例显著负相关。就柳枝稷地上部而言, 起源纬度与茎生物量分配比例及茎叶比显著负相关, 与叶和鞘生物量分配比例显著正相关。生物量的差异及其分配规律反映出柳枝稷对生态环境长期适应的生殖与生长策略。本研究为柳枝稷遗传资源引种和品种选育提供了依据。

关键词: 柳枝稷; 起源纬度; 生态型; 生物量分配

Research on the Differences in Biomass and Its Allocation of 14 Switchgrass in Beijing

ZHAO Chun-qiao^{1,2}, FAN Xi-feng², HOU Xin-cun², ZHU Yi², YUE Yue-sen², HU Yue-gao¹, WU Ju-ying²

(¹ College of Agriculture and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193; ² Research & Development Center for Grass and Environment, Beijing Academy of Agricultural and Forestry Sciences/Key Laboratory of Urban Agriculture (North) of Ministry of Agriculture, Beijing 100097)

Abstract: In this work, pot experiment was conducted in Beijing to study the differences in biomass and its allocation of 14 switchgrass. The results showed that the low-land switchgrass Kanlow produced the most biomass with dry weights of stems, aboveground parts and the whole plant reaching to 175.48 g/plant, 299.18 g/plant and 447.66 g/plant, respectively. While, the up-land switchgrass Nebraska produced the least biomass with dry weights of stems, aboveground parts and the whole plant being 29.86 g/plant, 58.08 g/plant and 140.51 g/plant, respectively. Taking the whole plant into consideration, Kanlow allocated the highest proportion (63.13%) of biomass into aboveground parts compared to the other switchgrass cultivars, while the lowest (40.55%) was found in S2. Moreover, Kanlow allocated the highest proportion (48.67%) of biomass into aboveground vegetative organs and the lowest proportion (31.88%) was found in Nebraska. Taking aboveground parts of switchgrass as a whole, Alamo, Kanlow and Trailblazer allocated higher proportion of biomass (35.91%, 37.09% and 34.39%, respectively) into stalks and higher stems/leaves ratio (2.75, 2.56 and 2.48, respectively) was found compared with other switchgrass cultivars. The origin latitude significantly influenced the switchgrass biomass and its allocation. Considering the whole switch-

收稿日期: 2015-03-30 修回日期: 2015-04-28 网络出版日期: 2016-01-28

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4996.S.20160128.1544.034.html>

基金项目: 北京市科技新星计划 (Z131105000413020); 北京市农林科学院青年科研基金 (QNJJ201219); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项 (KJCX20140201)

第一作者主要从事能源草高产、优质方面的研究。E-mail: spridgezhao111@163.com

通信作者: 胡跃高, 主要从事荒漠化治理及燕麦相关研究。E-mail: huyuegao@cau.edu.cn

grass plant, there was significant negative correlation between the origin latitude and switchgrass biomass. Significant positive correlations between the origin latitude and biomass proportion of belowground parts and the significant negative correlations between origin latitude and the biomass proportion of aboveground parts, seeds as well as stems were also found. When talking about aboveground parts of switchgrass, a significant negative correlations between origin latitude and stems biomass proportion as well as the stems/leaves ratio were found, while significant positive correlations exhibited between origin latitude and leaves and sheaths biomass proportion. The differences of biomass and its allocation reflected a reproductive and growth strategy long-term adaptive to the ecological environment in switchgrass. This work provides the basis for introduction of genetic resources and the variety breeding of switchgrass.

Key words: switchgrass; origin latitude; ecotype; biomass allocation

柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 属于禾本科 (Gramineae) 黍属 (*Panicum*), 起源于北美洛基山脉以东、55°N 以南的大草原^[1], 是一种多年生暖季型草本 C4 植物, 生长迅速, 植株高大^[2]。柳枝稷种质资源丰富, 具有较好的遗传多样性^[3], 适应范围广, 生物质产量高、品质优良, 抗逆性强, 易于管理、收获, 适用于清洁燃料的生产^[4]。柳枝稷于 20 世纪 80 年代被引种到中国, 成为生物能源重要原材料来源, 被国内外许多学者认为是一种具有较大发展潜力的模式能源作物^[5]。

柳枝稷在我国北方地区表现出良好的生态适应性, 在半干旱黄土丘陵沟壑区其生物质产量可达 15 t/hm²^[6], 在宁夏银北平原轻度或中度自然盐碱地其生物质产量可达 14.3 t/hm²^[7]。在北京地区正常壤土条件下其生物质产量可达 28.33 t/hm²^[8], 轻度重金属污染地区其生物质产量可达 23.23 t/hm²^[9], 京郊挖沙废弃地其生物质产量可达 3.77t/hm²^[10]。在柳枝稷实际生产过程中, 为降低运输成本和提高生物质品质而提倡延迟收获^[11], 这导致大量的柳枝稷种子、穗和叶片脱落, 从而造成生物质资源浪费, 因此柳枝稷植株中生物量的分配直接影响到其利用效率。有研究表明, 除穗能够显著增加柳枝稷生物量及其茎生物量分配比例^[12]。盐胁迫显著降低了柳枝稷的生物量, 显著增加了种子的生物量分配比例^[13]。不同水分条件处理显著增加了柳枝稷的根系数目和根冠比, 使根系的生物量分配比例增高^[14]。对 Sunburst 和 Dacotah 两个柳枝稷品种生物量分配的研究结果表明, 柳枝稷生物量及其在不同器官间的分配在不同生长期及不同生长年份均有所不同^[15]。因此前人对单一品种或较少品种柳枝稷的生物量进行了初步的研究, 对柳枝稷生物量分配的研究较少, 而对不同品种柳枝稷生物量及分配规律的研究更是鲜见报道。

基于此, 本研究采用 14 份柳枝稷开展盆栽试验, 研究了在北京地区条件下其生物量差异及分配规律, 以期柳枝稷高产、遗传资源引种和品种选育提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与地点

采用 14 份不同品种 (品系) 柳枝稷 (表 1) 于北京草业与环境研究发展中心开展试验。试验所用柳枝稷种子均于 2013 年 10 月底采集于小汤山能源草种植基地 (39°34'N, 116°28'E)。

表 1 14 份柳枝稷品种名、生态型、倍性和起源
Table 1 Ecotype, ploidy and origin of 14 switchgrass

品种	生态型	倍性	起源
Cultivars	Ecotype	Ploidy	Origin
Alamo	低地型	四倍体 (4n)	South Texas 28°
CIR	高地型	八倍体 (8n)	North Carolina 35°
Pathfinder	高地型	四倍体 (4n)	Nebraska/Kansas 40°
Forestburg	高地型	四倍体 (4n)	South Dakota 44°
Trailblazer	高地型	八倍体 (8n)	Nebraska 40°
Kanlow	低地型	四倍体 (4n)	Central Oklahoma 35°
Blackwell	高地型	八倍体 (8n)	Northern Oklahoma 37°
Nebraska	高地型	-	South Dakota, 44°
S1	高地型	四倍体 (4n)	Newyork 40°
S2	高地型	四倍体 (4n)	CanadaBay 33°
Ranlow	高地型	四倍体 (4n)	-
S3	高地型	四倍体 (4n)	-
S4	高地型	四倍体 (4n)	-
Rise	低地型	四倍体 (4n)	-

CIR: Cave-in-Rock, Rise: Rise-Reed-Canary-Grass, -: indicates unknown, the same as below

1.2 生长条件

于 2014 年 3 月中旬对柳枝稷进行温室内播种、

育苗。温室温度控制在白天为 25 ~ 35℃,夜间为 15 ~ 20℃,相对湿度为 60% ~ 70%。采用微喷方式保持育苗基质湿润,育苗基质 pH 值为 7.53,有机质含量为 55.36 g/kg,速效氮含量为 142 mg/kg,速效钾含量为 81.33 mg/kg,速效磷含量为 22.90 mg/kg。

试验地属于暖温带大陆性季风气候,平均海拔 50 m,年平均温度 12 ~ 17℃,降雨量为 400 ~ 600 mm,≥10℃ 积温为 4200℃。2014 年 4 月底,待柳枝稷长至 3 叶期时进行移栽,移栽过程中携带营养土块,去除育苗钵。移栽后柳枝稷生长土壤有机质含量为 47.94 g/kg,速效氮含量为 115.56 mg/kg,速效钾含量为 150.06 mg/kg,速效磷含量为 20.45 mg/kg,pH 值为 7.44。移栽后一次性浇足安家水,之后均采用滴灌方式进行灌溉,晴朗天气条件下每 5d 滴灌 1 次,每次滴灌 4 h。在柳枝稷整个生育期内,适时去除杂草。

1.3 试验设计

采用盆栽方法于室外开展试验,盆口直径为 30 cm、高 25 cm,底部留有 3 个 1 cm 左右小孔。于盆底部铺垫 3 层纱布以防止土壤遗漏,然后将充分混匀的土壤基质填入盆中,使盆内土壤平面距盆沿 3 cm。将盆连带托盘置于事前挖好的坑中,盆周围用土壤填实。每品种(系)设 4 次重复,株间距为 80 cm,行间距为 100 cm。

1.4 测定项目与方法

于 2014 年 10 月底对柳枝稷进行取样,留茬高度约为 1 cm。取样后首先将样品用自来水洗净后迅速置于 105℃ 下杀青 20 min,然后将柳枝稷根、根

茎、茎、叶、鞘、穗和种子进行分离,均置于 50℃ (避免破坏细胞壁组分与结构从而影响后续试验)烘箱中烘干至恒重,称重。

1.5 统计分析

采用 SPSS 19.0 进行 One Way ANOVA 方差显著性分析,差异显著性水平为 $P = 0.05$,并进行相关性分析,采用 Origin 8.5 作图。

2 结果与分析

2.1 柳枝稷不同器官生物量

柳枝稷不同器官间生物量体现出较大的差异(表 2)。柳枝稷各器官生物量按照平均值进行排序为:根 > 茎 > 叶 > 根茎 > 鞘 > 穗 > 种子,其中根的平均生物量达到 85.19 g/株,种子为 13.22 g/株。不同柳枝稷品种(系)间比较,各器官生物量差异也比较明显(表 2)。Kanlow 各器官生物量均较高,茎、叶、鞘、穗、种子、根和根茎生物量分别达到 139.83 g/株、54.82 g/株、35.65 g/株、44.29 g/株、24.6 g/株、135.28 g/株、40.21 g/株;而 Nebraska 各器官生物量均较低,分别为 20.53 g/株、14.26 g/株、9.33 g/株、9.16 g/株、4.81 g/株、64.92 g/株、17.51g/株。按照不同生态类型进行比较,低地型柳枝稷 Alamo 和 Kanlow 各器官生物量整体高于高地型,但高地型柳枝稷品种 Trailblazer 生物量较高,甚至高于低地型品种 Rise。按照不同倍性进行比较,各器官生物量并未体现出明显的变化规律,说明倍性对柳枝稷生物量的影响并不明显。

表 2 柳枝稷不同器官生物量

Table 2 Biomass of different organs in switchgrass

品种	茎(g/株)	叶(g/株)	鞘(g/株)	穗(g/株)	种子(g/株)	根(g/株)	根茎(g/株)
Cultivars	Stem	Leaf	Sheath	Tassel	Seed	Root	Rhizome
Alamo	79.45 ± 5.79c	30.43 ± 3.47cd	23.23 ± 4.02bc	17.23 ± 2.15cd	20.14 ± 1.98b	94.09 ± 8.95b	22.04 ± 1.52bc
S3	32.89 ± 2.37e	32.01 ± 2.09c	19.24 ± 2.92cd	22.55 ± 2.64b	19.09 ± 1.51b	89.15 ± 9.66bc	37.64 ± 2.64a
Blackwell	29.81 ± 3.62ef	22.93 ± 5.12efg	13.32 ± 2.85ef	12.56 ± 1.5efgh	12.65 ± 1.47cd	68.87 ± 6.37d	35.59 ± 3.27a
S2	21.92 ± 1.99fg	17.82 ± 1.03gh	8.40 ± 0.63g	7.47 ± 0.61i	4.67 ± 0.48g	67.34 ± 2.43d	20.85 ± 0.82bcd
CIR	42.21 ± 5.46d	18.33 ± 1.37fgh	11.19 ± 1.26fg	20.44 ± 2.48bc	13.63 ± 2.85cd	74.69 ± 3.64cd	21.15 ± 1.36bcd
Forestburg	28.18 ± 2.22efg	23.03 ± 2.33ef	12.30 ± 1.90fg	12.84 ± 1.44efg	8.64 ± 0.86ef	68.9 ± 3.43d	25.15 ± 2.20b
S4	28.91 ± 3.71efg	24.62 ± 1.73de	17.19 ± 2.67de	15.05 ± 1.88def	12.21 ± 1.12ede	72.13 ± 9.34d	23.31 ± 2.14bc
Kanlow	139.83 ± 7.03a	54.82 ± 3.31a	35.65 ± 2.36a	44.29 ± 4.52a	24.60 ± 3.09a	135.28 ± 8.17a	40.21 ± 3.34a
Nebraska	20.53 ± 2.67g	14.26 ± 2.42h	9.33 ± 0.95fg	9.16 ± 0.55ghi	4.81 ± 0.58g	64.92 ± 6.08d	17.51 ± 1.425d
S1	46.16 ± 8.27d	22.06 ± 1.2efg	17.08 ± 1.72de	14.43 ± 1.01def	14.80 ± 1.69c	98.98 ± 10.41b	17.35 ± 1.68cd
Pathfinder	27.96 ± 1.35efg	22.53 ± 4.98efg	11.16 ± 1.61fg	11.32 ± 1.87fghi	10.17 ± 0.78de	71.39 ± 4.71d	34.40 ± 2.50a
Ranlow	21.62 ± 3.86fg	17.8 ± 2.15gh	12.08 ± 0.97fg	8.47 ± 0.94hi	6.48 ± 1.31fg	70.40 ± 6.47d	25.20 ± 1.83b
Rise	49.22 ± 5.27d	25.37 ± 4.23de	18.50 ± 2.54d	15.81 ± 1.18de	14.00 ± 1.53cd	78.17 ± 6.34cd	18.22 ± 2.27cd
Trailblazer	100.21 ± 6.79b	40.52 ± 3.01b	25.82 ± 2.25b	18.12 ± 1.71cd	19.18 ± 2.22b	138.38 ± 11.48a	24.00 ± 1.94bc
平均 Mean	47.78 ± 42.92	26.18 ± 14.28	16.75 ± 10.28	16.41 ± 16.86	13.22 ± 8.89	85.19 ± 35.51	25.90 ± 13.58

同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$),下同
The different letters indicates the significant differences at $P < 0.05$, the same as below

根据不同功能将柳枝稷各器官划分为营养器官(茎、叶和鞘),有性繁殖器官(穗和种子),地下部(根和根茎)和地上部(茎、叶、鞘、穗和种子)。柳枝稷地上部、地下部、营养器官和有性繁殖器官平均生物量分别为 120.33 g/株、111.09 g/株、90.7 g/株、29.63 g/株(表 2)。地上部生物量变化范围为 58.80 ~ 299.18 g/株,地下部生物量变化范围为 82.43 g ~ 175.48 g/株,营养器官生物量变化范围为

44.11 ~ 230.29 g/株,有性繁殖器官生物量变化范围为 12.14 ~ 68.89 g/株,总生物量变化范围为 140.51 ~ 474.66 g/株。根冠比也体现出较大的差异,其中以 Kanlow 最低,为 0.67,S3 最高,为 1.90。按照地上部生物量大小对不同品种(品系)柳枝稷进行排序为:Nebraska < S2 < Ranlow < Pathfinder < Forestburg < Blackwell < S4 < CIR < S1 < Rise < S3 < Alamo < Trailblazer < Kanlow。

表 3 柳枝稷不同部分生物量

Table 3 Biomass of different parts in switchgrass

品种 Cultivars	地上部(g/株) Aboveground	地下部(g/株) Belowground	营养器官(g/株) Vegetative organs	有性繁殖器官(g/株) Sexual organs	总生物质(g/株) Total	根冠比 Root cap ratio
Alamo	170.48 ± 12.51c	116.12 ± 13.44bc	133.11 ± 12.84c	37.37 ± 3.21bc	286.6 ± 22.89c	0.68 ± 0.11gh
S3	125.77 ± 14.48d	126.78 ± 14.49b	84.13 ± 6.37d	41.64 ± 4.59b	252.55 ± 24.88d	1.90 ± 0.19de
Blackwell	91.26 ± 8.75g	104.46 ± 9.19cde	66.06 ± 5.51e	25.20 ± 2.25ef	195.72 ± 20.88fg	1.23 ± 0.16cd
S2	60.27 ± 4.53h	88.18 ± 7.73ef	48.14 ± 4.23g	12.14 ± 1.16g	148.46 ± 7.12i	1.47 ± 0.07a
CIR	105.79 ± 6.27ef	95.84 ± 8.90def	71.72 ± 8.34e	34.07 ± 2.96cd	201.63 ± 15.15fg	1.22 ± 0.11ef
Forestburg	84.98 ± 4.15g	94.05 ± 4.88def	63.50 ± 5.77ef	21.48 ± 1.84f	179.03 ± 11.28gh	1.12 ± 0.09cde
S4	97.97 ± 9.03fg	95.44 ± 13.83def	70.71 ± 6.39e	27.26 ± 2.11ef	193.41 ± 21.51g	1.02 ± 0.12def
Kanlow	299.18 ± 28.34a	175.48 ± 16.58a	230.29 ± 20.11a	68.89 ± 7.13a	474.66 ± 50.08a	0.67 ± 0.09h
Nebraska	58.80 ± 10.30h	82.43 ± 9.39f	44.11 ± 4.29g	13.97 ± 1.22g	140.51 ± 10.65i	1.41 ± 0.19ab
S1	114.52 ± 12.99de	116.33 ± 10.8bc	85.29 ± 9.64d	29.23 ± 3.01de	230.85 ± 18.43de	1.09 ± 0.08de
Pathfinder	83.14 ± 9.15g	105.79 ± 8.27cd	61.65 ± 5.53ef	21.49 ± 2.58f	188.93 ± 16.23g	1.28 ± 0.12bc
Ranlow	66.44 ± 5.10h	95.60 ± 6.71def	51.50 ± 4.79fg	14.94 ± 1.02g	162.03 ± 18.04hi	1.58 ± 0.09ab
Rise	122.89 ± 12.69d	96.38 ± 8.64def	93.08 ± 8.82d	29.80 ± 2.24de	219.27 ± 17.24ef	0.77 ± 0.08fg
Trailblazer	203.85 ± 18.41b	162.38 ± 14.55a	166.55 ± 15.23b	37.30 ± 3.09bc	366.23 ± 27.26b	0.82 ± 0.07fg
平均值 Mean	120.33 ± 87.57	111.09 ± 41.93	90.70 ± 65.73	29.63 ± 24.05	231.42 ± 117.47	1.16 ± 0.73

2.2 柳枝稷不同器官、部分生物量分配比例

柳枝稷在不同器官间的生物量分配比例差异较大,按照分配比例平均值由大到小排序为:根 > 茎 > 根茎 > 叶 > 鞘 > 穗 > 种子,其中根生物量分配比例达到 38.18%,种子生物量分配比例仅为 5.6%。不同品种(系)柳枝稷间进行比较,其向不同器官的生物量分配比例差异也比较大(表 4)。茎生物量分配比例以 Kanlow 最高,达到 29.62%,S3 最低,为 13.02%;叶生物量分配比例以 Forestburg 最高,达到 12.86%,CIR 最低,为 9.09%;鞘生物量分配比例以 S4 最高,达到 8.91%,CIR 最低,为 5.59%;穗生物量分配比例以 CIR 最高,达到 10.14%,Trailblazer 最低,为 4.95%;种子生物量分配比例以 S3 最高,达到 7.55%,S2 最低,为 3.14%;根生物量分配比例以 Nebraska 最高,达到 47.16%,Kanlow 最低,为 28.44%;根茎生物量分配比例以 Blackwell 最高,达到

18.29%,Trailblazer 最低,为 6.56%。与高地型柳枝稷相比,低地型柳枝稷向茎、鞘生物量分配比例整体较高,而向根和根茎的生物量分配比例则整体较小。但高地型柳枝稷 Trailblazer 向茎和鞘的生物量分配比例也比较高,且明显高于低地型柳枝稷品种 Rise。按照不同倍性进行比较,不同倍性柳枝稷在生物量分配比例方面并未体现出明显的变化规律。

柳枝稷向不同部分的生物量分配比例差异也比较明显(表 5)。地上部生物量分配比例变化范围为 40.55% ~ 63.13%,按照不同品种(品系)由小到大排序为:S2 < Ranlow < Nebraska < Pathfinder < Blackwell < Forestburg < S1 < S3 < S4 < CIR < Trailblazer < Rise < Alamo < Kanlow。地下部生物量分配比例变化范围为 36.87% ~ 59.45%,有性繁殖器官生物量分配比例变化范围为 8.16% ~ 16.84%,营养器官生物量分配比例变化范围为 31.88% ~ 48.67%。

表 4 柳枝稷不同器官生物质分配

Table 4 Biomass allocation in different organs of switchgrass

品种	茎(%)	叶(%)	鞘(%)	穗(%)	种子(%)	根(%)	根茎(%)
Cultivars	Stem	Leaf	Sheath	Tassel	Seed	Root	Rhizome
Alamo	27. 78 ± 3. 54a	10. 24 ± 0. 7bcd	8. 13 ± 0. 65abc	6. 06 ± 1. 12def	7. 07 ± 0. 88a	32. 99 ± 2. 73cd	7. 74 ± 0. 84fg
S3	13. 02 ± 1. 08c	12. 65 ± 1. 62a	7. 61 ± 0. 78abc	8. 93 ± 0. 66ab	7. 55 ± 0. 99a	35. 36 ± 4. 20c	14. 89 ± 1. 99bc
Blackwell	15. 31 ± 0. 68c	11. 25 ± 0. 71abc	6. 84 ± 0. 29bede	6. 46 ± 0. 90de	6. 49 ± 0. 31abc	35. 35 ± 3. 03c	18. 29 ± 2. 77a
S2	14. 74 ± 0. 70c	12. 00 ± 0. 21ab	5. 65 ± 0. 18e	5. 02 ± 0. 23f	3. 14 ± 0. 19g	45. 38 ± 0. 62a	14. 07 ± 0. 72bc
CIR	20. 76 ± 1. 87b	9. 09 ± 0. 68d	5. 59 ± 0. 62e	10. 14 ± 0. 38a	6. 71 ± 0. 82ab	37. 21 ± 2. 15c	10. 51 ± 1. 76def
Forestburg	15. 74 ± 1. 00c	12. 86 ± 0. 38a	6. 87 ± 1. 01bede	7. 18 ± 0. 29cd	4. 84 ± 0. 87ef	38. 43 ± 2. 45bc	14. 09 ± 2. 52bc
S4	14. 94 ± 0. 62c	12. 74 ± 0. 78a	8. 91 ± 0. 96a	7. 81 ± 0. 86bc	6. 34 ± 0. 55abcd	37. 16 ± 2. 93c	12. 11 ± 0. 97cd
Kanlow	29. 62 ± 2. 18a	11. 59 ± 0. 92ab	7. 47 ± 0. 77abc	9. 30 ± 0. 95a	5. 15 ± 0. 58def	28. 44 ± 1. 12d	8. 43 ± 0. 54efg
Nebraska	14. 86 ± 1. 27c	10. 32 ± 1. 08bcd	6. 70 ± 1. 05cde	6. 68 ± 0. 61cd	3. 47 ± 0. 13g	47. 16 ± 2. 99a	10. 81 ± 1. 67de
S1	20. 03 ± 0. 84b	9. 57 ± 0. 68cd	7. 37 ± 1. 48abcd	6. 26 ± 0. 46def	6. 43 ± 0. 73abcd	42. 78 ± 2. 49ab	7. 55 ± 0. 98fg
Pathfinder	14. 77 ± 0. 78c	11. 93 ± 1. 32ab	5. 86 ± 1. 02de	5. 98 ± 0. 98def	5. 58 ± 0. 87bede	37. 60 ± 4. 27c	18. 28 ± 2. 14a
Ranlow	13. 43 ± 1. 58c	11. 1 ± 1. 94abc	7. 49 ± 0. 94abc	5. 23 ± 0. 60ef	3. 97 ± 0. 61fg	43. 27 ± 4. 41ab	15. 51 ± 2. 31ab
Rise	22. 47 ± 0. 86b	11. 52 ± 1. 47abc	8. 43 ± 0. 72ab	7. 23 ± 0. 88cd	6. 39 ± 0. 73abcd	35. 63 ± 0. 82c	8. 32 ± 0. 95efg
Trailblazer	27. 35 ± 1. 39a	11. 06 ± 0. 62abc	7. 04 ± 0. 46bede	4. 95 ± 0. 64f	5. 23 ± 0. 92cde	37. 8 ± 2. 01c	6. 56 ± 1. 09g
平均 Mean	18. 91 ± 5. 79	11. 28 ± 1. 53	7. 14 ± 1. 28	6. 95 ± 1. 71	5. 60 ± 1. 49	38. 18 ± 5. 6	11. 94 ± 4. 18

表 5 柳枝稷不同部分生物质分配

Table 5 Biomass allocation in different parts of switchgrass

品种	地上部(%)	地下部(%)	有性繁殖器官(%)	营养器官(%)
Cultivars	Aboveground	Belowground	Sexual organs	Vegetative organs
Alamo	59. 27 ± 2. 84ab	40. 73 ± 2. 84gh	13. 13 ± 1. 76bcd	46. 14 ± 2. 96ab
S3	49. 75 ± 3. 43def	50. 25 ± 3. 43cde	16. 48 ± 1. 45a	33. 27 ± 3. 18cde
Blackwell	46. 35 ± 0. 30fg	53. 65 ± 0. 30bc	12. 96 ± 0. 92bcd	33. 40 ± 1. 02cde
S2	40. 55 ± 1. 16h	59. 45 ± 1. 16a	8. 16 ± 0. 40g	32. 39 ± 1. 02de
CIR	52. 28 ± 2. 66cd	47. 72 ± 2. 66ef	16. 84 ± 1. 11a	35. 44 ± 2. 05cde
Forestburg	47. 48 ± 1. 83efg	52. 52 ± 1. 83bed	12. 02 ± 1. 09cde	35. 46 ± 2. 18cde
S4	50. 73 ± 2. 71de	49. 27 ± 2. 71de	14. 15 ± 1. 19b	36. 58 ± 1. 62cd
Kanlow	63. 13 ± 1. 63a	36. 87 ± 1. 63h	14. 45 ± 1. 38b	48. 67 ± 2. 36a
Nebraska	42. 04 ± 2. 03h	57. 96 ± 2. 03a	10. 15 ± 0. 53ef	31. 88 ± 2. 46e
S1	49. 67 ± 2. 47def	50. 33 ± 2. 47cde	12. 69 ± 0. 71bcd	36. 98 ± 2. 39c
Pathfinder	44. 11 ± 2. 22gh	55. 89 ± 2. 22ab	11. 55 ± 1. 04de	32. 56 ± 1. 48de
Ranlow	41. 22 ± 4. 28h	58. 78 ± 4. 28a	9. 20 ± 0. 97fg	32. 02 ± 4. 27e
Rise	56. 05 ± 0. 28bc	43. 95 ± 0. 28fg	13. 62 ± 1. 23bc	42. 43 ± 1. 12b
Trailblazer	55. 64 ± 1. 79bc	44. 36 ± 1. 79fg	10. 19 ± 0. 43ef	45. 45 ± 1. 64ab
平均值 Mean	49. 88 ± 7. 05	50. 12 ± 7. 05	12. 54 ± 2. 69	37. 33 ± 6. 08

以柳枝稷地上部作为整体以平均值进行比较分析(表 6),柳枝稷向茎生物量分配比例最高,达到 37. 31%,然后依次为茎、叶、鞘、穗,种子生物量分配比例最低,为 11. 23%。不同品种(品系)间比较,茎

生物量分配比例以 Trailblazer 最高,达到 49. 13%,S3 最低,为 26. 18%;叶生物量分配比例以 S2 最高,达到 29. 61%,Alamo 最低,为 17. 37%;鞘生物量分配比例以 Ranlow 最高,达到 18. 14%,CIR 最低,为

10.72% ;穗生物量分配比例以 CIR 最高,达到 19.42% ,Trailblazer 最低,为 8.91% ;种子生物量分配比例以 S3 最高,达到 15.23% ,S2 最低,为 7.73% ;茎和鞘生物量分配比例以 Trailblazer 最高,达到 61.78% ,S3 最低,为 41.44% ;茎叶比以 Alamo 最高,达到 2.75,S3 最低,为 1.04(表 6)。

表 6 柳枝稷地上部生物量分配

Table 6 Biomass allocation in different parts of switchgrass

品种 Cultivars	茎 Stem	叶 Leaf	鞘 Sheath	穗 Tassel	种子 Seed	茎叶比 Stem/Leaf
Alamo	46.71 ± 3.97a	17.37 ± 1.99d	13.76 ± 1.5cde	10.20 ± 1.74gh	11.97 ± 1.74bcde	2.75 ± 0.53a
S3	26.18 ± 1.56f	25.35 ± 2.13b	15.26 ± 0.55bcd	17.98 ± 1.35ab	15.23 ± 2.05a	1.04 ± 0.11e
Blackwell	33.03 ± 1.41cd	24.27 ± 1.46b	14.75 ± 0.65cd	13.95 ± 1.94cdef	14.00 ± 0.7ab	1.37 ± 0.12de
S2	36.34 ± 0.8c	29.61 ± 0.65a	13.93 ± 0.18cde	12.39 ± 0.57fg	7.73 ± 0.37f	1.23 ± 0.05de
CIR	39.67 ± 2.35b	17.38 ± 0.98d	10.72 ± 1.3f	19.42 ± 0.85a	12.81 ± 1.19abc	2.30 ± 0.25bc
Forestburg	33.12 ± 0.97cd	27.11 ± 1.28ab	14.41 ± 1.68cde	15.13 ± 0.62cde	10.22 ± 2.02cdef	1.22 ± 0.08de
S4	29.53 ± 2.02e	25.10 ± 0.5b	17.52 ± 1.06ab	15.36 ± 1.08cd	12.48 ± 0.77abcd	1.18 ± 0.09de
Kanlow	46.88 ± 2.56a	18.33 ± 0.99cd	11.87 ± 1.48ef	14.76 ± 1.63cdef	8.17 ± 0.98f	2.56 ± 0.17ab
Nebraska	35.29 ± 1.34cd	24.56 ± 2.46b	15.9 ± 2.03abc	15.97 ± 2.01bc	8.28 ± 0.43f	1.45 ± 0.18d
S1	40.35 ± 0.99b	19.26 ± 0.45cd	14.79 ± 2.57cd	12.59 ± 0.32ef	13.01 ± 1.81abc	2.10 ± 0.08c
Pathfinder	33.48 ± 1.03cd	26.98 ± 1.78ab	13.38 ± 2.65cdef	13.47 ± 1.62cdef	12.68 ± 2.15abc	1.25 ± 0.08de
Ranlow	32.53 ± 0.69d	26.78 ± 2.78ab	18.14 ± 0.69a	12.76 ± 1.46ef	9.79 ± 2.16def	1.23 ± 0.11de
Rise	40.10 ± 1.54b	20.56 ± 2.67c	15.04 ± 1.25bcd	12.89 ± 1.52def	11.41 ± 1.32bcde	1.99 ± 0.33c
Trailblazer	49.13 ± 1.28a	19.89 ± 1.24cd	12.65 ± 0.6def	8.91 ± 1.12h	9.41 ± 1.63ef	2.48 ± 0.23ab
平均值 Mean	37.31 ± 6.82	23.04 ± 4.31	14.44 ± 2.44	13.99 ± 3.01	11.23 ± 2.7	1.72 ± 0.62

2.3 柳枝稷生物量及分配与起源纬度相关关系

不同品种(品系)柳枝稷各器官、部分生物量及其分配比例与起源纬度间呈现出不同的相关关系(图 1)。柳枝稷各器官、部分生物量与起源纬度均呈现出不同程度的负相关关系(图 1A),其中有性繁殖器官、种子和茎达到显著水平,相关系数分别为 -0.414、-0.37 和 -0.358。就生物量分配而言,柳枝稷向不同器官、部分生物量分配比例与起源纬度间呈现出不同的相关关系(图 1B)。茎、鞘、种子、地上部、有性繁殖器官、营养器官生物量分配比例与起源纬度间呈现出负相关关系,且营养器官、地上部和茎达到了显著水平,分别为 -0.4、-0.432 和 -0.454;其余器官或部分生物量分配比例与起源纬度间则呈现出正相关关系,且地下部和根达到了显著水平,相关系数分别为 0.432 和 0.433。就地上部生物量分配而言,茎生物量分配比例、茎叶比与起源纬度间呈现出显著负相关关系(图 1C),相关系数分别达到 -0.339 和 -0.471;种子、穗、叶、鞘则与起源纬度间呈现出不同程度正相关关系,且鞘和叶达到了显著水平,相关系数分别为 0.376 和 0.452。

3 讨论

柳枝稷是一种重要的能源植物^[16]。不同柳枝稷种质资源生物质产量差异较大,R. Lemus 等^[17]对 20 份柳枝稷生物质产量和生长特征的研究结果表明,低地型柳枝稷品种 Alamo 和 Kanlow 生物质产量较高,远高于在美国地区普遍种植的 CIR,且各生长特征明显优于其余柳枝稷品种。本研究结果表明,14 份柳枝稷地上部生物量差异较大,整体而言,低地型柳枝稷品种(系)地上部生物量高于高地型,但高地型品种 Trailblazer 表现出明显的不一致性,地上部生物量也比较高,甚至高于低地型品种 Rise。低地型柳枝稷品种生物质产量要高于高地型柳枝稷品种^[18],本研究同时发现,起源纬度与柳枝稷生物量间存在明显负相关关系,再次印证了这一结论。就不同品种(系)柳枝稷而言,Kanlow、Alamo 和 Trailblazer 地上部生物量显著高于其余品种(系),在北京地区表现出良好的生产潜力。引种地的纬度对柳枝稷生物质产量也会产生重要影响,只有将柳枝稷引种到与其起源纬度相近或较高的地区才会使

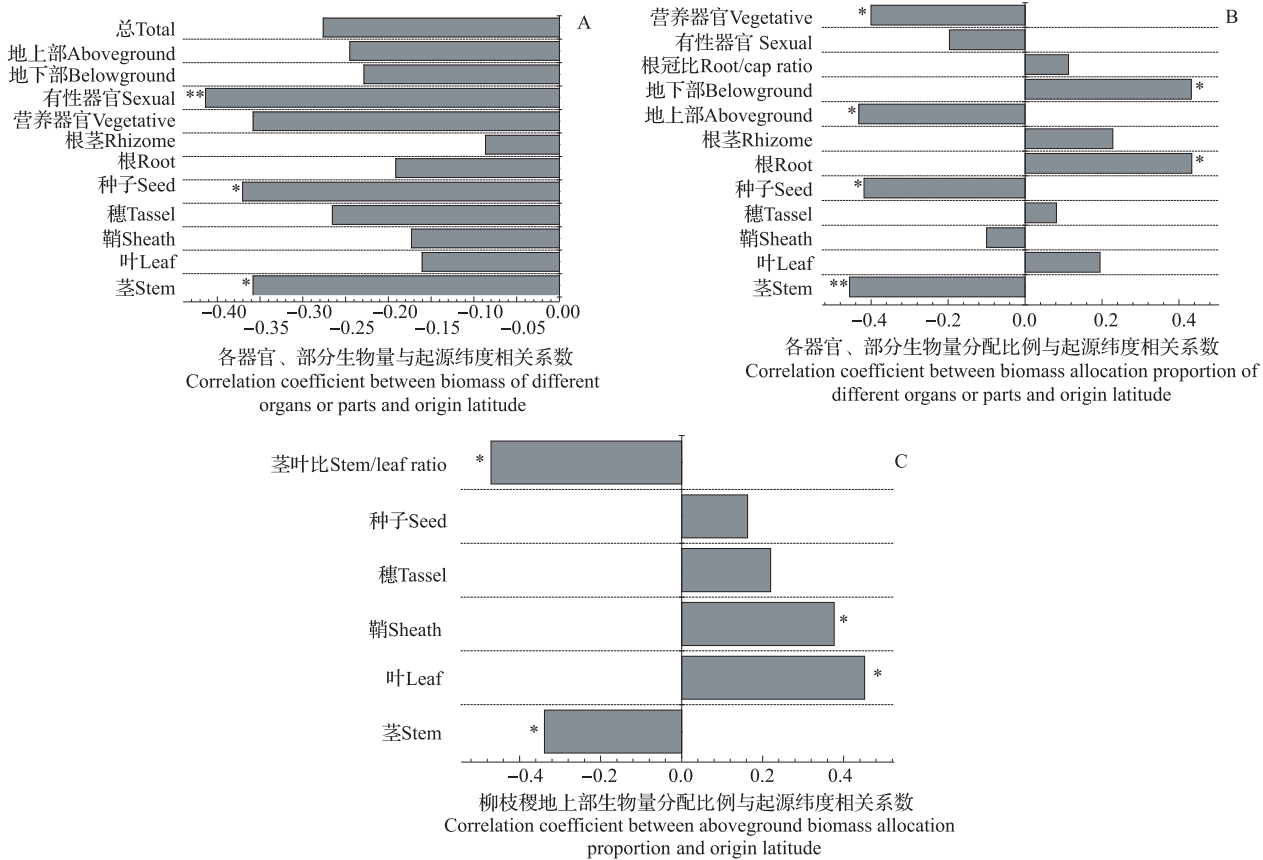


图1 柳枝稷各器官、部分生物量及分配比例与起源纬度间相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between biomass,allocation of different organs or parts and origin latitude

其达到最大生物质产量^[19]。本研究结果表明,Alamo和Kanlow地上部生物量明显高于其余各品种(品系),其起源纬度均明显低于北京地区,属于南种北引,这可能是造成其生物量较高的另一重要因素。其余各柳枝稷品种(品系)在种质资源和引种纬度的双重影响下表现出了较大的差异性。

柳枝稷在实际生产过程中提倡延迟收获,但在雨雪和风霜的作用下其种子、穗和叶片的大量脱落,从而使生物质产量大大降低^[20]。因此,降低柳枝稷向种子、穗、叶片的生物量分配比例有利于其实际生物质产量的提高。本研究结果表明,就地上部生物量分配而言,Alamo、Kanlow和Trailblazer向茎秆生物量分配比例均明显高于其余各品种,在延迟收获过程中生物质的损失较低,地上部生物质利用效率较高。多年生植物在不同的生态环境条件下会表现出不同的生殖行为,生殖投资与生殖配置也是不同的^[21]。本研究结果表明,起源纬度与柳枝稷生物量的分配体现出明显的相关关系,起源纬度与地下部生物量分配比例间呈现出明显正相关关系,与地上部总生物量、种子和茎生物量分配比例间呈现出明

显负相关关系,就地上部生物量分配而言,起源纬度与茎生物量分配比例及茎叶比呈现出显著负相关关系,而与鞘和叶呈现出显著正相关关系。反映出随着起源纬度的升高,柳枝稷营养生长被削弱,无性繁殖得到增强,有性繁殖被减弱,这是柳枝稷对生态环境长期适应的一种可遗传的生长与生殖策略。

我国适宜能源作物生产的边际土地面积达 $3.4 \times 10^7 \text{ hm}^2$,开展柳枝稷在边际土地的规模化种植与应用一方面可通过柳枝稷发达的根系有效改善当地土壤条件、生态环境状况,另一方面可为生物能源的发展提供大量木质纤维素类原材料^[22]。在对柳枝稷进行引种和规模化种植时,一方面需充分考虑不同品种(品系)柳枝稷生物量及其分配的差异,选择合适的品种进行规模化种植,以获取最大木质纤维素类物质产量;另一方面,根据不同品种(品系)柳枝稷生物量分配规律进行遗传育种或基因改良,获取高生物质产量、优生物量分配的柳枝稷品种,能够提供大量木质纤维素类物质的同时,又能够通过更为发达的根系很好地改善土壤环境,从而提高柳枝稷投入产出比。

参考文献

[1] Sanderson M, Reed R, McLaughlin S, et al. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop[J]. Bioresource Technol, 1996, 56(1): 83-93

[2] 章春彪, 陆国权. 柳枝稷研究进展[J]. 现代农业科技, 2013(11): 175-176

[3] 蒋晓梅, 黄琳凯, 张新全, 等. 利用 SCoT 分析柳枝稷遗传资源的多样性[J]. 植物遗传资源学报, 2014, 15(1): 89-95

[4] 程序. 能源牧草担当未来生物能源之大任[J]. 草业学报, 2008, 17(3): 1-5

[5] 马永清, 郝智强, 熊韶峻, 等. 我国柳枝稷规模化种植现状与前景[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 133-137

[6] 杨新国, 李玉英, 吴天龙, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区柳枝稷 (*Panicum virgatum*) 的生物质形成[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6043-6050

[7] 刘吉利, 吴娜. 自然盐碱胁迫对柳枝稷生物质生产和燃料品质的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(17): 25-28

[8] 范希峰, 侯新村, 左海涛, 等. 三种草本能源植物在北京地区的产量和品质特性[J]. 中国农业科学, 2010, 43(16): 3316-3322

[9] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 草本能源植物修复重金属污染土壤的潜力[J]. 中国草地学报, 2012, 34(1): 59-76

[10] 侯新村, 范希峰, 武菊英, 等. 京郊挖沙废弃地能源草生产潜力评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1768-1774

[11] Kering M K, Guretzky J A, Interrante S M, et al. Harvest timing affects switchgrass production, forage nutritive value, and nutrient removal[J]. Crop Sci, 2013, 53: 1809-1817

[12] Zhao C Q, Fan X F, Hou X C, et al. Tassel removal positively affects biomass production coupled with significantly increasing stem digestibility in switchgrass[J]. PloS One, 2015, 10, DOI: 10.1371/journal.pone.0120845

[13] 赵春桥, 李继伟, 范希峰, 等. 不同盐胁迫对柳枝稷生物量、品质和光合生理的影响[J]. 生态学报, 2015, 19, DOI: 10.5846/stxb201402170269

[14] 王银柱, 王冬, 刘玉, 等. 不同水分梯度下能源植物芒草和柳枝稷生物量分配规律[J]. 草业科学, 2015, 32(2): 236-240

[15] Frank A B, Berdahl J D, Hanson J D, et al. Biomass and carbon partitioning in switchgrass[J]. Crop Sci, 2004, 44(4): 1391-1396

[16] Hou X C, Fan X F, Zhu Y, et al. Ecological-economic values of lignocellulosic herbaceous plant on contaminated land[J]. Adv Mater Res, 2014, 852: 757-763

[17] Lemus R, Brummer E C, Moore K J, et al. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA[J]. Biom Bioen, 2002, 23(6): 433-442

[18] De Koff J P, Tyler D D. Improving switchgrass yields for bioenergy production[J]. Cooperative Extension Faculty Research, 2012, 40: 2

[19] Casler M D, Vogel K P, Taliaferro C M, et al. Latitudinal adaptation of switchgrass populations[J]. Crop Sci, 2004, 44(1): 293-303

[20] Adler P R, Sanderson M A, Boateng A A, et al. Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring[J]. Agron J, 2006, 98(6): 1518-1525

[21] 苏智先, 张素兰, 钟章成. 植物生殖生态学研究进展[J]. 生态学杂志, 1998, 17(1): 39-46

[22] Tang Y, Xie J S, Geng S. Marginal land - based biomass energy production in China[J]. J Integr Plant Biol, 2010, 52: 112-121