

能源牧草柳枝稷栽培管理研究进展

黄瑾^{1, 2} 高志娟^{1*} 丁文利¹ 安勤勤² 王智^{1, 2} 徐炳成^{1, 2}

(1. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

摘要 柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 是原产北美的暖季型C₄丛生禾本科多年生草本植物, 具有广阔的地域适应性, 为优良生物质能源植物和水土保持植物。同时也是一种优质的牧草, 含有丰富的蛋白质, 如果管理恰当的话, 既可以用来放牧也可以用作饲料草的生产。科学合理的栽培体系和模式是实现柳枝稷大范围种植利用的先决条件。本文要从柳枝稷生物学特性出发, 围绕柳枝稷草地建植管理, 包括苗床准备、品种选择、种子休眠破除、播种量和播种时间、肥料管理、杂草去除和收获管理等方面进行了阐述, 旨在为柳枝稷的推广利用提供指导。

关键词 柳枝稷 能源牧草 栽培管理 边际土地

柳枝稷 (*Panicum virgatum* L.) 为一种暖季型C₄丛生禾本科多年生草本植物, 源于中、北美洲, 具有广阔地域适应性, 可有效固碳保土, 被广泛用于水土保持、退化草地恢复以及青储饲料生产^[1-3]。相比其他多年生草本植物和传统农作物, 柳枝稷具有较高的净能源输出, 较低的维护成本、营养需求和灰分含量等, 因而作为一种新型的模式能源植物备受关注^[4, 5]。研究表明, 柳枝稷的产能是投入能量的五倍, 美国能源部将其列为一种理想的可再生生物质能源作物, 并已用于燃烧发电、气化和生产液体燃料(如生物乙醇)^[6, 7]。柳枝稷庞大的根系可用于防止河岸缓冲带非点源污染, 能有效地提高土壤有机质含量, 有效的储存土壤碳, 降低温室效应, 可以显著改善当地生态环境^[8, 9]。

在北美、南美和非洲等地区, 柳枝稷已有50多年的种植和利用历史; 在欧洲的结果表明, 柳枝稷能适应欧洲的多个地理环境, 并表现出较高的生产力, 并已用于生产乙醇及纤维素造纸^[10, 11]。我国对于柳枝稷的研究, 期初是基于生态恢复建设的草种引种开始。监测结果表明, 在陕北黄土丘陵区, 柳枝稷能够适应不同的立地生境条件, 具有较高的生物量和水肥利用效率, 表现出较强的生态适应性及水土保持能力^[12-17]。由于较强的广域适应性和高生物量, 以及多元用途, 种植柳枝稷能减少农业投入, 具有明显的社会及经济效益, 也利于一些偏远地区农民增加收入^[4, 8]。

科学合理的栽培体系和模式是实现柳枝稷大范围种植利用的先决条件, 也是提高其品质的基础。当前, 在柳枝稷引种栽培存在的主要障碍有两个: 一是缺乏优良品种, 柳枝稷为野生种, 其种子具有深度休眠特性, 种源不足和质量差是柳枝稷大规模种植的主要限制因子。因此, 如何提高种子活力和培育无休眠特性品种, 选育适合干旱沙漠、盐碱及寒冷等不同生境条件的高抗高产品种, 是实现柳枝稷广泛利用的前提; 二是缺乏针对不同区域特点的栽培与利用体系, 柳枝稷品种较多, 品种间抗逆性和生产潜力差异明显, 在实际生产中需要根据不同区域气候和土壤环境特征等选择相应的品种, 并建立合理的栽培管理技术体系。

本文在总结柳枝稷建植、管理和收获等相关研究基础上, 围绕柳枝稷栽培管理中相关问题进行阐述, 以期对柳枝稷的大范围栽培与合理利用提供参考。

1 生物学特性

柳枝稷主要靠种子进行繁殖, 种子细小, 表面坚实光滑。株高一般在0.5~2.7m, 根系具有较强的生长和分蘖能力、分布深、抗拉力大, 深可达3m, 具横向根状茎。庞大的根系可以有效地抗涝抗旱, 以及提高河岸缓冲带抗冲能力^[18]。柳枝稷叶片扁平, 长30~80cm, 宽0.8~1.3cm, 被柔毛, 两面有蜡质, 圆锥花序长15~50cm, 分枝末端有小穗, 叶与茎连接处有白色绒毛^[4, 11]。

柳枝稷可分为低地和高地两种生态型。低地型一般为四倍体, 多生活在泛滥平原地区, 株高一般为2.1~3.0m, 茎秆粗壮、分蘖多, 开花晚, 生长速度快。高地型通常为六倍体或八倍体, 以八倍体为主, 多生活在干燥的高纬度地区, 株高一般为1.5~1.8m, 茎秆细弱, 呈半匍匐状^[20, 21]。研究表明, 低地品种柳枝稷较高地品种生物产量高、灰分含量少, 更适用于生物质燃料发电^[22]。

柳枝稷基本染色体x=9, 染色体倍性在二倍体2n=18到十二倍体12n=108间均有^[23]。柳枝稷形态多样, 并具有较高的自我不亲和性^[23]。

柳枝稷生物量主要受土壤类型和地理条件影响。在我国陕北黄土丘陵区, 川地生长第五年的柳枝稷草地产量可达16t·hm⁻², 坡地和山地梯田约为2.65t·hm⁻²^[10]。在宁夏固原, 生长第五年的Cave-in-Rock和Illinois US柳枝稷地上部分干物质质量可分别达到12.3t·hm⁻²和10.93t·hm⁻²^[19]。

2 柳枝稷草地建植

影响柳枝稷建植成败的因素主要包括生长条件、种子质量与休眠、播种方法以及田间管理等^[4, 24]。

2.1 土壤类型及苗床准备

柳枝稷能适应多种土壤类型及酸性土壤环境, 在中性土壤条件下生长最好, 最适宜的土壤pH值一般为4.9~7.6^[25]。柳枝稷较适应于含有一定量磷, 钾和石灰性土壤上生长(或可以采用这种方式处理播前土壤)。因此, 种植前应检测土壤pH值, 若pH<5.0, 应适当施碱石灰^[26]。柳枝稷播种可以采用免耕技术, 也可使用传统苗床。Monti等^[27]在意大利南部对比4种苗床(耕作、播后碎土镇压、播前播后均进行碎土镇压、免耕)对柳枝稷种子出苗率的影响, 结果发现, 经过镇压的苗床(单次和双次)种子出苗率要比不碎土镇压的苗床高20%左右, 而免耕的出苗率相比较其他苗床稍微偏低。采用传统苗床时, 苗床须平整、紧实、均一, 种植前应将苗床表层农作物及杂草残落物清理干净, 播种后碎土镇压, 使柳枝稷种子与土壤良好接触, 提高建植成功率。实际生产中具体采用何种方法, 要结合当地土壤环境, 免耕播种比较适用于斜坡或是水土流失严重地区^[27]。

2.2 品种选择

对特定地区来说, 选育最适合的柳枝稷品种, 需充分考虑其在该地的产量、品质和抗逆性表现^[4]。高地品种较低地品种耐旱耐冷, 但生物量潜力较低^[28]。柳枝稷是一种光敏感型植物, 只有种植在与其起源地纬度相近地才能获得高产^[29]。起源于北方的品种种植在南方, 产量会下降^[8], 而起源于南方的品种种植在北移不超过480 km范围内, 却能表现更高的生物量, 这主要是因为推

基金项目: 国家重点研发计划项目课题(2016YFC0501703)。

作者简介: 黄瑾(1971-), 女, 四川安岳人, 实验师, 从事牧草引种和选育方面的工作。

通信作者: 高志娟(1988-), 女, 山西临汾人, 博士, 主要从事植物生理生态适应性研究。E-mail: gaozhijuan@caas.ac.cn

迟了其开花期, 延长其营养生长期^[30]。对比研究发现, 低地品种如Alamo和Kanlow能更好适应于中纬和南纬地区; 高地品种, 如Cave-in-Rock、Sunburst、Forestberg则在中纬和北纬地区生长良好^[31]。此外, 通过基因育种培育新品种, 如低地品种EG1101、EG1102和高地品种EG2101(分别为Alamo、Kanlow和Cave-in-Rock的改良品种), 比原品种生物量高出约20%, 成为首批用于生产的商业化品种^[25]。概括而言, 实际利用中尽可能选择低地品种, 或使南方品种适当北移, 以延长生长期和提高产量。

2.3 种子休眠破除

柳枝稷种子属于深度休眠类, 种子质量差、休眠和发芽率低是影响柳枝稷苗期建植成功与否的关键因素。新收获的柳枝稷种子具有深度休眠性, 播种需要利用自然状态下至少贮藏2年的种子, 或可选择在冬末春初利用土壤本身的冷湿环境打破休眠播种。在室温条件下储存一年以上其休眠程度显著减弱。研究发现, 储存超过4年柳枝稷种子活力也显著降低^[25]。关于柳枝稷种子的休眠机制尚不完全清楚^[32, 33]。Duclos等(2009)认为种皮是引起柳枝稷种子休眠的主要原因^[32]。种子干藏、擦种, 浸泡均对破除柳枝稷种子休眠有不同程度的作用, 其中以湿润冷冻层化最有效^[34]。湿润冷冻层化有两种: 一是人为使种子预先在一个寒冷潮湿的环境中经历2周的冷冻层化作用, 并储存到播种时期, 需要注意的是, 经过冷冻层化作用处理的种子必须种植在一个温暖、潮湿的苗床中, 否则可能会使破除休眠的种子再次进入休眠^[35]。二是通过自然冷冻层化作用, 在一些寒冷地区的11月份或是12月份进行免耕播种, 通过土壤的湿冷环境使种子经历一个自然的冷冻层化作用打破休眠^[35]。

2.4 播种管理

影响柳枝稷种子萌发的自然因素主要包括地理位置、土壤水分和温度等, 以此来确定合适的播种量、播种时间, 播种深度及行距等。Mooney等(2009)^[36]在美国田纳西州研究发现, 相对其他因素, 播种量对柳枝稷产量影响不显著。West等(2011)^[37]对比四种(4.48、6.72、8.96和11.2kg·hm⁻²)播种量, 发现4.48kg·hm⁻²播种量仅在建植当年产量最低, 其后与其他播种量无显著差异, 并认为该播种量完全可以实现柳枝稷的成功建植。低播种量虽可建植成功, 但较高的播种量能够确保苗数和密度, 是实现高产的基础。一般推荐柳枝稷的平均播种量为5.6kg·hm⁻², 土壤肥沃地区可低至2.24 kg·hm⁻², 而贫瘠恶劣地区可高达11.2kg·hm⁻²^[38]。实际上, 播种量的确定不仅要考虑当地自然环境条件, 还要考虑种子休眠性(即发芽率), 适当高播种量利于出苗率和成功率。

当苗床表层土壤温度在10℃以上, 并且存在少量水分时为最佳播种时期, 水分过多或苗床过干均可降低柳枝稷种子发芽率^[39]。在欧洲北部, 播种时间一般在每年的四月末或五月份^[40]。当柳枝稷种子种龄不足一年, 且没有经过冷冻层化处理, 可在每年11月中旬到4月中旬播种, 以通过自然冷冻层化作用打破种子休眠提高发芽率^[36]。在我国西北地区, 早春4月份土壤温度较低, 表层土壤易干燥, 此时播种需适当覆膜, 以提高土壤温度, 促进种子萌发。若选择在雨季前的7月份播种, 可采用干草等覆盖保存水分和避免高温灼烧, 且播前适当灌溉均能显著提高种子出苗率^[40]。

柳枝稷播种深度需综合品种、土壤类型和环境因子确定。Berti等(2013)^[41]分别对比了4种(13、19、30、38mm)播种深度下柳枝稷出苗率得出, 播种深度为13mm时种子出苗率最高(80%), 当超过13mm时, 出苗率随播种深度增加而降低; 同时在室内比较了3种土壤类型及0~64mm间7种不同的播种深度发现, 播种深度对柳枝稷出苗率影响不显著, 在黏质土壤中出苗率最高, 认为在粗糙质地土壤中柳枝稷播种深度为13mm。在我国半干旱地区, 浅播(10~20mm)较深播(30~40mm)出苗率更高^[40]。

关于播种行距对柳枝稷生物量的影响, 有研究发现, 当行距从15cm增加到61cm时, 柳枝稷生物量变化对行距变化并不敏感^[42]。Muir等(2001)^[43]从窄到宽的四种行距(25、50、75、100cm)实验表明, 种植行距从宽到窄柳枝稷的产量依次增加。就建植当年来说, 窄行距较宽行距更利于柳枝稷迅速形成冠层, 以及有效控制杂草生长^[40]。在黄土高原半干旱区, 实行窄行播种不仅可以迅速形成冠层控制杂草生长, 而且在降低土壤水分蒸发和保证植物群丛生物量方面要优于宽行距^[10]。建植成功后, 行距不是影响柳枝稷生物量的关键因素, 因此也存在自疏行为^[44]。

2.5 肥料管理

柳枝稷对肥料的要求不高, 但合理的施肥有利于提高生物量产量和改善品质等。研究发现, 柳枝稷氮肥利用效率很高, 其氮肥施用量为玉米的1/3~1/2, 对P、K肥反应不敏感, 在建植期间, 一般不需要施用P肥和K肥, 除非含量低于正常水平(K肥低于202kg·hm⁻², P肥低于22kg·hm⁻²)^[25]。关于柳枝稷生物量对于氮肥施用的响应, 前人做了大量研究, 但这些研究结果不尽相同, 主要是因为影响氮肥的因素很多, 如栽培品种、收割次数与时间、土壤类型等等^[43-45]。当柳枝稷用作能源植物生产时, 因主要在生长末期收获, 这时茎部及叶片中的氮会通过体内循环转移到根部, 需要补充额外氮肥较少^[33]。当柳枝稷用作饲草生产时, 一般要在生长早期进行收获, 这样会从土壤中转移较多的营养元素, 需要在夏初到夏中补施氮肥。一般认为, 建植当年不需施用氮肥, 因为这会促使杂草生长, 导致建植失败^[46]。在美国东南部地区, 种植在壤土、淤泥、黏土或每年一次收割, 从建植第二年起, 为保证产量每年需施56~112kg·hm⁻²氮肥; 当种植在浅滩、地表侵蚀等粗质土壤或中或二次收割时, 氮肥用量需超过112kg·hm⁻², 且为避免一次施肥过多造成烧苗, 分施较好^[47, 48]。

2.6 杂草与病虫害防治

有效的田间杂草管理对柳枝稷生产非常必要。在建植当年, 由于柳枝稷竞争能力很弱, 杂草的良好控制与否, 会显著影响柳枝稷草地的建植^[49-50]。研究发现, 在柳枝稷建植前一年, 通过种植先前作物如小米和高粱, 可明显抑制一些暖季节型杂草生长^[37]。利用化学除草剂能显著提高柳枝稷建植成功率: 如2-4D能显著抑制双子叶草类生长^[52], 阿特拉津能显著抑制阔叶草及C₃等冷季节型杂草生长, 但其对暖季节型杂草影响甚微^[53, 54]。Mitchell等(2010)^[55]播种后施用不同类型除草剂对比发现, 甲咪唑烟酸对柳枝稷有一定毒害作用, 不能用作柳枝稷建植时防治杂草的方法, 而快杀稗和阿特拉津联合使用, 不仅可使柳枝稷建植成功, 而且可获得最高生物量。当柳枝稷免耕播种时, 可在播前或出苗前使用除草剂甘草磷, 能显著降低杂草生长^[56]。此外, 人工除草或对杂草进行修剪也能有效防治杂草, 但高度须大于柳枝稷幼苗高度, 不能够损伤柳枝稷叶片^[51]。焚烧也是控制杂草尤其是多年生杂草有效方法^[27]。由于柳枝稷对病虫害的抵抗能力很强, 一般不需要进行病虫害防治。

2.7 收获管理

对柳枝稷等能源作物来说, 收割次数的多少不仅影响其生物量还影响能源品质^[57]。Reynolds等(2000)^[58]研究发现二次收割较单次收割植株的矿质元素含量更高。Monti等(2008)^[59]研究了收割次数对高地和低地品种柳枝稷品种长期生产力影响, 结果发现, 二次收割只在建植前两年能够增加高地品种地上部分生物量, 对低地品种无显著影响, 但会降低柳枝稷后续年份的活力和生产潜力。一般认为, 二次收割对湿润和寒冷地区较为理想, 第一次收割于夏中或夏末进行, 第二次于秋季进行。一年一次收获对柳枝稷用作能源生产最合适, 收获时间一般在首次霜降后一个月左右进行^[60]。适当的延迟收割不仅能保证高产的同时, 也能显著降低其含水量以减少收割和干燥成本, 还能降低生物灰分含量, 改善燃烧品质和提高燃烧效率^[61]。霜降后, 推迟收获时间会

造成生物量显著降低^[62]。因此,生产中应根据不同品种的枯黄时期和最终利用目的来确定最佳收割时间。

适宜的留茬高度能够促进禾草分蘖与再生,保证产草量和改善营养价值。留茬过低会损害到牧草冠层结构,降低次年再生,其原因是高留茬一方面能够相对增加地表粗糙度,有效降低近地表风速,对于防止坡地水土流失具有明显的蓄水保墒效果。一般认为,不论采用何种收获制度,柳枝稷留茬高度不得低于15cm^[25]。这不仅可避免损坏收获机械,还可在冬季截获雪保留水分,降低土壤侵蚀,且适当留茬还可使柳枝稷茎基部保存一定氮素和糖类,为来年再生长奠定营养物质条件。

3 结论与展望

利用边际土地发展生物质燃料可有效避免与粮争田、与人争粮的矛盾,是目前发展生物量新能源最为可行的方式之一。据统计,我国有可以直接利用的荒山、荒坡和盐碱地等边际土地约260万hm²^[63]。若将这些边际土地种植像柳枝稷这样水肥需求量少、生产和维护成本低、持续时间长的抗逆能源植物,将可以最大限度地利用土地资源,促进区域生态改善。

黄土高原半干旱地区特殊的自然地理环境和土壤类型,以及不合理的土地开发利用等,使其成为我国严重的水蚀与荒漠化地区之一。柳枝稷既可作为牧草,也可作为水土保持和风障植物。合理利用柳枝稷不仅能够丰富和拓宽该地区的牧草种质资源,还能发挥区域生产潜力和起到防治水土流失和荒漠化的功能^[64, 65]。柳枝稷强大的根系,良好的生产性能和适应性使得柳枝稷具有较强竞争力。因此,在利用过程中,需要针对区域环境条件,围绕品种适应性、资源有效性与生物入侵性开展合理的利用途径,以及配套的栽培措施,以提高利用的针对性和降低生态风险性^[16]。

参考文献

- Wright L, Turhollow A. Switchgrass selection as a "model" bioenergy crop: a history of the process[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2010, 34 (6): 851-868.
- Liebig M A, Schmer M R, Vogel K P, et al. Soil carbon storage by switchgrass grown for bioenergy[J]. *Bioenergy Research*, 2008, (1): 215-222.
- Dewald C L, Henry J, Bruckerhoff S, et al. Guidelines for the establishment of warm-season grass hedges for erosion control[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 51 (1): 16-20.
- Saderson M A, Reed R L, McLaughlin S B, et al. Switchgrass as a sustainable bioenergy crop[J]. *Bioenergy Technology*, 1996, 56 (1): 83-93.
- Tulbure M G, Wimberly M C, Boe A, et al. Climatic and genetic controls of yields of switchgrass, a model bioenergy species[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 146: 121-129.
- Lewandowski I, Scurlock J M, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 25 (4): 335-361.
- Sanderson M A, Reed R L, Ocumpaugh W R, et al. Switchgrass cultivars and germplasm for biomass feedstock production in Texas[J]. *Bioresource Technology*, 1999, 67 (3): 209-219.
- Jensen K, Clark C D, Ellis P, et al. Farmer willingness to grow switchgrass for energy production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, (31): 773-781.
- Roth A M, Sample D W, Ribic C A, et al. Grassland bird response to harvesting switchgrass as a biomass energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 2005, 28 (4): 490-498.
- Piscioneri I, Pignatelli V, Palazzo S, et al. Switchgrass production and establishment in the Southern Italy climatic conditions[J]. *Energy (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net*
- Conversion and Management, 2001, 42 (18): 2071-2082.
- Elbersen H W, Christian D G, Bassem N E, et al. Switchgrass variety choice in Europe[J]. *Aspects of Applied Biology*, 2001, (65): 21-28.
- 徐炳成, 山仑, 李凤民. 黄土丘陵半干旱区引种禾草柳枝稷的生物量与水分利用效率[J]. *生态学报*, 2005, 25 (9): 2206-2213.
- 李代琼, 刘国彬, 黄瑾, 等. 安塞黄土丘陵区柳枝稷的引种及生物生态学特性试验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1999, 5 (专刊): 125-128.
- 徐炳成, 山仑, 黄瑾. 柳枝稷和白羊草苗期水分利用与根冠比的比较[J]. *草业学报*, 2003, 12 (4): 73-77.
- Xu B C, Li F M, Shan L, et al. Gas exchange, biomass partition, and water relationships of three grass seedlings under water stress[J]. *Weed Biology and Management*, 2006, (6): 79-88.
- Xu B C, Li F M, Shan L. Switchgrass and milkvetch intercropping under 2: 1 row-replacement in semiarid region, northwest China: Aboveground biomass and water use efficiency[J]. *European Journal of Agronomy*, 2008, (28): 485-492.
- 徐炳成, 山仑, 黄占斌, 等. 黄土丘陵区柳枝稷光合生理生态特性的初步研究[J]. *西北植物学报*, 2001, 21 (4): 625-630.
- Ma Z, Wood C W, Bransby D I. Impacts of soil management on root characteristics of switchgrass[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, 18 (2): 105-112.
- Ma Y Q, An Y, Shui J F, et al. Adaptability evaluation of switchgrass (*Panicum virgatum* L.) cultivars on the Loess Plateau of China[J]. *Plant Science*, 2011, 18 (1): 638-643.
- Smart A J, Moser L E, Vogel K P. Morphological characteristics of big bluestem and switchgrass plants divergently selected for seedling tiller number[J]. *Crop Science*, 2004, (44): 607-613.
- Porter C L. An analysis of variation between upland and lowland switchgrass (*Panicum virgatum* L.) in Central Oklahoma[J]. *Ecology*, 1966, 47 (6): 980-992.
- Hulquist S J, Vogel K P, Lee D J, et al. Chloroplast DNA and nuclear DNA content variations among cultivars of switchgrass, *Panicum virgatum* L.[J]. *Crop Science*, 1996, (36): 1049-1052.
- Martinez-Reyna J M, Vogel K P. Incompatibility systems in switchgrass[J]. *Crop Science*, 2002, (42): 1800-1805.
- Mitchell R B, Vogel K P. Germination and emergence tests for predicting switchgrass field establishment[J]. *Agronomy Journal*, 2012, 10 (4): 458-465.
- Wolf D D, Fiske D A. Planting and managing switchgrass for forage, wildlife and conservation [M]. Virginia: Virginia Cooperative Extension Publication, 1995: 418-423.
- Xu J, Cheng J J. Pretreatment of switchgrass for sugar production with the combination of sodium hydroxide and lime[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102 (4): 3861-3968.
- Monti A, Venturi P, Elbersen H W. Evaluation of the establishment of lowland and upland switchgrass (*Panicum virgatum* L.) varieties under different tillage and seedbed conditions in northern Italy[J]. *Soil & Tillage Research*, 2001, (63) 75-83.
- Alexopoulou E, Sharma N, Papatheoharic Y, et al. Biomass yields for upland and lowland switchgrass varieties grown in the Mediterranean region[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2008, (32): 926-933.
- Benedict H M. Effect of day length and temperature on the flowering and growth of four species of grasses[J]. *Journal of Agriculture Research*, 1940, (61): 661-672.

- [30] Casler M D, Vogel K P, Taliaferro C M, et al. Latitudinal adaptation of switchgrass populations[J]. *Crop Science*, 2004, (44): 293-303.
- [31] McLaughlin S B, Kszos L A. Development of switchgrass (*Panicum virgatum*) as a bioenergy feedstock in the United States[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2005, (28): 515-535.
- [32] Duclos D V, Ray D T, Taylor A G. Understanding the physiology and mechanism of seed dormancy in switchgrass (*Panicum virgatum* L.) [C]. 21st Annual AAIC Meeting—The Next Generation of Industrial Crops, Processes, and Products. Chile: Chillan, 2009.
- [33] Sarath G, Bethke P C, Jones R, et al. Nitric oxide accelerates germination in warm-season grasses[J]. *Planta*, 2006, 22 (3): 1154-1164.
- [34] 谢正苗. 柳枝稷种子休眠的回复与破除[J]. *种子*, 1997, (1): 57-59.
- [35] Shen Z X, Parrish D J, Wolf D D, et al. Stratification in switchgrass, seeds is reversed and hastened by drying[J]. *Crop Science*, 2001, (41): 1546-1551.
- [36] Danielf M, Rolandk R, Burton E, et al. Yield and breakeven price of 'Alamo' switchgrass for biofuels in Tennessee[J]. *Agronomy Journal*, 2009, 10 (15): 1234-1242.
- [37] West D R, Kincer D R. Yield of switchgrass as affected by seeding rates and dates[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2011, (35): 4057-4059.
- [38] Dhar B R, Youssef E, Nakhla G, et al. Pretreatment of municipal waste activated sludge for volatile sulfur compounds control in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 2011, 10 (2): 3776-3782.
- [39] Aiken G E, Springer T L. Seed size distribution, germination, and emergence of six switchgrass cultivars. *Journal of Range Management*, 1995, 48 (5): 455-458.
- [40] Fan J W, Du Y L, Turner N C, et al. Germination characteristics and seedling emergence of switchgrass with different agricultural practices under arid conditions in China[J]. *Crop Science*, 2012, 5 (2): 2341-2350.
- [41] Berti M T, Johnson B L. Switchgrass establishment as affected by seeding depth and soil type[J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 4 (1): 289-293.
- [42] Wullschleger S D, Davis E B, Borsuk M E, et al. Biomass production in switchgrass across the United States: Database description and determinants of yield[J]. *Agronomy Journal*, 2010, 10 (2): 1158-1168.
- [43] Muir J P, Sanderson M A, Ocumpaugh W R, et al. Biomass production of 'Alamo' switchgrass in response to nitrogen, phosphorus, and row spacing[J]. *Agronomy Journal*, 2001, 9 (3): 896-901.
- [44] 杨新国, 曲文杰, 宋乃平. 柳枝稷无性分株种群的密度依赖调节机制[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43 (4): 171-178.
- [45] Vogel K P, Brejda J J, Walters D T, et al. Switchgrass biomass production in the Midwest USA: Harvest and Nitrogen Management[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 9 (4): 413-420.
- [46] Fike J H, Parrish D J, Wolfe D D, et al. Long-term yield potential of switchgrass for biofuel systems[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2006, (30): 198-206.
- [47] Lemus R, Parrish D J, Wolfe D D. Nutrient uptake by 'Alamo' switchgrass used as an energy crop[J]. *Bioenergy Research*, 2009, 2 (2): 37-50.
- [48] Lemus R, Parrish D J, Abaye O. Nitrogen use dynamics in switchgrass grown for biomass[J]. *Bioenergy Research*, 2008, 1: 153-162.
- [49] Mitchell R B, Vogel K P, Sarath G. Managing and enhancing switchgrass as a bioenergy feedstock[J]. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2008, (2): 530-539.
- [50] Schmer M R, Vogel K P, Mitchell R B, et al. Establishment stand thresholds for switchgrass grown as a bioenergy crop[J]. *Crop Science*, 2006, 4 (6): 157-161.
- [51] Buhler D D, Netzer D A, Riemenschneider D E, et al. Weed management in short rotation poplar and herbaceous perennial crops grown for biofuel production[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1998, (14): 385-394.
- [52] Denchev P D, Conger B V. In vitro culture of switchgrass: Influence of 2, 4-d and picloram in combination with benzyladenine on callus initiation and regeneration[J]. *Plant Cell Tissue & Organ Culture*, 1995, 40 (1): 43-48.
- [53] Bahler C C, Vogel K P, Moser L E. Atrazine tolerance in warm-season grass seedlings[J]. *Agronomy Journal*, 1984, 7 (6): 891-895.
- [54] Martin A R, Moomaw R S, Vogel K P. Warm-season grass establishment with atrazine[J]. *Agronomy Journal*, 1982, 7 (4): 916-920.
- [55] Mitchell R B, Vogel K P, Berdahl J, et al. Herbicides for establishing switchgrass in the central and northern great plains[J]. *Bioenergy Research*, 2010, (3): 321-327.
- [56] Sanderson M A, Schnabel R R, Curran W S, et al. Switchgrass and big bluestem hay, biomass, and seed yield response to fire and glyphosate treatment[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 9 (6): 1688-1692.
- [57] Waramit N, Moore K J, Fales S L. Forage quality of native warm-season grasses in response to nitrogen fertilization and harvest date[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2012, 174 (1): 46-59.
- [58] Reynolds J H, Walke C L, Kirchner M J. Nitrogen removal in switchgrass biomass under two harvest systems[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2000, (19): 281-286.
- [59] Monti A, Bezzi G, Pritoni G, et al. Long-term productivity of lowland and upland switchgrass cytotypes as affected by cutting frequency[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 9 (9): 7425-7432.
- [60] Parrish D J, Fike J H. The biology and agronomy of switchgrass for biofuels[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2005, (24): 423-459.
- [61] Miles T R, Miles T R, Baxter L L, et al. Boiler deposits from firing biomass fuels[J]. *Biomass and Bioenergy*, 1996, 10: 125-138.
- [62] Adler P R, Sanderson M A, Boateng A A, et al. Biomass yield and biofuel quality of switchgrass harvested in fall or spring[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 9 (8): 1518-1525.
- [63] 寇建平, 毕子运, 赵立欣, 等. 中国宜能荒地资源调查与评价[J]. *可再生能源*, 2008, 26 (6): 3-9.
- [64] Cooney D, Kim H, Quinn L, et al. Switchgrass as a bioenergy crop in the Loess Plateau, China: Potential lignocellulosic feedstock production and environmental conservation[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (6): 1211-1226.
- [65] Gao Z J, Liu J B, An Q Q, et al. Photosynthetic performance of switchgrass and its relation to field productivity: A three-year experimental appraisal in semiarid Loess Plateau[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16 (6): 1227-1235.