

何琳, 祝其丽, 王彦伟, 何明雄, 谭芙蓉. 多年生禾草皇竹草的综合利用研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (3): 705-712

He L, Zhu QL, Wang YW, He MX, Tan FR. Advances in research on the comprehensive utilization of a perennial grass *Pennisetum hybridum* [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2020, 26 (3): 705-712

多年生禾草皇竹草的综合利用研究进展

何琳^{1,2} 祝其丽² 王彦伟² 何明雄² 谭芙蓉²✉

¹成都大学药学与生物工程学院 成都 610106

²农业部沼气科学研究所 成都 610041

摘要 因具有高产、速生、抗逆性强等生物学特性,被选作环境修复材料、优质饲草以及能源植物的皇竹草 (*Pennisetum hybridum*) 近年来备受关注. 对国内外皇竹草在生态环境、畜禽饲料、清洁能源等领域的研究进展及应用情况进行综述,为皇竹草生物质资源的综合利用提供参考. 已有研究表明,皇竹草在退化土壤修复、污水净化和入侵物种治理中均能发挥重要作用,可以高效富集土壤重金属、去氮除磷、取代外来入侵物种等. 青饲、干草、氨化和青贮是皇竹草饲料化利用的主要方式,其中青贮利用可均衡营养,缓解冬春饲料短缺. 通过热解燃烧、沼气发酵和乙醇发酵可实现皇竹草向生物能源的转化,生物量和纤维含量是影响其能源利用潜力的关键,也是制作纤维板、纳米纤维素膜、食用菌培养基的基础. 最后分析皇竹草研究目前存在的问题,强调未来应注重优化工艺技术,拓展皇竹草生物质资源综合利用途径,并提出环境修复材料皇竹草在收获后可作为优质饲草、能源植物以及其他工业原料加以利用,产生的废渣可加工为有机肥的一种综合利用模式. (图2 表3 参80)

关键词 皇竹草; 综合利用; 生态治理; 饲料化; 能源化

Advances in research on the comprehensive utilization of a perennial grass *Pennisetum hybridum*

HE Lin^{1,2}, ZHU Qili², WANG Yanwei², HE Mingxiong² & TAN Furong²✉

¹ College of Pharmacy and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China

² Biogas Institute of Ministry of Agriculture, Chengdu 610041, China

Abstract Because of its biological characteristics of large biomass, fast growth, and strong resistance, *Pennisetum hybridum* has raised public concern in recent years. In this review, the recent advances and applications of *P. hybridum* in the fields of ecological environment, livestock feedstuff, bioenergy, and other aspects are summarized, which could benefit the comprehensive utilization of *P. hybridum* biomass resources. The results demonstrated the importance of *P. hybridum* for remediating degraded soil, purifying sewage, and controlling invasive species; therefore, heavy metals, nitrogen and phosphorus, and invasive species can be effectively removed by *P. hybridum*. The main approaches for forage utilization are green fodder, hay, ammonification, and ensiling. Among these, ensiling achieves a balanced nutrition and alleviates deficiencies in livestock during spring and winter. Pyrolysis and combustion, biogas fermentation, and bioethanol fermentation convert *P. hybridum* to bioenergy. Biomass and cellulose content are the key factors affecting the energy utilization potential and are the basis for developing fiberboard, nanocellulose membrane, and edible fungus culture medium. Finally, this study analyzed the existing problems in current studies, emphasizing the optimization of technology and expanding the utilization approaches of *P. hybridum* biomass resources in the future. A comprehensive utilization mode of biomass resource of *P. hybridum* was introduced, including using this harvested environmental phytoremediation material as a high-quality forage, energy plant, as well as a source of other industrial products, thus changing waste residue into organic fertilizer.

Keywords *Pennisetum hybridum*; comprehensive utilization; ecological restoration; forage preparation; bio-energy conversion

收稿日期 Received: 2019-06-04 接受日期 Accepted: 2019-07-25

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (Y2018PT69, 12017206030202212) 资助 Supported by the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution of China (Y2018PT69, 12017206030202212)

✉通讯作者 Corresponding author (E-mail: furong987@126.com)

过度的化石燃料开采导致能源危机、环境污染等问题日益凸显。近年来,世界各国在开发可替代化石燃料的环境友好型新能源方面不断突破壁垒,逐步从第一代生物能源进阶到第二代生物能源。第二代生物能源以木质纤维素为原料,能从根本上克服第一代生物能源“与民争粮,与粮争地”的不足^[1]。自然界中木质纤维素来源广泛,种类多样,能源植物兼具可再生、低成本、益农和持续稳定等优点,在未来能源产业发展中占明显优势^[2]。鉴于速生、高产、适应性广等生物学特性,皇竹草近年来被用作能源植物倍受关注。

皇竹草(*Pennisetum hybridum*)是由美洲狼尾草和象草(*P. americanum* × *P. purpureum*)杂交而成的高产优质牧草,外形和生长似甘蔗,因此也称杂交狼尾草、甘蔗草、王草等^[3]。我国最早于1982年从哥伦比亚国际热带农业中心(编号CIAT6263)引种到海南岛,目前已在我国云南、四川、广东、海南、贵州、湖南、湖北等地推广种植(表1)。皇竹草兼具双亲优良性状,除了具有速生、高产、适应性广等特点外,还具有根系发达、供草期长、抗逆性强的特点^[4]。作为一种速生型的木质纤维素原料,皇竹草不止在能源行业表现突出,也作为环境修复材料、优质饲草被广泛利用。

目前国内外对皇竹草的研究主要集中在以下几个方面:皇竹草抗逆性及相关基因挖掘^[5],栽培管理措施对产量和饲草品质的影响^[6],生态环境的修复治理效应^[7],纳米纤维结构的开发利用^[8],生物能源制备及其预处理技术^[9]等。基于皇竹草各方面的利用潜能,本文综述皇竹草在生态环境治理、饲料利用、能源开发等方面的应用和研究进展,分析存在的问题并提出一种皇竹草的综合利用模式,以实现皇竹草生物质资源的高值高效利用。

表1 1990-2009年我国各省份皇竹草种植情况(根据文献[4]总结)

Table 1 Cultivation status of *Pennisetum hybridum* in various provinces of China in 1990-2009 (revision after Zhang^[4])

地区 Region	种植面积 Cultivated area (A/10 ⁴ m ²)	鲜草产量 Fresh biomass (m/t m ²)
广东 Guangdong	1024	600
福建 Fujian	1053	450
云南 Yunnan	630	300-450
广西 Guangxi	279	-
海南 Hainan	390	375-675
四川 Sichuan	750	225-375
江西 Jiangxi	398	-
贵州 Guizhou	368	375-450
湖南 Hunan	348	375-450
重庆 Chongqing	120	225-300

1 皇竹草在生态环境治理方面的应用

皇竹草对生存环境要求低,在重金属污染、盐碱化以及水土流失等条件恶劣的地段均能存活。充分利用皇竹草在耐旱、耐瘠、耐盐、耐酸、抗倒伏等方面的优良特性,既能改善区域生态环境,又能充分发挥退化土壤的生产潜力,具有重要的现实意义。

1.1 重金属污染土壤的修复

高生物量的特点在很大程度上决定了皇竹草在应用于重金属污染土壤时修复潜力较大^[10]。在同等种植条件下,皇竹草的Cu去除率是伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou sp. nov.)的12倍^[10],Cd提取量分别是龙

葵(*Solanum nigrum* L.)和遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens* L.)的3.5倍和2.6倍,Zn富集量与东南景天(*Sedum afredii* Hance)相当^[11]。在10 mmol/L Mn胁迫下,皇竹草叶片Mn含量为1 904-13 518 mg/kg,转移系数为1.35-3.5^[12]。在0.5-100 mg/kg Cd的环境中,皇竹草的Cd富集效率为每株0.22-1.86 mg^[13-14]。并且,Ma等在研究中指出皇竹草和改良剂(磷石膏、污染废弃物和食用菌)的共同作用对赤泥有显著改善效果^[15]。以城市污泥或畜禽粪污作为栽培基质为皇竹草生长提供养分,同时种植过皇竹草的城市污泥、鸡粪可直接进行燃烧或填埋处理,实现了污染物减量化^[16-17]。由于自身的调节机制能产生可溶性糖和脯氨酸类渗透调节物质缓解胁迫^[18],在高浓度的重金属胁迫下,皇竹草植株并未出现肉眼可见的损伤^[14]。诸多研究显示,皇竹草是一种Mn的超累积植物^[12],也是Zn、Cu、Pb、Cd、As、Ni的耐性植物,对Cr耐性较差^[19]。经研究证明,皇竹草两年时间对尾矿砂废弃物的重金属离子去除率在12%-26%不等^[7]。包红旭等公开了一种生物质碳协同蚯蚓和狼尾草联合修复肥沃铬渣场地的方法,环境友好的同时实现了废物资源的回收再利用^[20]。梅娟利用皇竹草和改良剂对我国广西大环江流域的铅锌尾矿砂污染农田进行了联合治理,发现种植皇竹草后仅需12.6年、1.2年、2.4年可将土壤Pb、Cd、Zn这3种重金属含量降低到我国土壤环境质量二级标准,并且种植的皇竹草饲喂肉牛或其他动物安全可行^[21]。

适宜的栽培管理措施能有效提高皇竹草生物量从而达到更好修复效果。Ishii等在研究中指出2次/年的刈割频率能使土壤镉含量下降4.6%,镉富集量比刈割频率为1次/年的有所提升^[22]。与有机酸及螯合物相比,氮肥(氨氮效果最佳)对于提高皇竹草的富集效果尤其明显,并对土壤中的菌群更加友好^[23]。可能是由于耐镉细菌特有的机制能活化位于细菌胞壁和胞外的重金属^[24-25],经耐镉细菌*Micrococcus* sp.和*Arthrobacter* sp.处理后的皇竹草在6个月后镉累积量比未处理组分别提高了1.5倍和1.4倍^[26]。但也有研究者提出耐镉细菌是通过提高植株生物量发挥作用,镉含量并未发生变化^[27]。作者所在课题组通过探究不同镉胁迫条件下增施沼液对皇竹草的影响,结果发现适当用量的沼液能够对皇竹草生长和镉污染土壤的修复起到促进作用,其原因可能是沼液中氮肥和其他微量元素起了作用,也不排除沼液中有益菌群存在的可能(结果待发表)。

1.2 盐渍化土壤的修复

盐碱显著抑制皇竹草光合速率、叶绿素含量以及可溶性糖含量等,是困扰农业生产的一大难题^[28-29]。皇竹草耐盐阈值为0.57%(约100 mmol/L),100 mmol/L的盐分浓度便会导致皇竹草地上部鲜重和干重降低50%^[4]。Na⁺主要贮存在皇竹草根部位,只有微量的Na⁺能被转移到地上部最后在新叶排出^[30-31]。在盐碱条件下,硝酸盐(5 mmol/L NO³⁺-N)、钾素(6 mmol/L)以及象草的内生菌(*Sphingomonas*, *Pantoea*, *Bacillus*, *Enterobacter*)等对于维持细胞稳态、强化皇竹草的耐盐性至关重要^[31-32]。已有资料显示,种植在我国广东珠海斗门区、上海奉贤海湾地区以及江苏沿海等盐渍化区域的皇竹草均长势良好^[33]。目前作者所在课题组已在新疆昌吉盐碱地成功试种皇竹草并产生可观生物量,皇竹草在该地区表现出超强的分蘖能力并且伏低生长,初步分析可能与该地区特有的气候和环境条件有关。

1.3 水土流失地区的治理

由于不合理的人类活动加上特殊的地理气候条件,我国

西南地区水土流失情况严重. 在水土流失地区种植皇竹草, 不仅其根系能有效改善土壤结构, 增强土壤保水蓄水能力, 而且其枝叶也对水流侵蚀有阻挡作用, 对于改善退化地区土壤团粒结构, 减少水土流失, 提高植被恢复率有明显效果^[34-35]. 在皇竹草和其他物种的协同作用下, 我国贵州省花江示范区植被覆盖率在5年内增加了15.35%, 土壤侵蚀模块下降了51.2%^[33].

1.4 人工湿地的水体净化

作为一种极度耐旱的植物, 皇竹草的适水性较广, 长期水淹虽然会导致皇竹草品质和产量下降, 同时也刺激皇竹草产生更多的气腔, 并在茎节部长出大量须根来保障皇竹草在逆境中继续生存^[36]. 所以, 在低氧高铵 ($\text{NH}_4^+ 5 \text{ mmol/L}$) 环境中, 皇竹草仍然可以持续吸收 CO_2 ^[37-38]. 通过过滤、截留及强化对有机物的分解转化作用, 皇竹草对废水的生化需氧量和凯氏氮的去除率高达70%, 在提高酶活、去除水体污染物、降解有机质以及防治水体富营养化等方面效果显著^[16].

1.5 入侵物种的替代控制

紫荆泽兰、豚草、飞机草等都是严重危害我国自然环境、作物生存的入侵物种. 通过构建植物间的相互竞争, 在入侵区域种植块状或带状的皇竹草而形成的天然屏障可减弱外来物种的生长势, 有效抑制入侵物种的生长和繁殖^[4].

2 皇竹草饲料化利用

皇竹草叶片柔软, 脆嫩多汁, 富含氨基酸、矿物质和维生素等多种营养物质, 是一种适合饲喂牛、羊、兔等草食畜禽的优质青饲料^[39]. 如表2所示, 皇竹草粗脂肪含量和灰分含量高于高粱, 粗蛋白含量高于玉米, 具有较高的营养价值; 无氮浸出物和粗纤维处于较低水平, 有利于提高畜禽消化率.

随成熟度的增加, 皇竹草叶片表皮出现刚毛, 细胞壁木质化程度提高, 粗蛋白含量下降, 处于生长后期的皇竹草适口性、消化率和营养价值均下降^[40]. 皇竹草抗寒性较差, 在我国主要为一年生饲草栽培^[5]. 皇竹草饲料化利用方式主要是干草、青饲、氨化、青贮^[4]. 在利用过程中应充分把握皇竹草在各生长时期营养成分、适口性以及生物产量等方面的差异, 优化栽培管理措施和饲喂标准, 以实现营养价值和资源利用最大

化. 青贮利用不仅均衡营养、提高适口性, 还能缓解冬春季节饲料资源短缺. 良好的青贮品质对原料含水量、化学成分以及无氧等条件要求严格. 新鲜的皇竹草含水量高达80%, 并且单独微贮易生成乙酸, 在实际生产过程常采用凋萎、添加剂或混合青贮等手段进行改进^[41]. 直接添加乳酸菌改善青贮品质是一种行之有效的办法^[42]. 酵母主要通过耗氧抑制梭状芽孢杆菌的生长, 促进乳酸菌生长发挥作用^[43]. 共发酵能合理调节青贮营养成分和水分含量, 实现有机酸产物以乳酸为主^[41]. 杨丁等提出一种利用皇竹草、玉米秸秆或稻草、玉米粉以及食盐按不同比例共同青贮的方法能显著提高皇竹草的青贮效率和营养品质^[44].

3 皇竹草能源化利用

木质纤维素通过燃烧发电、致密成型、沼气发酵和乙醇发酵等途径实现向清洁能源转化, 细胞壁的组成和生物产量是影响木质纤维素能源利用潜力的关键因素^[47]. 植物在各个时期细胞壁的化学成分含量差异较大, 但皇竹草胞腔小于玉米秸秆, 意味着相同水解条件下纤维素酶水解效率更高, 更有利于后续发酵产能^[48]. 皇竹草是一种高光效 C_4 植物, 干物质年产量为60-80 t/hm², 明显高于柳枝稷和芒草(表3). 并且, 皇竹草广泛适应于盐碱地、矿区以及水土流失等土壤退化地区, 完全符合能源植物“不与人争粮、不与粮争地”的发展原则.

3.1 皇竹草热解燃烧

皇竹草茎叶直接燃烧可释放热量14 144.69 kJ/kg和15 845.87 kJ/kg, 产电10 000 kWh需提供30%含水量的皇竹草10.925 t和能量6 659.430 MJ^[62]. 我国昆明地区皇竹草冬季总能含量17 646 J/g, 每公顷可生产优质木炭30 t或沼气45 m³^[4]. 英国已建成基于象草发电的发电站, 该发电站产生的电能可为2 000个家庭供电^[4]. 在政府大力推广下, 皇竹草已成为泰国地区90 MW生物质发电站的主要燃料^[19]. 在流态化燃烧过程中, 升高床层温度可明显缩短皇竹草失流时间^[19]. 皇竹草热解固定碳燃烧放热量大于挥发分燃烧放热量^[4], 萃取物、纤维素、半纤维素和木质素在温度为478 K、543 K、600 K、600 K时热解^[64]. 可能是皇竹草生物炭结构中C—O、C—C/C—H和C—O/C—OH官能团对金属离子存在配位作用和吸附

表2 皇竹草 (*Pennisetum hybridum*) 与常见粗饲料营养成分比较
Table 2 Nutrient components of *Pennisetum hybridum* and commom roughage

粗饲料名称 Feed name	粗蛋白(w%) Crude protein	粗脂肪(w%) Ether extract	粗纤维(w%) Crude fibre	无氮浸出物(w%) Nitrogen free extract	灰分(w%) Ash	参考文献 Reference
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	10.92 ± 0.17	4.34 ± 0.05	33.35 ± 0.57	34.79	16.06 ± 0.01	[45]
高粱 Sorghum	14.37 ± 0.01	3.74 ± 0.05	38.28 ± 0.14	50.48 ± 0.28	11.76 ± 0.02	[45-46]
玉米 Maize	7.35 ± 0.09	2.45 ± 0.01	35.15 ± 0.60	42.11 ± 0.70	10.70 ± 0.18	[45-46]
小麦 Wheat	2.49 ± 0.61	0.66 ± 0.08	42.14 ± 0.00	41.79 ± 0.34	5.82 ± 0.12	[46]
大豆 Soybean	2.93 ± 0.11	1.11 ± 0.13	49.75 ± 0.00	35.21 ± 0.09	4.30 ± 0.05	[46]
油菜 Rape	3.58 ± 0.05	0.37 ± 0.17	46.11 ± 0.25	31.57 ± 0.14	8.15 ± 0.13	[46]

表3 典型木质纤维素原料组成成分
Table 3 Yield and chemical composition of typical lignocellulose

木质纤维素 Lignocellulosic	产量(m/t hm ⁻²) Yield	纤维素(w%) Cellulose	半纤维素(w%) Hemicellulose	木质素(w%) Lignin	参考文献 Reference
皇竹草 <i>Pennisetum hybridum</i>	60-80	30-50	15-25	10-20	[49-50]
象草 Napier grass	40-50	40-50	20-40	10-25	[50-53]
柳枝稷 Switch grass	20-36	28-40	25-34	9-25	[50, 54]
芒草 Miscanthus	27-44	26-49	25-43	5-28	[50, 54-55]
玉米 Maize	7-21	27-40	25-34	9-15	[54, 56-57]
甘蔗 Sugarcane	17-33	35-45	25-32	16-25	[54, 58-59]
高粱 Sorghum	5-14	21-45	11-28	9-20	[54, 60-61]

作用^[65], 皇竹草生物炭能显著提高重金属污染土壤的电导率和pH, 降低土壤有效态重金属含量^[66].

3.2 皇竹草沼气化利用

沼气发酵(厌氧消化)能有效消纳环境中的农作物秸秆、畜禽粪便以及其他废弃物, 产生绿色无污染燃料. 调节初始pH在中性至弱碱性范围, 控制接种率20%-30%, 总固体(TS)浓度12%, 温度35℃有助于皇竹草沼气发酵^[67]. 生长周期为60 d的皇竹草产气率和产甲烷率为0.68 L/g VS和0.37 L/g VS, 可产沼气848.07-6 279.73 m³/hm²^[68].

采用批示中温厌氧消化工艺时, 皇竹草的产气率和产甲烷率分别为552和288 mL/g VS, 比相同生长周期下的柳枝稷高26%和24%, 这种产气率的差别与原料收获时组成成分的差异有关^[69]. 北京地区11月份的皇竹草C/N适宜(20%-30%), 具有较高的沼气发酵潜力^[70]. 皇竹草与畜禽粪便共发酵可有效调节物料碳氮平衡, 物料甲烷产率为119.01-297.43 mg/L VS, 甲烷含量为64.4%, 比皇竹草单独发酵时提高了24%-28.85%^[71-73]. 皇竹草共发酵产生的气体进行纯化后, CH₄含量从68.8%提高到89.35%, CO₂、O₂和H₂S含量从29.7%、0.1%和768 × 10⁻⁶降低到10.05%、0.02%和≤0.01 × 10⁻⁶, 符合泰国能源部门的要求, 可直接应用于汽车^[74].

3.3 皇竹草乙醇化利用

吴娟子等根据皇竹草细胞壁各组分含量、总量和木质纤维素乙醇产量随生长天数的变化规律推算, 生长期为83-173 d的皇竹草(对应干物质年产量为4.59-51.98 t/hm²)理论总乙醇产量应为1 300-16 347 L/hm²^[75]. 哥伦比亚地区的皇竹草干物质年产量为40-60 t/hm², 可年产乙醇12 616 L/hm²^[49]. 木质纤维素向燃料乙醇的转化是一个复杂、连续、动态的过程, 当原料乙醇转化效率为16.67%-32%时, 每6-12 t皇竹草仅生产1 t乙醇^[50].

3.4 皇竹草预处理技术

预处理可以高效破除皇竹草细胞壁表面的木质纤维素屏障作用, 提高后续酶解效率^[76]. 一般来说, 碱预处理能高效降解木质素, 而稀硫酸则主要对半纤维素发挥作用(图1). 最常用碱处理为氢氧化钠(NaOH), 条件是在35、55或121℃

温度下, 利用1%-10% (w) 的NaOH处理1或24 h. 皇竹草茎部经NaOH预处理后木质素去除率达到94%, 乙醇生产潜力为165.9 mg/g, 达到理论产量的92%^[49], 而物料产气率比对照组提高了31.6%^[77]. 经稀硫酸预处理后, 物料的乙醇产率可以从82 mg/g提高到276 mg/g^[78]. 水洗对于去除预处理过程中产生的水溶性副产物效果显著, 可将乙醇含量从80.06 μg/L提升到110.45 μg/L^[79].

4 皇竹草在其他方面的应用

皇竹草纤维素含量为30%-50%, 纤维长度和宽度分别为1.48 mm和30 μm, 利用皇竹草制作的纤维素纳米晶体直径为20-30 nm, 长度达到200-300 nm, 结晶度指数为77.3%^[8]. 3.63 t皇竹草干草可生产1 t造纸浆, 并且漂白性能好, 是优质纸品和纤维板的原料^[4]. 以污泥为栽培基质的皇竹草在一年后总纤维素含量达到72%, 纤维长0.83 mm, 清洁环境的同时可增强皇竹草的造纸性能^[79]. 此外, Chen等提出一种对蒸汽爆破和乙醇萃取物分离皇竹草纤维素的方法, 可同时实现乙醇生产和纤维素膜制备^[80].

纤维素可降解、化学性质稳定且环境友好, 利用皇竹草制作的餐盒安全环保、物美价廉. 皇竹草富含17种氨基酸且钾元素丰富, 利用皇竹草制作的面条和保健饮料营养丰富, 有利于调节神经、肌肉功能及控制血压, 可预防心脏病和中风^[4].

此外, 皇竹草还可加工为生产基质培养林芝、竹荪等食用菌^[4].

5 展望

现今, 皇竹草生物质资源在饲料加工、能源开发、生态治理等方面得到了极大的发展, 并已在应用中显示出强大的生命力和广阔前景. 此后的工作应注重优化皇竹草生物质资源的工艺技术, 拓展皇竹草生物质资源的综合化利用途径, 实现经济发展和生态保护的双赢.

皇竹草生态治理效应与皇竹草突出的生物特性密不可分. 发达的根系为皇竹草在养分缺乏的石漠化地区、土壤瘠薄的

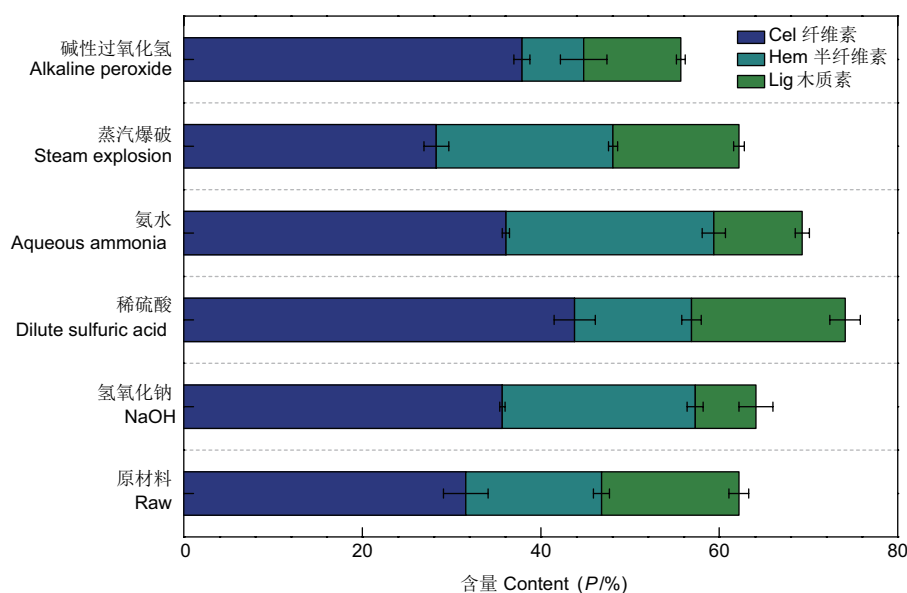


图1 预处理前后皇竹草固相组成(根据文献[49]修改).

Fig. 1 Solid-phase compositions for *Pennisetum hybridum* before and after pretreatments (revision after Cardona et al^[49]).

水土流失地段繁茂生长奠定基础。强抗逆性为皇竹草在盐碱地、重金属污染地等边际地区生存提供可能。众多的研究与应用实例表明皇竹草在作为环境修复材料方面具有良好的应用前景,但目前国内针对机理性的研究很少,不利于充分发挥皇竹草的生态治理效益。在今后的研究中,应加强皇竹草相关功能基因和抗性机理方面的研究,充分利用植物转基因技术和分子育种技术强化皇竹草各方面的抗性。在实际应用中,应根据治理目标建立相应设施系统,完善相配套的产业链,结合地区特色发展复合性生态经济模式,坚持走富国强民的可持续发展道路。

皇竹草富含粗蛋白、氨基酸及各种矿质元素,作为饲料利用可为畜禽的生长提供丰富的营养物质,并且皇竹草饲料化利用方式多样,处理工艺简单,早已被大规模推广利用。皇竹草抗寒性较差,在大部分地区多为一年生饲草栽培,处在各个生长阶段化学组成差异大,粗放式的操作容易造成饲料配比不均衡、营养流失以及副产物生成。因此,今后应加强皇竹草

抗寒性研究,并根据各地区皇竹草的生长差异对产量和组成成分进行严格把控,优化栽培管理措施以实现经济效益和营养价值最大化。

皇竹草主要通过热解燃烧、沼气发酵、乙醇发酵等途径进行清洁能源制备。目前我国针对皇竹草的能源化利用尚未形成完整体系,多数研究主要针对产能中的某单一步骤,脱离了动态、连续的能源制备过程。在此后的研究中,应注重优化皇竹草预处理和酶水解条件,加强对优质甲烷菌和木质纤维素乙醇发酵菌株的筛选,强化皇竹草的产能工艺技术,形成完整的皇竹草生物质资源能源化利用体系,实现皇竹草生物质在能源利用方面从研究到大规模实际生产的突破。

皇竹草生物质资源的多功能用途利用越来越受到人们的关注。在今后的推广发展模式,利用皇竹草生产高附加值产品的同时应考虑到废弃物后续的利用与加工,发展综合利用模式,拓展皇竹草的利用途径,充分利用皇竹草的各项特性,在保护环境的同时取得良好的经济效益(图2)。

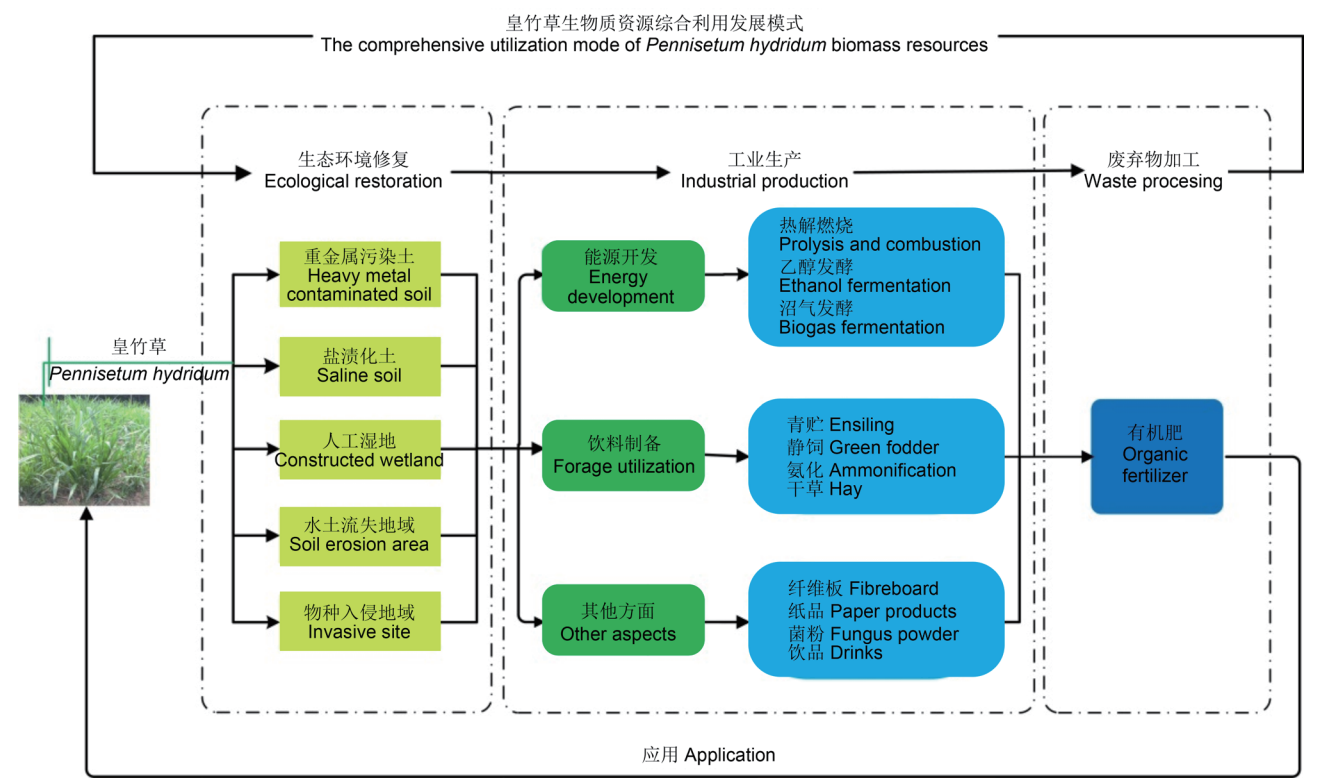


图2 皇竹草生物质资源的综合利用发展模式。
Fig. 2 The comprehensive utilization mode of *Pennisetum hybridum* biomass resources.

参考文献 [References]

- Carriquiry MA, Du X, Timilsina GR. Second generation biofuels: economics and policies [J]. *Energy Policy*, 2011, **39** (7): 4222-4234
- Fedenko JR, Erickson JE, Woodard KR, Sollenberger LE, Vendramini JMB, Gilbert RA, Hessel ZR, Peter GF. Biomass production and composition of perennial grasses grown for bioenergy in a subtropical climate across Florida, USA [J]. *Bioenerg Res*, 2013, **6** (3): 1082-1093
- Guo WW, Zhuo MC, Shi YL, Qu XL, Li ZP, Fang JP. Bibliometric analysis on *Pennisetum sinense* Roxb. in China during 2006-2016 [J]. *Asian J Agric Res*, 2017, **9** (10): 82-84
- 张继友. 中国王草种质资源经济价值研究[D]. 海口: 海南大学, 2014 [Zhang JY. Reserch on economic value of king grass germplasm resources for China [D]. Haikou: Hannan University, 2014]
- 颜朗, 吴燕, 陈鼎, 谭雪梅, 张义正. 皇竹草转录组分析揭示其抗冻性[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, **23** (3): 459-466 [Yan L, Wu Y, Chen D, Tan XM, Zhang YZ. Transcriptome analysis reveals cold acclimation in *Pennisetum sinense* Roxb. [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (3): 459-466]

- 6 Geren H, Kavut Y. Effect of different plant densities on the yield and some silage quality characteristics of giant king grass (*Pennisetum hybridum*) under mediterranean climatic conditions [J]. *Turk J Field Crops*, 2015, **20** (1): 85-91
- 7 Ma C, Hui M, Lin C, Naidu R, Bolan N. Phytoextraction of heavy metal from tailing waste using Napier grass [J]. *Catena*, 2016, **136**: 74-83
- 8 Lu QL, Tang LR, Wang S, Huang B, Chen YD, Chen XR. An investigation on the characteristics of cellulose nanocrystals from *Pennisetum sinense* [J]. *Biomass Bioenergy*, 2014, **70**: 267-272
- 9 Minmunin J, Limpitpanich P, Promwungkwa A. Delignification of elephant grass for production of cellulosic intermediate [J]. *Energy Procedia*, 2015, **79**: 220-225
- 10 Cui H, Fan Y, Yang J, Xu L, Zhou J, Zhu Z. In situ phytoextraction of copper and cadmium and its biological impacts in acidic soil [J]. *Chemosphere*, 2016, **161**: 233-241
- 11 Zhang X, Xia H, Li Z, Ping Z, Bo G. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils [J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101** (6): 2063-2066
- 12 Zhang WH, He LY, Wang Q, Sheng XF. Inoculation with endophytic *Bacillus megaterium* 1Y31 increases Mn accumulation and induces the growth and energy metabolism-related differentially-expressed proteome in Mn hyperaccumulator hybrid pennisetum [J]. *J Hazard Mater*, 2015, **300**: 513-521
- 13 Hu L, Wang R, Liu X, Xu B, Xie T, Li Y, Wang M, Wang G, Chen Y. Cadmium phytoextraction potential of king grass (*Pennisetum sinense* Roxb.) and responses of rhizosphere bacterial communities to a cadmium pollution gradient [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, **25** (22): 21671-21681
- 14 Zhang X, Zhang X, Bo G, Li Z, Xia H, Li H, Jian L. Effect of cadmium on growth, photosynthesis, mineral nutrition and metal accumulation of an energy crop, king grass (*Pennisetum americanum* × *P. purpureum*) [J]. *Biomass Bioenergy*, 2014, **67**: 179-187
- 15 Ma CJ, Ming H, Li HS. Study of red mud improvement with the mixing method and the impact of *Pennisetum hybridum* plantation on red mud amendment [J]. *Adv Mater Res*, 2013, **807-809**: 392-401
- 16 Liang H, Lee CCC, Wang H, Lin XY, Chen XH, Wu QT. Using a high biomass plant *Pennisetum hybridum* to phyto-treat fresh municipal sewage sludge [J]. *Biol Technol*, 2016, **217**: 252-256
- 17 林晓燕, 王慧, 王浩, 陈诚, 吴启堂, 卫泽斌, 罗赢鹏, 陈晓红. 利用皇竹草处理城市污泥生产植物产品[J]. *生态学报*, 2015, **35** (12): 4234-4240 [Lin X, Wang H, Wang H, Chen C, Wu QT, Wei Z, Luo Y, Chen X. Using hybrid giant napier to treat municipal sewage sludge and produce plant biomass [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35** (12): 4234-4240]
- 18 Gallego SM, Pena LB, Barcia RA, Azpilicueta CE, Iannone MF, Rosales EP, Zawoznik MS, Groppa MD, Benavides MP. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: insight into regulatory mechanisms [J]. *Environ Exp Bot*, 2012, **83** (5): 33-46
- 19 张杏锋, 田超, 高波. 能源植物皇草对重金属的耐性及修复潜力[J]. *环境工程学报*, 2017, **11** (5): 3204-3213 [Zhang XF, Tian C, Gao B. Heavy metal tolerance and phytoextraction potential of energy crop, king grass [J]. *Chin J Environ Eng*, 2017, **11** (5): 3204-3213]
- 20 包红旭, 李良玉, 刘海军, 张欣, 苏弘治, 张馨月, 张浩, 杨华, 黄颖芝, 吕志忠, 杨雨萌, 刘唯玉, 陈阳, 隋然. 一种采用生物质炭协同蚯蚓和狼尾草联合修复废弃铬渣场地的方法: CN108580545A [P]. 2018-09-28
- 21 梅娟. 铅锌矿尾砂污染农田的修复治理与利用研究[D]. 太原: 山西大学, 2013 [Mei J. Remediation and utilization of lead-zinc mine tailings contaminated agricultural soils [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013]
- 22 Ishii Y, Hamano K, Kang DJ, Idota S, Nishiwaki A. Cadmium phytoextraction potential of napiergrass cultivated in Kyushu, Japan [J]. *Appl Environ Soil Sci*, 2015, **2015**: 1-6
- 23 Chen Y, Hu L, Liu X, Deng Y, Liu M, Xu B, Wang M, Wang G. Influences of king grass (*Pennisetum sinense* Roxb.)-enhanced approaches for phytoextraction and microbial communities in multi-metal contaminated soil [J]. *Geoderma*, 2017, **307**: 253-266
- 24 Sangthong C, Setkit K, Prapagdee B. Improvement of cadmium phytoextraction after soil inoculation with a cadmium-resistant *Micrococcus* sp. [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2016, **23** (1): 756-764
- 25 Xu C, He S, Liu Y, Zhang W, Lu D. Bioadsorption and biostabilization of cadmium by *Enterobacter cloacae* TU [J]. *Chemosphere*, 2017, **173**: 622-629
- 26 Wiangkham N, Prapagdee B. Potential of Napier grass with cadmium-resistant bacterial inoculation on cadmium phytoextraction and its possibility to use as biomass fuel [J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 511-518
- 27 Dell'Amico E, Cavalca L, Andreoni V. Improvement of Brassica napus growth under cadmium stress by cadmium-resistant rhizobacteria [J]. *Soil Biol Biochem*, 2008, **40** (1): 74-84
- 28 Mirshad PP, Chandran S, Puthur JT. Characteristics of bioenergy grasses important for enhanced NaCl tolerance potential [J]. *Russ J Plant Physiol*, 2014, **61** (5): 639-645
- 29 Purbajanti ED, Soetrisno RD, Hanudin E, Budhi SPS. Phytosynthesis and yields of grasses grown in saline condition [J]. *J Indo Trop Animal Agric*, 2010, **35** (1): 42-47
- 30 Chongjian M, Ravi N, Faguang L, Changhua L, Hui M. Influence of hybrid giant Napier grass on salt and nutrient distributions with depth in a saline soil [J]. *Biodegradation*, 2012, **23** (6): 907-916
- 31 Quinn LD, Straker KC, Guo J, Kim S, Thapa S, Kling G, Lee DK, Voigt TB. Stress-tolerant feedstocks for sustainable bioenergy production on marginal land [J]. *Bioenergy Res*, 2015, **8** (3): 1081-1100
- 32 Li X, Geng X, Xie R, Fu L, Jiang J, Gao L, Sun J. The endophytic bacteria isolated from elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schumacher) promote plant growth and enhance salt tolerance of hybrid *Pennisetum* [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2016, **9** (1): 190
- 33 马崇坚, 刘发光. 皇竹草在生态环境治理中的应用研究进展[J]. *中国水土保持*, 2012 (1): 41-44 [Ma CJ, Liu FG. Research progress on the application of king grass in ecological environment management [J]. *Soil Water Conserv Chin*, 2012 (1): 41-44]
- 34 Jiao Y, Xu X, Liu M, Xu C, Wei L, Song T, Hu D, Kiely G. Effects of Napier grass management on soil hydrologic functions in a karst landscape, southwestern China [J]. *Soil Tillage Res*, 2016, **157**:

- 83-92
- 35 Vadivel R, Singh Y, Bal SK, Rane J, Singh NP. Napier grass: a model crop for developing partially weathered gravelly land in the central deccan plateau region [J]. *PNAS, India Sect B: Biol Sci*, 2018 (2): 1-11
 - 36 Pincam T, Brix H, Eller F, Jampeetong A. Hybrid Napier grass as a candidate species for bio-energy in plant-based water treatment systems: interactive effects of nitrogen and water depth [J]. *Aquat Bot*, 2017, **138**: 82-91
 - 37 Jampeetong A, Muenrew J. Interactive effects of NH_4^{+} concentration and O_2 availability on growth, morphology, and mineral allocation of hybrid Napier grass (*Pennisetum purpureum* × *P. americanum* cv. Pakchong1) [J]. *Ecol Eng*, 2016, **91**: 409-418
 - 38 Pantip K. Swine wastewater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland planted with napier grass [J]. *Sust Environ Res*, 2016, **26** (5): 217-223
 - 39 Antony S, Thomas CG. Nutritive quality of hybrid Napier cultivars grown under rainfed ecosystem [J]. *J Trop Agric*, 2014, **52** (1): 90-93
 - 40 Wangchuk K, Rai K, Nirola H, Thukten, Dendup C, Mongar D. Forage growth, yield and quality responses of Napier hybrid grass cultivars to three cutting intervals in the Himalayan foothills [J]. *Trop Grasslands-Forrajes*, 2015, **3** (3): 142-150
 - 41 Delena MF, Fulpagare YG. Characteristics of silage prepared from Hybrid Napier, Maize and Lucerne [J]. *J Agric Vet Sci*, 2015, **8** (5): 13-16
 - 42 ALI SA, Y XJ, D ZH, W SN, Tao S. Effects of lactic acid bacteria on ensiling characteristics, chemical composition and aerobic stability of king grass [J]. *J Anim Plant Sci*, 2017, **3**: 747-755
 - 43 Shah AA, Yuan XJ, Dong ZH, Li JF, Tao S. Microbiological and chemical profiles of elephant grass inoculated with and without *Lactobacillus plantarum* and *Pediococcus acidilactici* [J]. *Arch Microbiol*, 2018, **200** (2): 311-328
 - 44 杨丁, 金仕强, 刘丽, 沈留红, 刘跃. 皇竹草混合青贮饲料的制备方法及其由该方法制备的饲料: CN108077601A [P]. 2018-05-29
 - 45 Samini M, Premaratne S. Yield and nutritional quality potential of three fodder grasses in the northern region in Sri Lanka [J]. *Trop Agric Res*, 2017, **28** (2): 175-182.
 - 46 王慧娟. 羊常用粗饲料营养价值评定[D]. 阳陵: 西北农林科技大学, 2017 [Wang HJ. Evaluation of nutritive value of common forage in sheep [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017]
 - 47 Fang C, Dixon RA. Lignin modification improves fermentable sugar yields for biofuel production [J]. *Nat Biotechnol*, 2007, **25** (7): 759
 - 48 Zhang J, Song Y, Wang B, Xu Z, Tan T. Biomass to bio-ethanol: the evaluation of hybrid Pennisetum used as raw material for bio-ethanol production compared with corn stalk by steam explosion joint use of mild chemicals [J]. *Renew Energy*, 2016, **88** (6): 164-170
 - 49 Cardona E, Rios J, Pena J, Peñuela M, Rios L. King grass: a very promising material for the production of second generation ethanol in tropical countries [J]. *Biomass bioenergy*, 2016, **95**: 206-213
 - 50 朱桂英. 能源草生产纤维素乙醇的比较研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017 [Zhu GY. The comparative research on bioenergy grasses to produce cellulose ethanol [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017]
 - 51 Mohapatra S, Mishra C, Behera SS, Thatoi H. Application of pretreatment, fermentation and molecular techniques for enhancing bioethanol production from grass biomass—a review [J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2017, **78**: 1007-1032
 - 52 Tsai WT, Tsai YL. Thermochemical characterization of napier grass as an energy source and its environmental and economic benefit analysis [J]. *Energy Source, Part B: Ecol Plan*, 2016, **11** (2): 130-136
 - 53 Nimmanterdwong P, Chalermssinsuwan B, Ostergard H, Piumsomboon P. Environmental performance assessment of Napier grass for bioenergy production [J]. *J Cleaner Prod*, 2017, **165**: 645-655
 - 54 Weijde TVD, Kamei CLA, Torres AF, Vermerris W, Dolstra O, Visser RGF, Trindade LM. The potential of C4 grasses for cellulosic biofuel production [J]. *Front Plant Sci*, 2013, **4** (107): 107
 - 55 Weijde TVD, Kiesel A, Iqbal Y, Muylle H, Trindade LM. Evaluation of *Miscanthus sinensis* biomass quality as feedstock for conversion into different bioenergy products [J]. *GCB Bioenergy*, 2017, **9** (1): 176-190
 - 56 Lorenzana R. Quantitative Trait loci and trait correlations for maize stover cell wall composition and glucose release for cellulosic ethanol [J]. *Crop Sci*, 2010, **50** (2): 541-555
 - 57 Jung HJG, Bernardo R. Comparison of cell wall polysaccharide hydrolysis by a dilute acid/enzymatic saccharification process and rumen microorganisms [J]. *Bioenergy Res*, 2012, **5** (2): 319-329
 - 58 Canilha L, Santos VT, Rocha GJ, Jb AES, Giulietti M, Silva SS, Felipe MG, Ferraz A, Milagres AM, Carvalho W. A study on the pretreatment of a sugarcane bagasse sample with dilute sulfuric acid [J]. *J Ind Microbiol Biotechnol*, 2011, **38** (9): 1467-1475
 - 59 Masarin F, Gurgilhares DB, Baffa DC, Barbosa MH, Carvalho W, Ferraz A, Milagres AM. Chemical composition and enzymatic digestibility of sugarcane clones selected for varied lignin content [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2011, **4** (1): 55
 - 60 Amukelani Lacreia S, Matthias F, Wolfgang F. Genetic mapping of QTLs for sugar-related traits in a RIL population of *Sorghum bicolor* L. Moench [J]. *Theo Appl Genet*, 2010, **121** (2): 323-336
 - 61 Stefaniak TR, Dahlberg JA, Bean BW, Dighe N, Wolfrum EJ, Rooney WL. Variation in biomass composition components among forage, biomass, sorghum-sudangrass, and sweet sorghum types [J]. *Crop Sci*, 2012, **52** (4): 1949-1954
 - 62 Liao Y, Fang H, Zhang H, Yu Z, Liu Z, Ma X. Energy analysis and environmental impacts of hybrid giant napier (*Pennisetum hybridum*) direct-fired power generation in south China [J]. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2017, **199**: 12094
 - 63 Mohammed I, Abakr Y, Kazi F, Yusup S, Alshareef I, Chin S. Comprehensive characterization of Napier grass as a feedstock for thermochemical conversion [J]. *Energies*, 2015, **8** (5): 3403-3417
 - 64 黄柱坚, 朱子鹭, 吴学深, 赖晓琳, 王皮毓, 胡新将, 崔理华. 皇竹草生物炭的结构特征及对重金属吸附作用机制[J]. 环境化学, 2016, **35** (4): 766-772 [Huang ZJ, Zhu ZA, Wu XS, Lai XL, Hu XJ, Cui LH.

- Adsorption of heavy metals by biochar from *Pennisetum sinense* Roxb. [J]. *Environ Chem*, 2016, **35** (4): 766-772]
- 65 He H, Pan J, Yu P, Chen G, Li H. Effects of hybrid giant Napier biochar on cadmium migration in a cabbage-soil system contaminated with cadmium and butachlor [J]. *Pol J Environ Stud*, 2017, **26** (2): 619-625
 - 66 龚舒静, 段青松, 杨姝, 张娅玲, 赵艳, 秦向东. 不同发酵条件对杂交狼尾草厌氧发酵产沼气的影响[J]. 中国沼气, 2014, **32** (6): 26-32 [Gong SJ, Duan QS, Yang S, Zhang YL, Zhao Y, Qin XD. Effect of different anaerobic fermentation condition on biogas production of hybrid *Pennisetum* [J]. *Chin Biogas*, 2014, **32** (6): 26-32]
 - 67 Li L, Sun Y, Yuan Z, Kong X, Wang Y. Influence of harvest period and frequency on methane yield of *Pennisetum hybrids* [J]. *J Energy Eng*, 2016, **142** (3): 1-6
 - 68 李连华, 孙永明, 袁振宏, 孔晓英, 刘晓风, 李东. 能源草单独厌氧发酵产气性能研究[J]. 中国沼气, 2014, **32** (1): 18-22 [Li LH, Sun YM, Yuan ZH, Kong XY, Liu XF, Li D. Mono-digestion of different energy grass and biogas production [J]. *Chin Biogas*, 2014, **32** (1): 18-22]
 - 69 范希峰, 侯新村, 朱毅, 武菊英. 杂交狼尾草作为能源植物的产量和品质特性[J]. 中国草地学报, 2012, **34** (1): 48-52 [Fan XF, Hou XC, Zhu Y, Wu JY. Biomass yield and quality of hybrid *Pennisetum* [J]. *Chin J Grass*, 2012, **34** (1): 48-52]
 - 70 Weerayuttil P, Khoyun U, Khuanmar K. Optimum ratio of chicken manure and Napier grass in single stage anaerobic co-digestion [J]. *Energy Procedia*, 2016, **100**: 22-25
 - 71 Li L, Ying L, Sun Y, Yuan Z, Lü P, Kang X, Yi Z, Yang G. Influence of the feedstock ratio and organic loading rate on the co-digestion performance of *Pennisetum* hybrid and cow manure [J]. *Energy Fuels*, 2018, **32** (4): 5171-5180
 - 72 李兵, 郑晓伟, 肖佳旭, 刘刚金, 刘永兵. 杂交狼尾草与猪粪混合发酵产甲烷研究[J]. 可再生能源, 2015, **33** (6): 902-907 [Li B, Zhen XW, Xiao JX, Liu GJ, Liu YB. Study on *Pennisetum pureum* and pig manure mixed fermentation [J]. *Renew Energy Resour*, 2015, **33** (6): 902-907]
 - 73 Dussadee N, Reansuwan K, Ramaraj R. Potential development of compressed bio-methane gas production from pig farms and elephant grass silage for transportation in Thailand [J]. *Bioresour Technol*, 2014, **155** (4): 438
 - 74 吴娟子, 张建丽, 潘玉梅, 刘智微, 钟小仙. 象草和杂交狼尾草细胞壁组分及乙醇理论产量动态分析[J]. 草业学报, 2014, **23** (4): 153-161 [Wu JZ, Zhang JL, Pan YM, Liu ZW, Zhong XX. Changes of the content and biomass of cell wall components and calculated ethanol yields in *Pennisetum purpureum* and hybrid *Pennisetum* during the growing period [J]. *Acta Prat Sin*, 2014, **23** (4): 153-161]
 - 75 Li Y, Zhang Y, Zheng H, Jian D, Zhang H, Wu J, Huang H. Preliminary evaluation of five elephant grass cultivars harvested at different time for sugar production [J]. *Chin J Chem Eng*, 2015, **23** (7): 1188-1193
 - 76 Kang X, Sun Y, Li L, Kong X, Yuan Z. Improving methane production from anaerobic digestion of *Pennisetum hydridum* by alkaline pretreatment [J]. *Bioresour Technol*, 2017, **255**: 205-212
 - 77 Yasude M, Ishii Y, Ohta K. Napier grass (*Pennisetum purpureum* Schuach) as a raw material for bioethanol production: pretreatment, saccharification, and fermentation [J]. *Biotechnol Bioprocess Eng*, 2014, **19**: 943-950
 - 78 Camesasca L, Ramirez M, Guigou M, Ferrari M, Lareo C. Evaluation of dilute acid and alkaline pretreatments, enzymatic hydrolysis and fermentation of napiergrass for fuel ethanol production [J]. *Biomass Bioenergy*, 2015, **74**: 193-201
 - 79 Jiang Y, Wu Q, Wei Z, Wang J, Fan Z, Pang Z, Zhu Z, Zheng S, Lin X, Chen Y. Papermaking potential of *Pennisetum hybridum* fiber after fertilizing treatment with municipal sewage sludge [J]. *J Clean Prod*, 2019, **208**: 889-896
 - 80 Chen HZ, Zhang JX, Leung CL, Li Y. A processing method for fractionally converting pennisetum hydridum into fuel ethanol with co-production of electricity generation and paper pulp: US20110104773A1 [P]. 2011-05-05