



收获期对甜高粱田间生产性能及肉牛瘤胃体外消化性能的影响

吉方财 王一方 张洪瑞 刘奕婷 苑明伟 陈雪 孙志强 寇启芳 玉柱

Effect of harvest periods on field productive performance and *in vitro* digestibility of sweet sorghum

Ji Fangcai, Wang Yifan, Zhang Hongrui, Liu Yiting, Yuan Mingwei, Chen Xue, Sun Zhiqiang, Kou Qifang, Yuzhu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0658>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

青贮发酵促进剂和收获期对全株青贮玉米营养品质的影响

Effects of silage fermentation promoter and harvest stage on nutrient quality of whole silage maize

草业科学. 2022, 39(3): 586 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0095>

施肥和收获期对拉萨河谷地区白草产量和饲用品质的影响

Effects of fertilization and harvest period on *Pennisetum flaccidum* yield and forage quality in the Lhasa River Valley

草业科学. 2024, 41(6): 1347 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0151>

不同栽培措施对全株玉米青贮效果及体外消化率的影响

Effects of different cultivation measures on the quality and *in vitro* digestibility of whole-plant corn silage

草业科学. 2024, 41(12): 3016 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0418>

宁夏雨养区饲用甜高粱品种的生产性能和营养价值

Comparative study of production performance and nutritional value of *Sorghum dochna* varieties in rainfed areas in Ningxia, China

草业科学. 2022, 39(6): 1235 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0497>

开食料中性洗涤纤维与淀粉不同比例对羔羊消化道发育的影响

Effects of different ratios of neutral detergent fiber to starch in starters on the development of digestive tract of lambs

草业科学. 2022, 39(3): 571 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0041>

13个紫花苜蓿品种在沧州盐碱地的生产性能和营养价值

Comparison and analysis of production performance and nutritional value of 13 alfalfa varieties in the Cangzhou saline-alkali area

草业科学. 2023, 40(7): 1823 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0563>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0658

吉方财, 王一凡, 张洪瑞, 刘奕婷, 苑明伟, 陈雪, 孙志强, 寇启芳, 玉柱. 收获期对甜高粱田间生产性能及肉牛瘤胃体外消化性能的影响. 草业科学, 2025, 42(3): 661-668.

JI F C, WANG Y F, ZHANG H R, LIU Y T, YUAN M W, CHEN X, SUN Z Q, KOU Q F, Yuzhu. Effect of harvest periods on field productive performance and *in vitro* digestibility of sweet sorghum. Pratacultural Science, 2025, 42(3): 661-668.

收获期对甜高粱田间生产性能及肉牛瘤胃 体外消化性能的影响

吉方财^{1,2}, 王一凡¹, 张洪瑞¹, 刘奕婷¹, 苑明伟¹,
陈雪¹, 孙志强³, 寇启芳⁴, 玉柱¹

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 国家草业技术创新中心(筹), 内蒙古 呼和浩特 010070; 3. 中国农业大学
动物科学技术学院, 北京 100193; 4. 红寺堡区天源良种羊繁育养殖有限公司, 宁夏 吴忠 751990)

摘要: 为确定宁夏中部地区甜高粱 (*Sorghum bicolor*) 适时收获期, 本研究以甜高粱‘F438’为试验材料, 分别在拔节期、抽穗期、乳熟期及蜡熟期收获并测定其农艺性状、营养品质及肉牛瘤胃体外消化性能。结果表明: 甜高粱在蜡熟期和乳熟期的茎节数、茎叶比及干物质产量均显著高于拔节期和抽穗期 ($P < 0.05$)。收获期对甜高粱营养品质(除了酸性洗涤木质素)均有显著差异 ($P < 0.05$), 粗蛋白质含量随收获期延后显著降低 ($P < 0.05$), 可溶性碳水化合物和淀粉含量随收获期延后显著影响 ($P < 0.05$)。中性洗涤纤维和酸性洗涤纤维含量在抽穗期上升后逐渐下降, 在蜡熟期最低, 分别为 58.92% 和 35.52%, 均显著低于拔节期和抽穗期 ($P < 0.05$)。甜高粱在蜡熟期体外干物质消化率最高, 为 53.53%, 显著高于其余 3 个时期 ($P < 0.05$), 高 4.01%~9.33%, 拔节期体外中性洗涤纤维消化率显著高于抽穗期和乳熟期 ($P < 0.05$), 分别高 5.21% 和 5.54%, 与蜡熟期差异不显著 ($P > 0.05$)。可消化干物质产量与干物质、干物质产量、可溶性碳水化合物含量和淀粉含量显著正相关 ($P < 0.05$); 可消化中性洗涤纤维产量与干物质显著正相关 ($P < 0.05$), 与粗蛋白质含量显著负相关 ($P < 0.05$)。甜高粱在蜡熟期收获, 可消化干物质和中性洗涤纤维产量最高, 分别为 13.35 和 4.91 t·hm⁻²。综上所述, 在宁夏中部地区, 建议甜高粱在蜡熟期收获。

关键词: 甜高粱; 收获期; 田间生产性能; 体外消化率; 可消化干物质产量; 可消化中性洗涤纤维产量; 相关性分析

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)03-0661-08

Effect of harvest periods on field productive performance and *in vitro* digestibility of sweet sorghum

Ji Fangcai^{1,2}, Wang Yifan¹, Zhang Hongrui¹, Liu Yiting¹, Yuan Mingwei¹,
Chen Xue¹, Sun Zhiqiang³, Kou Qifang⁴, Yuzhu¹

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. National Center of Pratacultural Technology Innovation (under way), Hohhot 010070, Inner Mongolia, China;

3. College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

4. Hongsibu District Tianyuan Well-Bred Sheep Breeding Co., Wuzhong 751900, Ningxia, China)

Abstract: To determine the optimum harvest period for sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) in central Ningxia, sweet sorghum

收稿日期: 2023-12-04 接受日期: 2024-03-18

基金项目: 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项 (2022YFE0111000); 2023 年国家草业技术创新中心(筹)重大创新平台建设专项 (CCPTZX2023B07); 草食畜牧业增量提质科技创新合作项目 (DL2023108002L); 宁夏回族自治区中央引导地方科技发展专项 (2022FRD05029); 青海省玉树州杂多县特色养殖业提质增效关键技术集成与示范项目 (2022YFD1602305)

第一作者: 吉方财 (1999-), 男, 四川内江人, 在读硕士生, 研究方向为牧草生产与加工利用。E-mail: 492255145@qq.com

通信作者: 玉柱 (1963-), 男(蒙古族), 内蒙古通辽人, 教授, 博士, 研究方向为牧草生产与加工利用。E-mail: yuzhu33150@sina.com

‘F438’ was used as the research material, and its field productive performance and *in vitro* digestibility were studied at four harvest periods (jointing, heading, milk, and dough stages). The results showed that the number of stem nodes, stem-leaf ratio, and dry matter yield of sweet sorghum at the dough and milk stages were significantly higher than those of the jointing and heading stages ($P < 0.05$). The harvest periods had a significant effect on the nutritional quality of sweet sorghum except for acid detergent lignin ($P < 0.05$). The crude protein content decreased significantly with the delay of the harvest period ($P < 0.05$), whereas the water-soluble carbohydrates and starch content increased significantly ($P < 0.05$). The neutral detergent fiber and acid detergent fiber contents increased after the heading stage and then gradually decreased, reaching the lowest levels at the dough stage, with DM values of 58.92% and 35.52%, respectively, significantly lower than those of the jointing and heading stages ($P < 0.05$). The *in vitro* dry matter digestibility of sweet sorghum at the dough stage was the highest (53.53%), which was significantly higher than that of other stages ($P < 0.05$), with an increase of 4.01%~9.33%. The *in vitro* neutral detergent fiber digestibility at the jointing stage was significantly higher than that of the heading and milk stages ($P < 0.05$), with an increase of 5.21% and 5.54%, respectively, whereas no significant difference was observed compared with that of the dough stage ($P > 0.05$). The digestible dry matter yield had significantly positive correlations with dry matter, dry matter yield, water-soluble carbohydrates content, and starch content ($P < 0.05$). The digestible neutral detergent fiber yield had significantly positive correlations with dry matter and dry matter yield ($P < 0.05$). The digestible neutral detergent fiber yield and crude protein content showed a significantly negative correlation ($P < 0.05$). The highest digestible dry matter and neutral detergent fiber yield of sweet sorghum was harvested at the dough stage, at 13.35 and 4.91 t·ha⁻¹, respectively. In conclusion, the optimum harvesting period of sweet sorghum was the dough stage in central Ningxia.

Keywords: sweet sorghum; harvest period; field productive performance; *in vitro* digestibility; digestible dry matter yield; digestible neutral detergent fiber yield; correlation analysis

Corresponding author: Yuzhu E-mail: yuzhu33150@sina.com

甜高粱 (*Sorghum bicolor*) 是高产 C₄ 植物, 相较于 C₃ 植物具有光合效率高、耐旱性强及生长能力强等特点, 作为普通粒用高粱的一个变种, 其抗逆性强、营养丰富、含糖量高, 是一种优质的能源及饲料作物, 在边际性土地上具有巨大的栽培潜力^[1-2]。近年来, 因甜高粱饲用价值高, 逐渐成为我国干旱、半干旱及盐碱化地区重要的优质饲草资源, 以缓解草畜矛盾^[1,3]。在降水稀少及供水受限地区, 甜高粱可获得较理想的产量, 具有取代饲用玉米 (*Zea mays*) 的潜力, 可作为优质青贮饲料替代日粮中部分青贮玉米饲喂牛、羊^[4-6]。有研究表明, 短期内饲喂高产哺乳奶牛, 甜高粱青贮饲料可替代日粮中部分青贮玉米, 当替代率高达 50% 时, 对产奶量无负面影响^[7]。

在宁夏中部地区, 由于降水稀少、地表蒸发量大以及土壤盐碱化严重, 导致该地区的作物生长受到严重影响, 从而进一步导致当地饲草资源的短缺, 使得草畜矛盾日益突出。因此, 挖掘甜高粱的饲用价值、发挥其饲用潜力, 对于缓解草畜矛盾具有重要意义。甜高粱‘F438’在宁夏中部地区表现出

较强的抗旱性^[8], 且其产量和品质较优^[9]。目前有较多关于甜高粱适时收获期的研究^[4,10-11], 但主要集中于探讨甜高粱不同收获期田间产量与营养品质的表现, 对于甜高粱的饲用价值而言, 不同收获期可消化养分产量至关重要。因此, 本研究以甜高粱‘F438’为材料, 对其拔节期、抽穗期、乳熟期和蜡熟期的田间生产性能和体外消化性能进行比较, 以期为宁夏中部地区甜高粱的生产与利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于宁夏回族自治区吴忠市红寺堡区 (105°43′~106°42′ E, 37°28′~37°37′ N), 平均海拔 1 345 m。该区属温带大陆性气候, 常年干旱少雨, 2022 年降水量 212 mm, 较多年平均降水量下降 15.2%, 年均温 8.7 °C, 无霜期 163 d。

1.2 试验设计

供试甜高粱品种‘F438’于 2022 年 5 月 15 日播种, 行距 30 cm, 株距 20 cm, 种植密度为 166 755

株·hm⁻²。种前灌水,施种肥磷酸二铵[总养分(N+P₂O₅)≥64.0%] 300 kg·hm⁻²,试验期间实施常规田间管理,6月17日(苗期)追施尿素(N≥46.4%) 200 kg·hm⁻²,6月25日(苗期)和8月20日(拔节期)各施硝基复合肥(总养分≥45%,N:P₂O₅:K₂O=26:6:6) 200 kg·hm⁻²。设计4个收获期,分别为拔节期(2022年8月29日)、抽穗期(2022年9月13日)、乳熟期(2022年9月27日)和蜡熟期(2022年10月11日),留茬高度为15 cm。

1.3 测定指标及方法

各收获期分别随机选取3×10株甜高粱测定株高、茎粗、单株叶片数、单株黄叶数及茎节数,并随机选取3个2 m×2 m样方进行全株刈割并称得鲜重,每个样方分别取切短后混匀的300 g鲜样和3株全株,于实验室105℃杀青20 min,65℃烘干至恒重,计算干物质(dry matter, DM)含量和干物质产量,通过分离单株茎、叶,计算茎叶比(茎叶比=茎干重/叶干重)。取甜高粱烘干样粉碎后过0.425 mm筛,通过凯氏定氮法测定粗蛋白质(crude protein, CP)含量,使用脂肪分析仪(Ankom XT1 Ankom Company, USA)通过索氏提取法测定脂肪(ether extract, EE)含量,通过蒽酮-硫酸比色法测定可溶性碳水化合物(water soluble carbohydrate, WSC)和淀粉(starch)含量,通过范氏洗涤纤维法测定中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和酸性洗涤木质素(acid detergent lignin, ADL)含量。

1.4 体外瘤胃消化性能测定

采用王莹^[12]的方法测定体外消化率,称取0.5 g青贮饲料样品于纤维袋中(重复3次),放入DAISY II体外模拟培养箱消化罐中,加入1 330 mL A缓冲液、266 mL B缓冲液和400 mL于晨饲前采集的配备有永久瘤胃瘘管的安格斯牛瘤胃液,往消化罐中持续通入CO₂至厌氧条件,盖好盖子后放入体外模拟培养箱,在39℃下培养48 h,取出样品并用蒸馏水将纤维袋冲洗干净后烘干,称取残渣干物质重后,测定残渣NDF含量,计算体外干物质消化率(*in vitro* dry matter digestibility, IVDMD)和体外中性洗涤纤维消化率(*in vitro* neutral detergent fiber digestibility, IVNDFD),并乘以干物质产量得到可消

化干物质产量和可消化中性洗涤纤维产量。

体外干物质消化率=(样品干物质重-残渣干物质重)/样品干物质重×100%;

体外中性洗涤纤维消化率=(样品NDF含量-残渣NDF含量)/样品NDF含量×100%。

1.5 数据分析

采用Excel 2016整理数据,利用SPSS 27.0进行单因素方差分析,利用Duncan检验法进行多重比较,利用Hiplot进行相关性分析及作图。

2 结果与分析

2.1 各收获期甜高粱农艺性状及产量比较

甜高粱蜡熟期和乳熟期的茎节数、茎叶比和干物质产量均显著高于拔节期和抽穗期($P < 0.05$) (表1)。甜高粱拔节期的株高、单株黄叶数、茎节数和干物质含量均显著低于其他3个时期($P < 0.05$)。乳熟期和蜡熟期甜高粱的株高、茎叶比和干物质产量间无显著差异($P > 0.05$),甜高粱株高、干物质含量和产量随收获期延后呈现上升趋势,在蜡熟期达到最大,分别为477.24 cm、39.20%和25.11 t·hm⁻²。

2.2 不同收获期甜高粱田间营养品质比较

收获期对甜高粱营养品质(除ADL)均具有显著影响($P < 0.05$) (表2)。甜高粱全株、茎和叶CP含量随收获期延后而降低;WSC含量随收获期延后总体上逐渐增加,甜高粱蜡熟期全株WSC含量最高,达17.35%,显著高于其他3个时期($P < 0.05$)。收获期对甜高粱淀粉含量具有显著影响($P < 0.001$),乳熟期和蜡熟期淀粉含量显著高于拔节期和抽穗期($P < 0.05$)。甜高粱NDF和ADF含量在拔节期到抽穗期上升后随收获期延后逐渐下降,在蜡熟期降至最低,分别为58.92%和35.52%,显著低于拔节期和抽穗期($P < 0.05$)。

2.3 不同收获期甜高粱体外消化性能比较

甜高粱在蜡熟期收获IVDMD最高(表3),为53.53%,显著高于其他3个时期($P < 0.05$)。随着收获期的延后,甜高粱可消化干物质产量逐渐上升,在蜡熟期达最高,为13.35 t·hm⁻²,显著高于拔节期和抽穗期($P < 0.05$),但与乳熟期差异不显著($P > 0.05$)。甜高粱在拔节期收获IVNDFD最高,为36.53%,

表 1 不同收获期甜高粱农艺性状及产量比较
Table 1 Agronomic characteristics and yield of sweet sorghum in different harvest periods

收获期 Harvest period	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem width/mm	单株叶片数 Leaf number per plant	单株黄叶数 Yellow leaf number per plant	茎节数 Node number	茎叶比 Stem to leaf ratio	干物质含量 Dry matter content/%	干物质产量 Dry matter yield/(t·hm ⁻²)
拔节期 Jointing stage	391.47b	18.80	15.70	4.20c	11.30c	1.61b	18.81d	14.34b
抽穗期 Heading stage	458.76a	17.23	15.50	5.90b	13.60b	1.83b	24.84c	19.70b
乳熟期 Milk stage	457.92a	17.06	14.60	5.50b	14.90a	3.09a	30.61b	23.69a
蜡熟期 Dough stage	477.24a	16.70	15.70	7.10a	15.20a	2.99a	39.20a	25.11a
SEM	6.59	0.45	0.28	0.23	0.32	0.23	2.31	1.51
P	< 0.001	0.374	0.454	< 0.001	< 0.001	0.008	< 0.001	0.018

SEM: 均值标准误; 同列不同小写字母表示不同收获期间差异显著($P < 0.05$); 下表同。
SEM: standard error of the mean. Different capital letters within the same column indicate significant differences between different harvest periods at the 0.05 level. This is applicable for the following tables as well.

表 2 不同收获期甜高粱营养比较
Table 2 Nutritional components of sweet sorghum in different harvest periods

收获期 Harvest period	粗蛋白质(CP) Crude protein			可溶性碳水化合物(WSC) Water soluble carbohydrates			淀粉 Starch	粗脂肪 (EE) Ether extract	中性洗涤纤维(NDF) Neutral detergent fiber	酸性洗涤纤维(ADF) Acid detergent fiber	酸性洗涤木质素(ADL) Acid detergent lignin
	全株 Whole plant	茎 Stem	叶 Leaf	全株 Whole plant	茎 Stem	叶 Leaf					
拔节期 Jointing stage	6.57a	4.12a	9.19a	5.35c	10.13b	2.58b	5.60b	2.52a	66.45a	40.62a	6.83
抽穗期 Heading stage	4.66b	3.59ab	8.13ab	6.94c	8.95b	2.20b	5.91b	1.03c	68.57a	42.04a	6.45
乳熟期 Milk stage	4.26b	3.03b	6.94bc	14.21b	17.95a	5.34a	10.49a	1.46bc	60.28b	36.06b	6.08
蜡熟期 Dough stage	3.79b	1.84c	6.04c	17.35a	18.62a	5.51a	11.61a	1.78b	58.92b	35.52b	6.56
SEM	3.81	3.27	4.11	15.14	12.95	4.66	0.83	0.19	1.27	0.89	0.19
P	0.018	0.004	0.007	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.007	< 0.001	< 0.001	0.628

显著高于抽穗期和乳熟期 ($P < 0.05$), 分别高 5.21% 和 5.54%, 但与蜡熟期差异不显著 ($P > 0.05$)。甜高粱在蜡熟期收获可消化中性洗涤纤维产量最高, 为 $4.91 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于拔节期 ($P < 0.05$), 但与抽穗期和乳熟期差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.4 甜高粱营养品质与体外消化性能的相关性分析

甜高粱干物质 (DM) 含量、可溶性碳水化合物 (WSC) 含量、可消化干物质 (DDMY) 产量和可消化中性洗涤纤维 (DNDFY) 产量显著正相关 ($P < 0.05$)

(图 1)。干物质产量与 CP 含量显著负相关 ($P < 0.05$), 与 DDMY 产量显著正相关 ($P < 0.05$)。CP 含量与 DNDFY 含量显著负相关 ($P < 0.05$), WSC 含量与 DDMY 产量显著正相关 ($P < 0.05$)。淀粉含量与中性洗涤纤维 (NDF) 和酸性洗涤纤维 (ADF) 含量显著负相关 ($P < 0.05$), 与 DDMY 产量显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同收获期对甜高粱农艺性状的影响

本研究中甜高粱株高、茎叶比、干物质含量和

表 3 不同收获期甜高粱体外消化率及可消化养分产量的比较
Table 3 *In vitro* digestibility and digestible nutrient yield of sweet sorghum in different harvest periods

收获期 Harvest period	体外干物质消化率(IVDMD) <i>In vitro</i> dry matter digestibility/%	体外中性洗涤纤维消化率(IVNDFD) <i>In vitro</i> neutral detergent fiber digestibility/%	可消化干物质(DDMY)产量 Digestible dry matter yield/(t·hm ⁻²)	可消化中性洗涤纤维(DNDFY)产量 Digestible neutral detergent fiber yield/(t·hm ⁻²)
拔节期 Jointing stage	46.99bc	36.53a	6.74b	3.46b
抽穗期 Heading stage	44.20c	31.32b	8.70b	4.22ab
乳熟期 Milk stage	49.52b	30.99b	11.71a	4.27ab
蜡熟期 Dough stage	53.53a	33.33ab	13.35a	4.91a
SEM	1.11	0.92	0.85	0.92
P	< 0.001	0.054	0.002	0.072

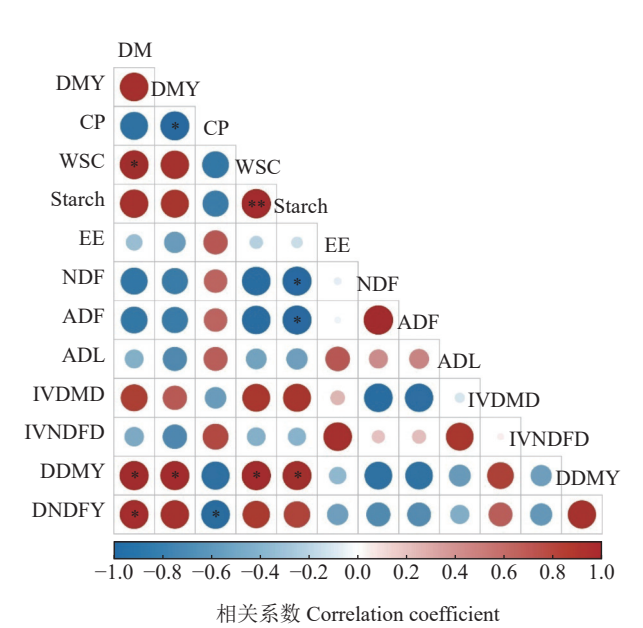


图 1 甜高粱营养品质与可消化养分产量的相关性分析
Figure 1 Correlation analysis of nutritional components and digestible nutrient yield

DM: 干物质; DMY: 干物质产量; CP: 粗蛋白质; WSC: 可溶性碳水化合物; Starch: 淀粉; EE: 脂肪; NDF: 中性洗涤纤维; ADF: 酸性洗涤纤维; ADL: 酸性洗涤木质素; IVDMD: 体外干物质消化率; IVNDFD: 体外中性洗涤纤维消化率; DDMY: 可消化干物质产量; DNDFY: 可消化中性洗涤纤维产量。红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 饼图面积越大、颜色越深表示相关性越强; *和**分别表示相关性显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$)。

DM: dry matter; DMY: dry matter yield; CP: crude protein; WSC: water soluble carbohydrate; Starch: starch; EE: ether extract; NDF: neutral detergent fiber; ADF: acid detergent fiber; ADL: acid detergent lignin; IVDMD: *in vitro* dry matter digestibility; IVNDFD: *in vitro* neutral detergent fiber digestibility; DDMY: digestible dry matter yield; DNDFY: digestible neutral detergent fiber digestibility. Red represents a positive correlation, and blue represents a negative correlation; the larger the pie area and the deeper the color, the stronger the correlation; * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

干物质产量随甜高粱收获期延后而逐渐增加, 这与 Atis 等^[13]的研究一致, 产量的变化主要来自于株高、茎粗和茎节数变化等。冯国郡等^[14]研究发现甜高粱生物产量与株高、茎粗、茎节数显著正相关, 与茎秆产量相关性最强。谷健等^[15]研究表示, 玉米在灌浆期茎粗低于抽穗期。本研究中甜高粱在拔节过后茎粗也逐渐降低。原因可能是甜高粱是一种单子叶植物, 茎的增粗主要依靠于茎初生长^[16], 植物拔节后逐渐从营养生长转向生殖生长, 抽穗消耗大量水分和营养, 初生长缓慢或停止, 使得甜高粱茎粗下降。本研究中甜高粱茎粗和干物质产量最大为 18.80 mm 和 25.11 t·hm⁻², 均低于王太行等^[17]在雨水充沛地区种植的甜高粱的茎粗和产量。品种间差异可能导致这一现象, 但有大量研究表明, 缺水及盐碱条件对植物生长不利^[18-19], 干旱条件会显著降低营养生长及生殖生长期作物产量^[20]。宁夏中部地区甜高粱的产量低于供水充足地区, 与其干旱及盐碱化条件密不可分。

3.2 不同收获期对甜高粱营养品质的影响

蛋白质主要集中于甜高粱的叶片中, 本研究发现甜高粱全株 CP 含量随收获期延后逐渐下降, 这是因为随生育期延后叶片占比下降且叶片逐渐衰老导致, 这与 Lyons 等^[21]的研究结果一致。NDF 和 ADF 含量是反映饲草营养品质的重要指标, NDF 含量与家畜采食量负相关, ADF 含量与消化率负相关^[22]。一般而言随着植物生育期延后, 细胞壁增厚, 细胞内容物减少, NDF 和 ADF 含量升高, 饲用价值也相应降低^[23]。王海莲等^[10]研究发现, 随着生育期的延后, 甜高粱 NDF 和 ADF 含量升高, 干物质采食量、

可消化干物质和相对饲喂价值逐渐降低。而在 Lyons 等^[21]的研究中甜高粱 NDF 和 ADF 含量随收获期延后逐渐下降。本研究中 NDF 和 ADF 含量在抽穗期上升后随生育期延后逐渐下降,可能是因为甜高粱中 WSC 和淀粉随生育期延后而大量积累,导致 NDF 和 ADF 含量下降。Nombekela 等^[24]的研究结果表明,甜味延长了家畜 59% 的采食时间,提升了 12% 采食量。本研究中,随生育期延后甜高粱 WSC 含量逐渐升高且 NDF 含量逐渐下降,表明延迟甜高粱收获期可能有利于提高家畜的采食量。本研究发现,甜高粱的 WSC 和淀粉含量在抽穗期到乳熟期显著增高了 7.27% 和 4.58%,且此时 NDF、ADF 含量开始逐渐下降,说明抽穗期到乳熟期是甜高粱 WSC 和淀粉大量积累且 NDF 和 ADF 含量下降的关键时期。

3.3 不同收获期对甜高粱体外消化性能及可消化养分产量的影响

饲草的体外消化性能是体现其饲用价值的重要指标,有研究表明,饲草的 IVDMD 与各种纤维组分负相关,纤维含量的下降有利于提高 IVDMD^[25-26]。本研究中,甜高粱 IVDMD 在抽穗期下降后逐渐上升,在蜡熟期 IVDMD 最高,这与其 NDF 和 ADF 含量的变化趋势相反,延迟收获有利于提高甜高粱饲草的消化性能。这与朱慧森等^[27]的研究结果相反,可能是由于延迟甜高粱收获期 WSC 和淀粉含量上升同时 NDF 和 ADF 含量下降有关。饲草的可消化养分产量表明家畜可从单位土地面积上获得饲草

中的养分产量,直接体现饲草的饲用价值。本研究中,随甜高粱收获期的延迟可消化干物质产量和可消化中性洗涤纤维产量逐渐上升,在蜡熟期甜高粱可消化干物质产量最高,达到 $13.35 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,这与马金慧等^[28]对全株青贮玉米收获的可消化干物质产量 ($13.83 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 接近,说明甜高粱具有替代青贮玉米的潜力。本研究中,甜高粱可消化干物质产量的上升与干物质、干物质产量、淀粉含量和 WSC 含量的提高显著相关,在今后甜高粱的育种过程中,可能需要更多地关注甜高粱糖分的积累机制^[29],同时也需要更深入地挖掘甜高粱淀粉的合成潜力,以期提升甜高粱的饲用价值。本研究发现甜高粱粗蛋白含量较低,未来在宁夏中部地区可对甜高粱与豆科饲草混播混收混贮,以提高草地生产性能,稳定枯草季饲草供应。

4 结论

综上所述,甜高粱在蜡熟期收获, NDF 和 ADF 含量最低,干物质产量、WSC 含量、淀粉含量、IVDMD 最高,此时甜高粱的饲用价值较最高,并且在蜡熟期收获可产出最高的可消化干物质产量和可消化中性洗涤纤维产量,说明在干旱及盐碱化的宁夏中部地区,蜡熟期是甜高粱的适时收获期。同时对于甜高粱而言,单位土地面积可消化干物质产量和可消化中性洗涤纤维产量可以指导甜高粱适时收获期的选择。

参考文献 References:

- [1] 张丹,王楠,李超,谢旗,唐三元. 甜高粱:一种优质的饲料作物. 生物技术通报, 2019, 35(5): 2-8.
ZHANG D, WANG N, LI C, XIE Q, TANG S Y. Sweet sorghum: A high efficient and quality forage crop. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(5): 2-8.
- [2] 李欣欣,黄萍,庄义庆,杜浩,杜道林. 能源作物甜高粱抗逆性的研究进展. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1429-1433.
LI X X, HUANG P, ZHUANG Y Q, DU H, DU D L. Research advances of stress tolerance in sweet sorghum. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 32(6): 1429-1433.
- [3] 孙志强,罗樱宁,熊乙,高润,吴哲,玉柱. 甜高粱作为优质饲草在我国草牧业发展中的潜力分析. 中国草地学报, 2021, 43(3): 104-112.
SUN Z Q, LUO Y N, XIONG Y, GAO R, WU Z, Yuzhu. Evaluation of sweet sorghum as a high-quality forage in pasture livestock industry development. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(3): 104-112.
- [4] 王楠,陈诚轩,谢鹏,李晓,李超,唐三元,谢旗. 甜高粱作为反刍动物饲料的最佳收获期的研究. 生物技术通报, 2018, 34(10): 100-107.

- WANG N, CHEN C X, XIE P, LI X, LI C, TANG S Y, XIE Q. The best harvest time of sweet sorghum for forage based on biomass and nutritional quality. *Biotechnology Bulletin*, 2018, 34(10): 100-107.
- [5] GETACHEW G, PUTNAM D H, BEN C M, PETERS E J. Potential of sorghum as an alternative to corn forage. *American Journal of Plant Sciences*, 2016, 7(7): 1106-1121.
- [6] OLIVER A L, GRANT R J, PEDERSEN J F, O'REAR J. Comparison of brown midrib-6 and -18 forage sorghum with conventional sorghum and corn silage in diets of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(3): 637-644.
- [7] RAN T, TANG S X, YU X, HOU Z P, HOU F J, BEAUCHEMIN K A, YANG W Z, WU D Q. Diets varying in ratio of sweet sorghum silage to corn silage for lactating dairy cows: Feed intake, milk production, blood biochemistry, ruminal fermentation, and ruminal microbial community. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(12): 12600-12615.
- [8] 袁闯, 许兴, 毛桂莲, 朱林. 甜高粱成熟期抗旱性指标筛选与评价方法. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 280-289.
- YUAN C, XU X, MAO G L, ZHU L. Screening and evaluation methods of drought resistance index of sweet sorghum at maturity. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 280-289.
- [9] 沈笑天, 邓雪, 李满有, 王斌, 曹立娟, 倪旺, 兰剑, 宁夏雨养区饲用甜高粱品种的生产性能和营养价值. 草业科学, 2022, 39(6): 1235-1244.
- SEHN X T, DENG X, LI M Y, WANG B, CAO L J, NI W, LAN J. Comparative study of production performance and nutritional value of *Sorghum dochna* varieties in rainfed areas in Ningxia, China. *Pratacultural Science*, 2022, 39(6): 1235-1244.
- [10] 王海莲, 王润丰, 刘宾, 张华文, 不同生长时期收获对甜高粱农艺性状及营养品质的影响. 中国农业科学, 2020, 53(14): 2804-2813.
- WANG H L, WANG R F, LIU B, ZHANG H W. Effects of harvesting at different growth stage on agronomic and nutritional quality related traits of sweet sorghum. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(14): 2804-2813.
- [11] 李春宏, 苏衍菁, 张培通, 王仪明, 郭文琦, 殷剑美, 韩晓勇, 王立, 火恩杰, 不同刈割时期对甜高粱产量和品质的影响. 南方农业学报, 2018, 49(2): 239-245.
- LI C H, SU Y Q, ZHANG P T, WANG Y M, GUO W Q, YIN J M, HAN X Y, WANG L, HUO E J. Effects of different mowing times on yield and quality of sweet sorghum. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49(2): 239-245.
- [12] 王莹. 内蒙古荒漠草原主要植物养分含量、体外消化及产气特征研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2019.
- WANG Y. Study on nutrient content, in vitro digestion and gas production characteristics of main plants in Inner Mongolia Desert Steppe. Master Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019.
- [13] ATIS I, KONUSKAN O, DURU M, GOZUBENLI H, YILMAZ S. Effect of harvesting time on yield, composition and forage quality of some forage sorghum cultivars. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2012, 14(6): 879-886.
- [14] 冯国郡, 叶凯, 涂振东, 郭建富, 再吐尼古丽·库尔班. 甜高粱主要农艺性状相关性和主成分分析. 新疆农业科学, 2010, 47(8): 1552-1556.
- FENG G J, YE K, TU Z D, GUO J F, Zaituniguli-Kuerban. Analysis on correlation and principal component of major agronomic trait of sweet sorghum. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2010, 47(8): 1552-1556.
- [15] 谷健, 孙占祥, 尹光华, 马宁宁, 王子豪, 郭金路, 刘泳圻, 辽西半干旱区浅埋滴灌对春玉米生长的影响. 辽宁农业科学, 2022(2): 1-7.
- GU J, SUN Z X, YIN G H, MA N N, WANG Z H, GUO J L, LIU Y Q. Effects of shallow-buried drip Irrigation on spring maize growth in semiarid region of western Liaoning Province. *Liaoning Agricultural Sciences*, 2022(2): 1-7.
- [16] 朱长山. 单子叶植物茎的增粗生长. 植物杂志, 1989(1): 31.
- ZHU C S. The thickening growth of monocotyledonous plant stems. *Life World*, 1989(1): 31.
- [17] 王太行, 潘成才, 王宇, 朱昆宇, 夏金泽, 吉怡颖, 伍治中, 江行玉, 周扬, 不同刈割时期对甜高粱农艺性状及营养品质的影响. 热带生物学报, 2022, 13(5): 502-508.
- WANG T H, PAN C C, WANG Y, ZHU K Y, XIA J Z, JI Y Y, WU Z Z, JIANG H Y, ZHOU Y. Analysis on agronomic characters and nutritional quality of sweet sorghum after cutting in different stages. *Journal of Tropical Biology*, 2022, 13(5): 502-508.
- [18] BERNSTEIN L. Effects of salinity and sodicity on plant-growth. *Annual Review of Phytopathology*, 1975, 13: 295-312.
- [19] CAKIR R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. *Field Crops*

- Research, 2004, 89(1): 1-16.
- [20] MI N, CAI F, ZHANG Y S, JI R P, ZHANG S J, WANG Y. Differential responses of maize yield to drought at vegetative and reproductive stages. *Plant Soil and Environment*, 2018, 64(6): 260-267.
- [21] LYONS S E, KETTERINGS Q M, GODWIN G S, CHERNEY D J, CHERNEY J H, VAN AMBURGH M E, MEISINGER J J, KILCER T F. Optimal harvest timing for brown midrib forage sorghum yield, nutritive value, and ration performance. *Journal of Dairy Science*, 2019, 102(8): 7134-7149.
- [22] 张吉鹏. 粗饲料分级指数参数的模型化及粗饲料科学搭配的组合效应研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学博士学位论文, 2005.
- ZHANG J K. Study on modelling of forage grading index paramaters and associative effects in mixed forages. PhD Thesis. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2005.
- [23] 李影正, 严旭, 吴子周, 杨春燕, 李晓锋, 何如钰, 张萍, EBENEZER Kofi Sam, 周阳, 张磊, 荣廷昭, 何建美, 唐祈林. 饲草玉米不同生育期的产量、品质和青贮利用研究. *草业学报*, 2019, 28(7): 82-91.
- LI Y Z, YAN X, WU Z Z, YANG C Y, LI X F, HE R Y, ZHANG P, EBENEZER K S, ZHOU Y, ZHANG L, RONG T Z, HE J M, TANG Q L. Forage maize type and growth stage effects on biomass yield and silage quality. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(7): 82-91.
- [24] NOMBEKELA S W, MURPHY M R, GONYOU H W, MARDEN J I. Dietary preferences in early lactation cows as affected by primary tastes and some common feed flavors. *Journal of Dairy Science*, 1994, 77(8): 2393-2399.
- [25] LIU Q H, LI X Y, DESTA S T, ZHANG J G, SHAO T. Effects of *Lactobacillus plantarum* and fibrolytic enzyme on the fermentation quality and *in vitro* digestibility of total mixed rations silage including rape straw. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15(9): 2087-2096.
- [26] 吴永杰, 丁浩, 邵涛, 赵杰, 董东, 代童童, 尹雪敬, 宗成, 李君凤, 酶制剂对水稻秸秆青贮发酵品质及体外消化特性的影响. *草业学报*, 2022, 31(8): 167-177.
- WU Y J, DING H, SHAO T, ZHAO J, DONG D, DAI T T, YIN X J, ZONG C, LI J F. Effects of enzyme additives on fermentation quality and *in vitro* digestion characteristics of rice straw silage. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(8): 167-177.
- [27] 朱慧森, 邹新平, 玉柱, 高文俊, 王永新, 佟莉蓉, 许庆方. 青贮玉米生产性能对收获期的响应及收获指数的探讨. *畜牧兽医学报*, 2015, 46(8): 1375-1382.
- ZHU H S, ZOU X P, Yuzhu, GAO W J, WANG Y X, TONG L R, XU Q F. Response of productive qualities of corn silage to harvest time and exploration of harvest index of corn silage. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2015, 46(8): 1375-1382.
- [28] 马金慧, 范富, 包呼格吉乐图, 朱全胜, 牛化欣, 不同收获时期的玉米饲用生物学产量和营养价值的比较研究. *饲料研究*, 2022, 45(19): 104-108.
- MA J H, FAN F, Baohugejiletu, ZHU Q S, NIU H X. Comparative study on feeding biological yield and nutritional value of maize in different harvest periods. *Feed Research*, 2022, 45(19): 104-108.
- [29] 郝怀庆, 张汝, 卢呈, 罗洪, 李志刚, 尚丽, 王宁, 刘智全, 吴小园, 景海春, 甜高粱育种研究进展及未来展望. *植物学报*, 2022, 57(6): 774-784.
- HAO H Q, ZHANG R, LU C, LUO H, LI Z G, SHANG L, WANG N, LIU Z Q, WU X Y, JING H C. Research progress and future perspective of sweet sorghum breeding. *Chinese Bulletin of Botany*, 2022, 57(6): 774-784.

(责任编辑 王芳)

如有印装质量问题, 请将原杂志寄回本刊编辑部, 由本部负责调换。