

盤固草生物炭添加對芻料燕麥青貯品質及其應用潛力之研究⁽¹⁾

王紓愷⁽²⁾⁽⁴⁾ 劉建甫⁽³⁾ 陳嘉昇⁽²⁾

收件日期：114 年 6 月 17 日；接受日期：114 年 8 月 1 日

摘 要

本研究以芻料燕麥為材料，評估添加盤固草生物炭（以下簡稱草炭）對青貯品質的影響，探討其做為青貯添加之應用性，以期發揮生物炭在動物飼料與環境議題之多元效應。試驗以畜產試驗所南區分所（以下簡稱南區分所）選育之燕麥品系 43 及 26 為材料，各進行 6 批次青貯試驗，試驗以實驗室規模真空袋青貯方式進行，青貯處理包括 CK（對照，無添加）、CCK（添加平衡草炭，5 g/kg；平衡草炭：添加乳酸之草炭，0.02 g/g）、I（接種商業菌劑，南區分所技轉菌株，*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, 2×10^8 cfu/kg）、CI（同時添加平衡草炭及接種商業菌劑，比例同前）、LA（添加乳酸，0.1 g/kg），青貯 4.5 個月。試驗顯示，相對於品系及乾物率，草炭非主要影響發酵品質之因素；2 品系燕麥的表現不盡相同；在低乾物率下，所有青貯處理均表現不佳；品系 43 在 38.4% 乾物率下，I 及 CI 處理之青貯評分（Flieg's score）為「優良」，其餘 3 處理之品質不佳，在 44.2% 乾物率下，I 及 CI 處理之青貯品質評分為「優良」，其餘處理為「可接受」；品系 26 在乾物率 41.5 及 50.0% 下，所有青貯處理之青貯品質評分均在「可接受」以上，其中 LA 處理及部分 CI、CCK 處理之評分為「優良」。整體而言，添加草炭 0.5% fw 對燕麥青貯發酵無不良影響，具備青貯添加應用的可行性，可提供未來生物炭農牧應用開發的參考。此外，40% 乾物率可能為影響燕麥青貯發酵品質的調製界限。

關鍵詞：盤固草炭、芻料燕麥、青貯、發酵品質。

緒 言

生物炭 (biochar) 是生物質 (biomass) 在低氧環境下高溫裂解 (pyrolysis) 的固體產物。生物質中的碳聚合物 (纖維素、半纖維素、木質素等) 在高溫下，因裂解及縮合會形成各種不同程度的孔洞與官能基，使生物炭具有多孔性、高比表面積及特殊的吸附能力，可在污染物質去除及除臭等方面可發揮明顯效果 (Chen *et al.*, 2010; Agyarko-Mintah *et al.*, 2017)，同時這些孔洞也可作為微生物的居所，使得施用生物炭的土壤增加微生物相豐富度、改善土壤的保水、通氣與團粒結構。另外高溫炭化的生物炭結構穩定不易礦化，估計可以留存百年以上，收土壤碳匯 (carbon sequestration) 之效，可做為淨零減碳措施之一。因此，近年在減緩全球暖化議題的推升下，生物炭的相關研究與應用快速發展，除能源外已擴展至環境維護、農業生產等多元化利用 (Lehannes and Joseph, 2009; Schmidt, 2012; Windeatt *et al.*, 2014; Purakayastha *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2017; Ayeneshet and Temesgen, 2025)。此外，生物炭特殊的理化特性，也被應用於飼糧添加劑，做為減少攝入有害物質、改善動物健康與生產表現等 (Schmidt *et al.*, 2019; Willson *et al.*, 2019; Lao and Mbega, 2020)。Qomariyah *et al.* (2023) 的統合分析顯示，生物炭的添加在體外與體內實驗中皆展現出一致性的效果，作為飼料添加劑使用時，生物炭具有提升動物健康潛力、飼料效率與畜牧生產力，並能減少營養損失與溫室氣體排放。最重要的是，在所回顧的文獻中，並未發現生物炭對動物健康有顯著的負面影響。

(1) 農業部畜產試驗所研究報告第 2836 號。

(2) 農業部畜產試驗所南區分所。

(3) 國立臺灣大學。

(4) 通訊作者，E-mail: smwang@mail.gov.tw。

盤固草為臺灣主要栽培的多年生牧草之一，以乾草調製為主，然每年都有部分盤固草會因為調製過程的天候影響或倉儲條件不佳而無法供作芻料利用，畜產試驗所南區分所（以下簡稱南區分所）利用自行開發的炭窯進行炭化，生產盤固草炭（以下簡稱草炭，PB）。草炭可應用於牧草生產與牧草地土壤改良，也有助於牧地土壤碳滙及畜牧場除臭與墊料應用（王等，2018c；王等，2018d；劉等，2019；王等，2021）。

燕麥為世界重要穀類作物，除提供人類食用外，主要做為芻料利用。國內進口乾草中燕麥乾草即占比不小。國立臺灣大學早在 1979 年即已選育出適於青刈利用的臺大選 1 號，並發表週年栽培的生育表現（劉及曾，1984）。此後，國內雖陸續有燕麥的栽培，但多為零星小規模利用且多為國外商用品系（蕭，2013；王等，2018a；王等，2018b；梁等，2018；陳等，2021）。2015 年南區分所與台灣大學農藝學系合作進行芻料燕麥之選育，由 Quaker International Oat Nursery (QION) 引入 71 個燕麥純系，本試驗之品系 43 及 26 即來自於此，為經數年選育具地區適應性且表現較佳者。品系 43 來自巴西，為中熟種，葉片多、穀粒多；品系 26 來自美國，為晚熟種，具中至高等生物量、高株。

本研究以南區分所燕麥品系 43 及 26 進行添加草炭的青貯試驗，一方面增加對新燕麥品系調製的掌握能力，另一方面則希望藉此試驗增加草炭之應用性，供後續開發參考。

材料與方法

I. 材料

- (i) 燕麥品系 26、43 於 109 年 11 月 19 日種植於南區分所試驗區，試驗品系 43 分別於 2 月 23 日（抽穗期）及 3 月 3 日（糊熟期）收穫，品系 26 則於 3 月 9 日（抽穗期）及 3 月 17 日（糊熟期）收穫。收穫時間均為下午，2 月 23 日收穫之材料均分為三份，一份於細切後立即進行青貯處理，另二份材料分別於萎凋 19 及 24 小時後以相同的方式進行青貯處理。3 月 3 日、3 月 9 日及 3 月 17 日收穫之材料同樣均分為三份，一份於細切後立即進行青貯處理，另二份材料分別於萎凋 24 及 48 小時後以相同的方式進行青貯處理。青貯處理前均取樣測定含水率及植體營養組成（表 1）。

表 1. 青貯試驗前材料的乾物率及化學組成

Table 1. Dry matter content and chemical compositions of forage used in ensiling experiments

Line	Harvest date	Maturity	Wilting h	Dry matter %	Crude protein	Neutral detergent fiber	Acid detergent fiber	Water solu-ble carbohydrate	Starch
					----- % dry base -----				
43	2/23	Head	0	17.8	9.4	60.4	39.8	5.2	3.9
43	2/23	Head	16	24.7	9.5	59.3	39.2	3.5	6.5
43	2/23	Head	24	28.4	9.6	59.3	39.2	3.4	6.0
43	3/3	Dough	0	27.0	7.7	54.7	36.1	2.9	16.1
43	3/3	Dough	24	38.4	9.1	53.9	37.1	2.7	13.0
43	3/3	Dough	48	44.2	9.8	54.2	36.7	2.1	17.5
26	3/9	Head	0	24.5	7.4	62.0	41.6	4.8	3.6
26	3/9	Head	24	37.8	7.2	64.9	44.9	2.1	3.2
26	3/9	Head	48	39.8	7.6	64.5	42.5	3.3	4.2
26	3/17	Dough	0	29.4	7.4	62.2	40.6	4.2	8.1
26	3/17	Dough	24	41.6	8.0	61.4	41.1	3.6	7.3
26	3/17	Dough	48	50.0	6.8	63.6	42.4	3.3	9.7

- (ii) 草炭：自行生產，原料為品質不佳的盤固草乾草包，以自行設計的炭化窯進行炭化，炭化最高溫度 (HTT, highest treatment temperature) 約 400 – 500°C，炭化時間約 10 小時。草炭的基本特性如表 2。草炭冷卻後以桌上型磨粉機磨為 < 1 mm 的粉末，每 100 g 草炭加入 20 mL 10% 乳酸混合均勻（乳酸添加量為 2%），添加

乳酸之草炭以下簡稱平衡草炭，製備後以夾鏈袋密封保存於室溫下，供後續試驗。

- (iii) 生物炭特性分析：包括 pH 值、電導度 (electrical conductivity, EC) 及組成含量 (碳、氮、磷、鉀、鈣、鎂、銅、鋅及灰分)。pH 及 EC 為草炭 / 蒸餾水 (1/1) 萃取後之測值。碳以總碳分析儀測定 (Analytik Jena Multi EA 4000, 德國)。氮、磷、鉀、鈣、鎂、銅、鋅等元素分析是利用濃硫酸及 H₂O₂，於 400°C 高溫分解至澄清，稀釋定量後保存於冰箱中，再分別經凱式氮測定儀測定總氮，磷以鉬藍法呈色後以分光光度計測定，鉀、鈣、鎂、銅、鋅則以原子光譜儀 (Hitachi ZA3300, 日本) 測定 (Enders and Lehmann, 2012)。灰分為 600°C 下 6 h 的殘存重量比。

表 2. 盤固草生物炭的組成及特性

Table 2. The compositions and properties of pangolagrass biochar

	pH	EC*	C	N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Ash
		mScm ⁻¹	----- % -----								
			----- mgkg ⁻¹ -----								
Mean	9.6	5.0	64.2	1.7	2.0	3.8	0.2	0.4	15.7	8.7	12.9
Max.	9.9	7.5	73.0	2.3	2.3	4.8	0.3	0.5	20.8	10.8	14.1
Min.	8.7	2.9	54.2	1.0	1.5	2.7	0.1	0.3	10.8	7.5	12.1
CV.# (%)	5.4	38.9	20.0	11.3	20.4	19.7	9.3	24.5	14.6	9.0	5.0

CV. (coefficient of variation), n = 13.

* EC: Electrical conductivity.

II. 試驗材料組成分析

前述各試驗材料於試驗前各自取樣，於 80°C 烘乾後磨粉，供後續分析用。粗蛋白質 (crude protein, CP) 含量依照 AOAC (1984) 之方法測定；酸洗纖維 (aciddetergent fiber, ADF)、中洗纖維 (neutraldetergent fiber, NDF) 則依照 van Soest (1991) 方法以濾袋法測定 (Ankom 2000)；水溶性碳水化合物 (water soluble carbohydrates, WSC) 含量測定：樣品以 80% 的酒精於 80°C 下萃取四次，置 70°C 烘箱中去除酒精，合併萃取液並定量，依 Morris (1948) 方法，採 anthrone 呈色法進行；澱粉的測定：先以 80% 的酒精於 80°C 下萃取除去 WSC，棄去萃取液，樣品烘乾後加入過氯酸加熱水解，定量後同樣以 anthrone 呈色法測定含量。每一樣品重複 2 次。

III. 青貯處理

除 2 月 23 日收穫之材料無 LA 處理外，其他均有。青貯時，材料依處理數均勻分堆，分別進行下列處理：CK (對照，無添加)、CCK (添加平衡草炭，5 g/kg)、I (接種商業菌劑，畜試所南區分所技轉菌株，*Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, 2 × 10⁸ cfu/kg)、CI (同時添加平衡草炭及接種商業菌劑，比例同前)、LA (添加乳酸，0.1 g/kg)。材料依處理混合均勻，以真空袋密封青貯，每袋 1 kg。青貯料置於室溫下，貯存 4.5 個月後每處理開封 2 袋，測定乾物率、pH 值及各短鏈揮發性脂肪酸含量，並計算青貯評分 (Flieg's score) 及乾物質損失率。

IV. 青貯品質分析

乾物率為 70°C 下烘乾 48 小時之乾鮮重比。pH 值為 20 g 新鮮青貯料加蒸餾水 180 mL，打碎過濾後以酸鹼度計測定之值。乳酸、丁酸、丙酸及乙酸之測定以氣相層析儀依 Jones and Kay (1976) 的方法進行，將前述青貯萃取液經過陽離子管柱，洗出液以 0.05 N tetrabutyl ammonium hydroxide (TBAH) 滴定至 pH 為 8，70°C 下烘乾，加入定量丙酮溶解，並依 TBAH 滴定量，加入適量 benzyl bromide 與揮發性脂肪酸反應，樣品製備完成，再以氣相層析儀 (Shimadzu, GC-2014, Japan) 分析含量。管柱溫度 120 – 180°C，火焰離子偵測器 (Flame ionization detector, FID) 溫度 250°C，管柱流速 3.8 ml/min，攜帶氣體為氬氣，以巴豆酸 (Crotonic acid) 為內標準品。依青貯料中乳酸、丁酸及乙酸當量分別占測定乙酸、丙酸、丁酸與乳酸四者總當量之百分比進行評分，再將 3 項總加所得即為 Flieg's score，評分 40 以下表示「青貯失敗」、40 – 60 分為「可接受」、60 – 80 分為「好」的青貯、80 分以上為發酵「優良」的青貯。由於真空密封青貯無滲漏損失，乾物損失率計算以青貯前後之乾物率比計算。

V. 統計

試驗結果以 SAS 軟體 (2002) 之 GLM procedure 進行變方分析，主效應為收穫成熟度、萎凋程度及青貯處理，各主效應均為固定型，以鄧肯氏法 (Duncan's test) 測驗各處理間的差異顯著性。二品系燕麥分別進行分析。

結果與討論

I. 變方分析與主效應比較

本試驗中燕麥品系 43 的青貯前乾物率介於 17.8 – 44.2%，水溶性碳水化合物含量介於 2.1 – 5.2% (表 1)。表 3 變方分析結果顯示，除乾物質損失外，成熟度對 pH 值、青貯評分、乙酸、丙酸、丁酸、乳酸、總酸含量等各項青貯表現上均影響極顯著，為最大的影響因子；萎凋程度則除 pH 值及丙酸含量外，對其他各項均影響顯著或極顯著；而青貯處理則除丁酸及總酸含量外，對其他各項均為影響顯著或極顯著。交感效應方面，成熟度與萎凋的交感效應對各項均影響極顯著；成熟度與青貯處理交感則除丙酸含量及乾物質損失外均影響極顯著；萎凋與青貯處理交感效應除乾物質損失不顯著外，其他各項影響均為顯著或極顯著。成熟度、萎凋程度及青貯處理之主效應比較如表 4。基本上，品系 43 在較晚收穫的青貯表現明顯優於較早收穫的材料；材料經萎凋再青貯的表現均顯著優於直接青貯；各青貯處理則以對照處理之表現最差，僅添加平衡草炭的表現與對照無顯著差異，其他添加劑處理組則有增加乳酸含量的效果。

表 3. 成熟度、萎凋程度及青貯處理對燕麥品系 43 青貯品質影響之變方分析表

Table 3. Analysis of variance for the silage qualities of oat line 43 silage in different maturities, wilting levels and ensiling treatments

Source	DF ⁺	Mean square [#]							
		pH	Score [#]	A	P	B	L	TA	DM loss
Maturity (M)	1	1.78**	8,988.5**	21.04**	3.11**	58.4**	23.8**	83.0**	99.2
Wilting (W)	2	0.06	3,713.8**	4.37**	0.05	16.6**	8.8**	11.8**	111.9*
Treatment (T)	4	0.32**	932.2**	0.27*	0.40**	0.4	2.9**	0.2	112.9*
M × W	2	1.01**	1966.0**	1.98**	1.07**	11.9**	5.8**	8.9**	269.9**
M × T	4	0.27**	823.7**	0.55**	0.03	1.0**	2.3**	1.7**	2.4
W × T	8	0.09*	229.7**	0.22**	0.11**	0.9**	1.0**	0.2**	62.3
Error	38	0.03	43.7	0.07	0.02	0.2	0.2	0.4	29.7

⁺ DF: degree of freedom.

* Significant at 5% level, ** Significant at 1% level.

[#] Score: Flieg's score, A: acetic acid content, P: propionic acid content, B: butyric acid content, L: lactic acid content, TA: total acid content, DM loss: dry matter loss.

表 4. 不同成熟度、萎凋程度及青貯處理對燕麥品系 43 青貯品質之影響

Table 4. The effects of different maturities, wilting levels and ensiling treatments on silage quality of oat line 43

Item	pH	Score [#]	% dry base						DM loss
			A	P	B	L	TA		
Head	5.4 ^a	17.5 ^b	1.97 ^a	0.89 ^a	4.05 ^a	0.09 ^b	7.00 ^a	6.12	
Dough	5.0 ^b	43.6 ^a	0.70 ^b	0.40 ^b	1.95 ^b	1.43 ^a	4.48 ^b	8.87	
No wilting	5.1	16.8 ^c	1.83 ^a	0.66	4.00 ^a	0.04 ^b	6.51 ^a	10.5 ^a	
Low wilting	5.2	34.3 ^b	0.94 ^b	0.62	2.32 ^b	1.14 ^a	5.02 ^b	6.6 ^b	
High wilting	5.2	44.9 ^a	1.03 ^b	0.57	2.37 ^b	1.31 ^a	5.30 ^b	5.7 ^b	
CK*	5.3 ^a	21.8 ^c	1.62 ^a	0.85 ^a	3.11 ^a	0.35 ^c	5.92 ^a	10.8 ^{ab}	
CCK	5.3 ^a	25.8 ^{bc}	1.42 ^{ab}	0.80 ^a	2.92 ^a	0.40 ^{bc}	5.55 ^a	8.3 ^{abc}	
I	5.0 ^b	39.3 ^a	1.20 ^b	0.48 ^b	2.88 ^a	1.27 ^a	5.83 ^a	3.3 ^c	
CI	5.0 ^b	39.7 ^a	1.17 ^b	0.42 ^b	2.98 ^a	1.26 ^a	5.85 ^a	5.9 ^{bc}	
LA	5.2 ^a	31.0 ^b	0.68 ^c	0.51 ^b	2.35 ^b	0.77 ^b	4.31 ^b	12.5 ^a	

[#] The same as table 2.

^{a, b, c} Means with different superscripts in the same column and section are significantly different ($P < 0.05$).

*: CK: control, CCK: balanced PB, I: inoculant, CI: inoculant + balanced PB, LA: lactic acid.

燕麥品系 26 不同收穫期及萎凋時間的青貯前乾物率介於 24.5 – 50.0%，水溶性碳水化合物含量介於 2.1 – 4.8% (表 1)。由變方分析結果 (表 5)，同樣是以成熟度為影響青貯最大的變因，對所有青貯表現均影響極顯著；萎凋的影響其次，除 pH 值外，其他各項青貯表現均影響極顯著；青貯處理則除對丙酸及總酸含量影響極顯著外，其他均不顯著。交感效應方面以成熟度與萎凋交感影響最大，除 pH 值外，對其他各項青貯表現均影響顯著或極顯著；成熟度與青貯處理間無交感效應；萎凋與青貯處理交感效應顯現於 pH 值、乙酸、總酸含量及乾物質損失 4 項。表 6 結果顯示，較晚收穫之青貯表現顯著優於較早收穫之材料；萎凋後青貯的青貯品質顯著優於直接青貯；青貯處理間同樣以對照組的青貯品值最差，其他添加處理之乳酸含量均較對照組高但差異不顯著。

表 5. 成熟度、萎凋程度及青貯處理對燕麥品系 26 青貯品質影響之變方分析表

Table 5. Analysis of variance for the silage qualities of oat line 26 silage in different maturities, wilting and levels ensiling treatments

Source	DF ⁺	Mean square							
		pH	Score [#]	A	P	B	L	TA	DM loss
Maturity (M)	1	3.26**	11,426.4**	10.82**	4.14**	29.2**	31.4**	26.3**	4,154.0**
Wilting (W)	2	0.56	2,872.1**	4.46**	0.59**	27.6**	6.3**	34.7**	406.3**
Treatment (T)	4	0.11	610.9	0.04	0.12**	0.2	0.6	1.0**	5.2
M × W	2	1.02	2,414.8**	1.19**	0.23**	1.1*	4.9**	4.4**	473.9**
M × T	4	0.03	579.8	0.05	0.01	0.5	0.7	0.2	18.4
W × T	8	0.12*	1,854.7	0.21**	0.31	0.4	1.3	0.9**	43.5**
Error	38	0.04	5,384.0	0.03	0.79	0.2	0.7	0.2	10.5

⁺DF: degree of freedom.

*: Significant at 5% level, **: Significant at 1% level.

[#] The same as table 2.

表 6. 不同成熟度、萎凋程度及青貯處理對燕麥品系 26 青貯品質之影響

Table 6. The effects of different maturities, wilting levels and ensiling treatments on silage quality of oat line 26

Item	pH	Score [#]	A	P	B	L	TA	DM loss
----- % dry base -----								
Head	5.6 ^a	21.4 ^b	1.38 ^a	0.85 ^a	2.88 ^a	0.27 ^b	5.37 ^a	22.4 ^a
Dough	5.1 ^b	49.0 ^a	0.53 ^b	0.32 ^b	1.48 ^b	1.72 ^a	4.05 ^b	5.7 ^b
No wilting	5.3	21.6 ^b	1.41 ^a	0.75 ^a	3.48 ^a	0.35 ^b	5.99 ^a	13.1 ^b
Low wilting	5.3	40.0 ^a	0.97 ^b	0.59 ^b	1.87 ^b	1.35 ^a	4.78 ^b	19.0 ^a
High wilting	5.4	44.1 ^a	0.47 ^c	0.41 ^c	1.19 ^b	1.29 ^a	3.36 ^c	10.1 ^c
CK*	5.47 ^a	31.3	0.92 ^{ab}	0.72 ^a	2.17	0.65	4.46 ^b	12.9
CCK	5.36 ^{ab}	37.4	0.89 ^b	0.61 ^{ab}	1.95	1.14	4.59 ^b	14.6
I	5.31 ^{ab}	31.7	0.93 ^{ab}	0.49 ^b	2.23	0.89	4.53 ^b	14.2
CI	5.23 ^b	36.4	0.98 ^{ab}	0.49 ^b	2.22	1.13	4.81 ^{ab}	14.3
LA	5.26 ^b	39.3	1.05 ^a	0.62 ^a	2.33	1.19	5.17 ^a	14.3

[#] The same as table 2.

^{a, b, c} Means with different superscripts in the same column and section are significantly different (P < 0.05).

* The same as table 4.

綜合前述，2 燕麥品系的青貯表現不盡相同，但均以收穫成熟度為影響其青貯品質最大的因子，其次為萎凋的程度，相對的，不同青貯處理的影響程度較低。

II. 乾物率與燕麥青貯品質的變動

由表 1 可以了解本試驗的燕麥材料乾物率的變動範圍極大，而水溶性碳水化合物含量的範圍相對極窄，進

一步檢視顯示，材料的乾物率差異可能是其內在主要的影響機制。圖 1 為品系 43 及 26 在 6 個批次青貯試驗下，材料乾物率與開封後各處理之乙酸、丁酸、乳酸含量以及青貯評分間的變動情形。不論品系及青貯添加處理為何，乙酸與丁酸含量大致隨材料乾物率增加而降低，各青貯處理的影響不大，顯示環境(材料)的水活性可能是影響此二種發酵產酸的重要因子。乳酸含量的變動則不僅與材料之乾物率有關，同時也與青貯處理有關，由圖 1，品系 43 在乾物率較低的情形下，各青貯處理的乳酸含量均極低，但在較高乾物率 38.4 及 44.2% (3/3 收穫，萎凋 24 及 48 h) 條件下，青貯處理 I 及 CI 的乳酸含量較其他青貯處理高；品系 26 的表現與品系 43 略為不同，但同樣在低乾物率的條件下，所有青貯處理之乳酸含量均極低，在乾物率 28.2% 以上則出現青貯處理的差異，但各處理間表現不一致。然二品系燕麥均顯示乾物率是影響燕麥青貯品質的重要因子，由本試驗，品系 43 在 38.4% 乾物率下，I 及 CI 處理之青貯評分為「優良」，其餘 3 處理之品質不佳，在 44.2% 乾物率下，所有青貯品質評分均為「可接受」以上，其中 I 及 CI 處理為「優良」，品系 26 在乾物率 41.5 及 50.0% 下，所有青貯品質評分均為「可接受」以上，其中 LA 處理及部分 CI、CCK 處理之評分為「優良」，顯示 40% 乾物率可能為影響燕麥青貯發酵品質的調製界限。

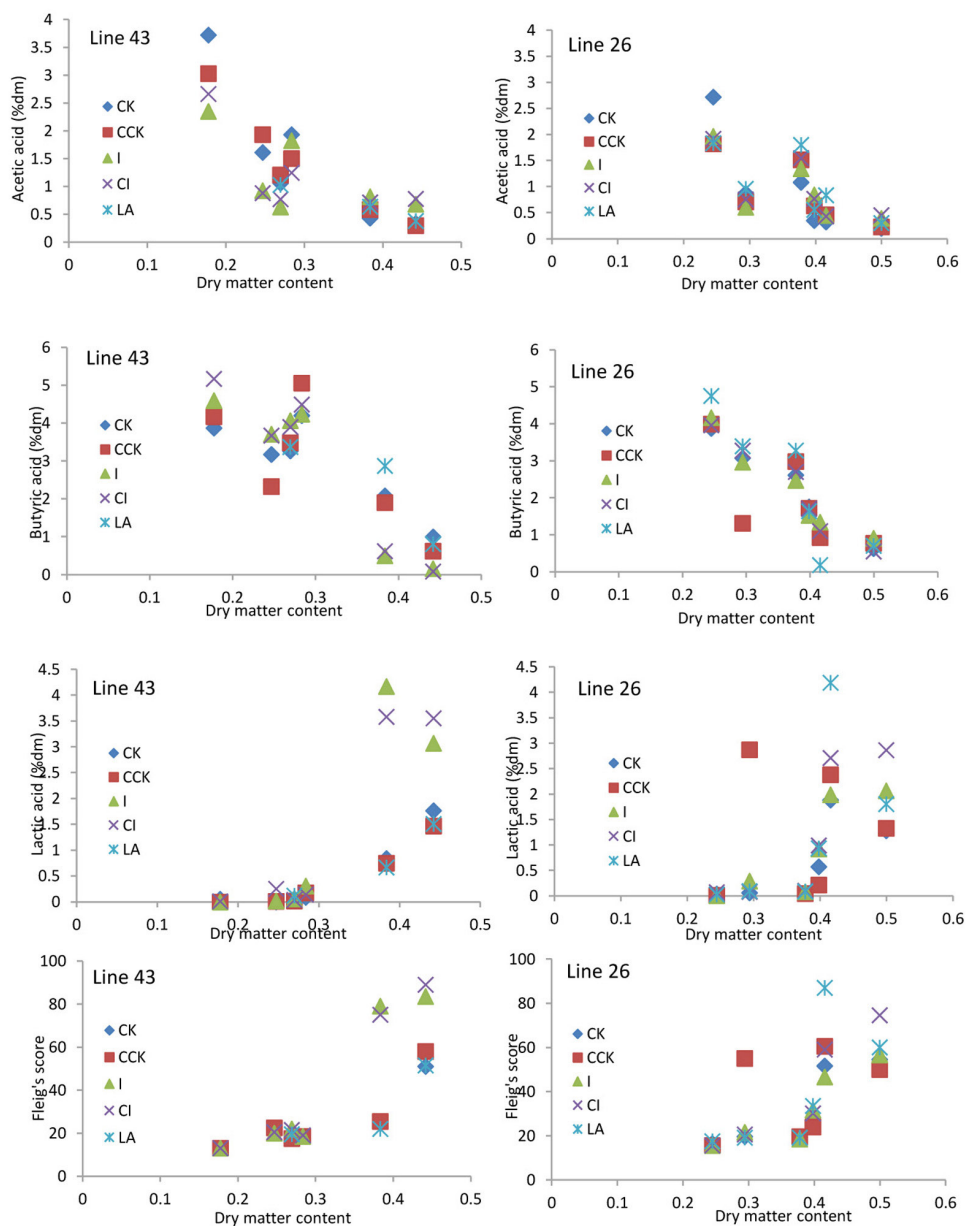


圖 1. 燕麥品系 43 與 26 在不同青貯處理條件下，材料乾物率與各發酵產酸含量之間，以及材料乾物率與青貯評分之間的變異關係。

Fig. 1. Variations between dry matter content and fermentation acid production, and between dry matter content and Fleig's scores in oat lines 43 and 26 under different ensiling treatments. CK: control, CCK: balanced PB, I: inoculant, CI: inoculant + balanced PB, LA: lactic acid.

III. 青貯處理的影響

由表 3、表 5 及圖 1 可知青貯處理並非影響本試驗的主要因子，在乾物率較低的情形下，青貯 4.5 個月的燕麥均發酵不佳，發酵產酸以丁酸為主，乳酸含量極低，僅在材料乾物率較適當的條件下，不同的青貯處理始有顯現效益的空間。整體而言，2 品系所有青貯添加處理之乳酸含量均及評分均較不添加的對照處理為高，其中，品系 43 之 I、CI 及 LA 處理的乳酸含量及評分顯著高於對照 (表 4、6)。圖 2 則顯示處理 CCK 相對 CK 以及處理 CI 相對於 I 的發酵表現相近，表示添加草炭並未對燕麥的青貯發酵產生抑制或不良的影響。

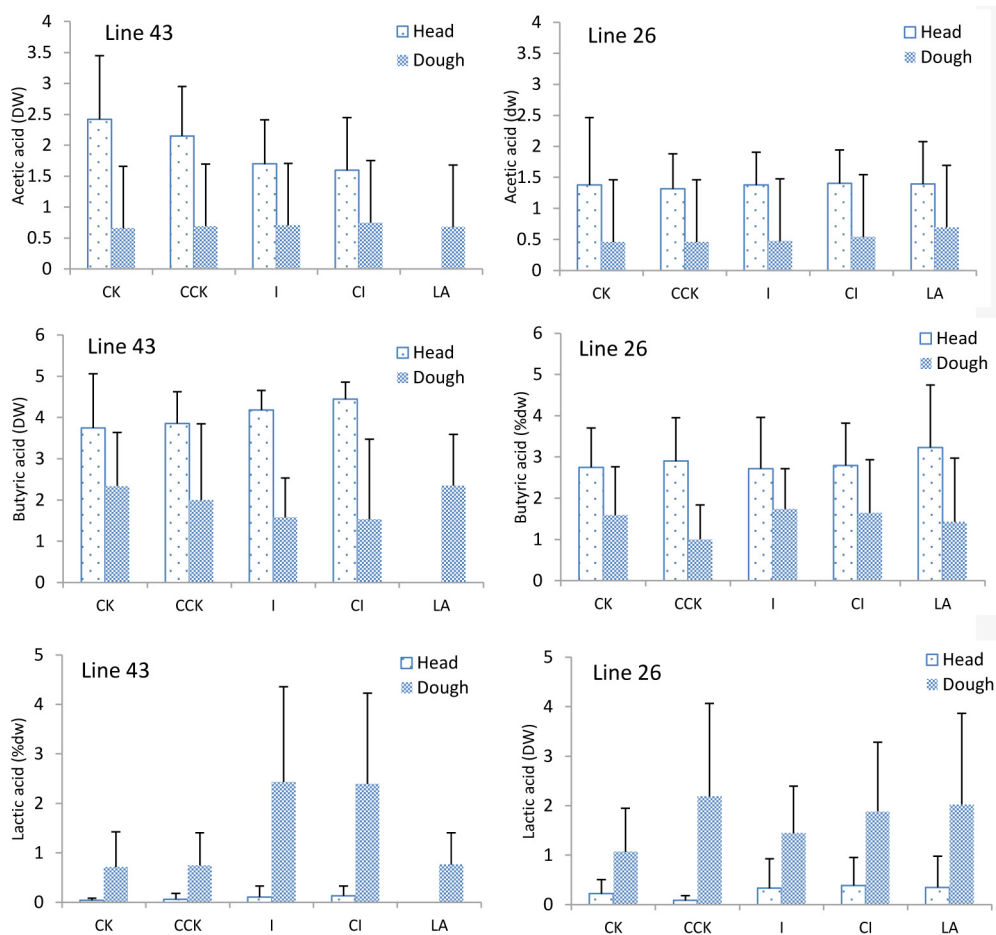


圖 2. 燕麥品系 43 及 26 在不同收穫成熟度與青貯處理下乙酸、丁酸及乳酸含量之平均表現。

Fig. 2. Average contents of acetic acid, butyric acid and lactic acid in oat lines 43 and 26 at different harvest maturity and silage treatments. CK: control, CCK: balanced PB, I: inoculant, CI: inoculant + balanced PB, LA: lactic acid.

IV. 討論

為因應氣候變遷，應用生物炭於農業土壤改良或增加碳匯的研究迅速增加，但由於生物炭容重低、多塵以及施用於山地牧場時易有損失風險，直接施用生物炭於土壤確具挑戰性。*Pereira et al. (2014)* 以體外培養試驗測試生物炭與青貯飼料或乾草混合後對瘤胃發酵的影響，結果顯示牲畜是合適的載體，使用牛作為輸送系統可能做為在紐西蘭牧區土壤安全施用生物炭的新方法。2012 年澳洲一個 53 公頃的農場則進行一項創新計畫，將生物炭與糖蜜混合後直接餵食乳牛，藉由糞金龜將糞便—生物炭混合物摻入土壤剖面，調查持續三年土壤性質的變化，結果顯示該策略在改善土壤性質和增加農民收益方面是有效的 (*Joseph et al., 2015*)。*Bai et al. (2021)* 將傳統上用於燃燒的犂牛糞轉化為生物炭，並以之作為芻料高粱之青貯添加劑 (4% dw)，結果顯示，生物炭添加處理之乳酸含量及乳酸 / 乙酸比均顯著較對照 (不添加) 為高，表示生物炭有做為青貯添加劑之潛力，且作者表示添加生物炭的成本較一般的乳酸菌劑或酵素添加劑為低。*Guo et al. (2021)* 進行實驗規模之低乾物率苜蓿 (30%) 的生物炭添加青貯，結果，添加 2% 處理在 15、30 天青貯之 pH 值、乳酸含量顯著較對照佳，添加 1、2% 處理之梭菌數在青貯 15 天均顯著低於對照，30 天則全部處理均極低，同時添加生物炭的微生物相與對照不同。*Eriksson, et al. (2022)* 試驗多批不同的生物炭添加青貯試驗，以 0, 2, 4, 6% dw 的生物炭比例添加於萎凋與不萎凋的梯牧草 (Timothy) 及紅三葉草 (red clover)，實驗室規模的結果顯示，梯牧草在不萎凋與萎凋的青貯表現不一，

生物炭添加無益於不萎凋梯牧草青貯，隨添加量增加乳酸量降低、丁酸量增加，但萎凋時，添加生物炭的梯牧草乾物率增加、乳酸含量上升、丁酸下降；三葉草則在所有處理下的青貯品質均佳，丁酸量均低；作者另以禾豆混合草進行大膠膜包的生物炭添加實測，結果同樣表現均佳，顯示生物炭添加量由 2 – 6% dw 不致對牧草青貯有不良影響。本研究的初步試驗同樣顯示盤固草炭添加對燕麥青貯無不良影響，應具有應用於青貯添加之潛力。應用生物炭於青貯添加可視為連結畜牧與農業應用的手段，可能同時有利於動物健康與土壤固碳，唯需要更多進一步的研究。

青貯是利用乳酸發酵快速降低材料之 pH 值來抑制其他微生物活動而達營養保存目的之調製手段。由青貯的微生物學研究，一般植物材料表面菌相中最大的菌群為好氧菌 (Total aerobic bacteria)，次為腸桿菌 (Enterobacteria) 及乳酸菌 (Lactic acid bacteria)，其次為酵母菌 (yeast)、黴菌 (Molds)，再次為梭菌 (Clostridia)、桿菌 (Bacilli)、醋酸菌 (Acetic acid bacteria) 及丙酸菌 (Propionic acid bacteria) 等，其中僅乳酸菌為有益青貯的菌種，其他均為干擾或不利菌種 (Elferink *et al.*, 1999; Pahlow and Muck, 2003; Avila and Carvalho, 2019)，但在材料密封之後，環境中的氧氣含量迅速降低，好氧菌的族群數也隨之快速減少，影響力降低，當環境漸漸趨於厭氧狀態，此時乳酸菌數量增加，乳酸菌數量會繼續增生至材料之水溶性碳水化合物耗盡或 pH 值低至抑制其活動的程度，此時，若 pH 值已至 4 以下，通常大部分的微生物活動均受抑制，則達到厭氧穩定期，但如果材料水溶性碳水化合物含量不足，pH 值無法降至夠低，則可能發生梭菌的二次發酵致青貯品質劣變，由於梭菌能利用醣類、有機酸及蛋白質，會造成較高乾物質損失，而乳酸分解為丁酸及蛋白質分解產生游離胺基酸均類似於增加酸鹼緩衝能力，更使 pH 值無法降低至抑制微生物活動的程度。本研究之低乾物率燕麥即可能因水溶性碳水化合物含量不足，致大量丁酸發生，青貯失敗。由於梭菌活動需要的水活性高於乳酸菌，因此，利用延後收穫或萎凋來提高材料的乾物率可以做為增進青貯發酵品質的手段 (Elferink *et al.*, 1999; Pahlow and Muck, 2003)。朱等 (2018) 與本試驗結果同樣顯示延後收穫或萎凋具增進燕麥青貯品質之效。

Avila and Carvalho (2019) 的回顧研究表示，青貯調製期間，由材料的生育狀況、收穫、細切、運輸、調製操作至開封利用等各環節，均有複雜的微生物間的交互作用與影響，進而造成不同的結果。Romero *et al.* (2017) 的試驗顯示不論接種與否，乾物率 44% 的燕麥在青貯 217 天後開封均表現優良，但桶式與袋式青貯及接種處理的菌相間有明顯差異。Wang *et al.* (2020) 以 γ 射線滅菌之燕麥接種玉米、高粱及燕麥之表面菌相進行 60 天青貯，發現其青貯表現與菌相有顯著不同，接種玉米者以乳酸菌為優勢菌群，青貯品質最佳，接種高粱者則除乳酸菌外，腸桿菌亦為優勢菌，然二者的青貯表現均優於接種燕麥菌相的處理，表示自然的燕麥材料表面菌相可能較差。由於青貯過程複雜，為降低調製風險，遂有各種青貯添加劑的發展，包括有機酸、乳酸菌、酵素等，雖然乳酸菌接種劑的效果通常有效，但 Gomes *et al.* (2019) 的結果則顯示燕麥接種 *L. buchneri* 的青貯反應不佳，並不建議。王等 (2020) 研究顯示不同菌劑接種對燕麥及燕麥 / 苜蓿的長期青貯有明顯差異，同質乳酸菌的效果較異質乳酸 *L. buchneri* 的表現佳。Elferink *et al.* (1999) 表示乳酸可做為抑制梭菌之青貯添加劑，本試驗品系 26 在高乾物率下，LA 處理的高乳酸含量可能為抑制梭菌活動的效果，唯需更多的試驗確認。

本研究結果顯示，平衡草炭在適合的條件下不會對燕麥的青貯發酵產生不良影響，未來應可以進一步對添加量、添加型式 (如結合不同有機酸、糖蜜、乳酸菌等)、動物採食及後續糞肥應用等方面進行研究與應用開發。

參考文獻

- 王思涵、施意敏、張俊達、蕭振文。2018a。荷蘭泌乳牛餵飼國產天鵝燕麥乾草對其乾物質採食量、體重、產乳量及乳品質之影響。畜產研究 51：265-271。
- 王思涵、施意敏、陳怡璇、張俊達、李國華、賈玉祥。2018b。飼糧中添加燕麥青貯料對荷蘭牛泌乳性能之影響。畜產研究 51：109-115。
- 王紓愨、劉信宏、游翠鳳、陳嘉昇。2018c。盤固草生物炭的特性研究與對牧草生長的影響。畜產研究 51：209-216。
- 王紓愨、劉信宏、游翠鳳、盧啟信、陳嘉昇。2018d。牧草生物炭研究 II：盤固草生物炭的分解與碳固定效應研究。中國畜牧學會會誌 47：123-134。
- 王紓愨、游翠鳳、陳嘉昇。2020。乾物率及不同接種處理對燕麥與燕麥 / 苜蓿混植長期青貯品質的影響。畜產研究 53：99-106。
- 王紓愨、劉信宏、游翠鳳、鍾承訓、李秀蘭。2021。盤固草生物炭或雞糞墊料生物炭對畜禽糞堆肥異味去除研究。

- 畜產研究 54 : 106-115。
- 朱明宏、王紓愨、游翠凰、陳嘉昇。2018。黑燕麥在不同收穫期之芻料產量、品質及青貯調製研究。畜產研究 51 : 16-23。
- 梁世祥、葉益男、王思涵、蕭振文、徐濟泰、吳榮杰。2018。臺灣冬季裡作栽培芻料用燕麥活化休耕地之經濟效益評估。畜產研究 51 : 217-223。
- 陳嘉昇、黃永芬、游翠凰、王紓愨。2021。芻料燕麥營養成分變動之探討。畜產研究 54 : 116-125。
- 劉明宗、曾美倉。1984。燕麥臺大選 1 號週年栽培試驗。畜產研究 17 : 11-23。
- 劉雅醇、康獻仁、王紓愨、梁筱梅。2019。不同比例稻殼及草炭墊料對白肉雞生長性狀、接觸性皮膚炎及欄舍氨氣濃度之影響。畜產研究 52 : 241-248。
- 蕭素碧。台灣燕麥草生產及展望。2013。光泉廠農通訊 86。 <https://www.kuangchuan.com/Content/Images/FacInfo/Diary/pdf/086-1.pdf>。
- Agyarko-Mintah, E., A. Cowie, L. Van Zwieten, B. P. Singh, R. Smillie, S. Harden, and F. Fornasier. 2017. Biochar lowers ammonia emission and improves nitrogen retention in poultry litter composting. *Waste Manage.* 61: 129-137.
- AOAC. 1984. Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist. 14 ed. Washington DC. pp.125-142.
- Ayenesht, B. and T. Temesgen. 2025. Role of biochar as a feed additive on animal performance, digestibility, micro-biota dynamics, and reduction of enteric methane production. *Adv. Agr.* Volume 2025, Article ID 9911760, 21 pages <https://doi.org/10.1155/aia/9911760>.
- Avila, C. L. S. and B. F. Carvalho. 2019. Silage fermentation—updates focusing on the performance of micro-organisms. *J. Appl. Micro.* 128: 966-984.
- Bai, Y., M. K. Rafiq, S. Li, A. A. Degen, O. Masek, H. Sun, H. Han, T. Wang, S. Joseph, R. T. Bachmann, R. K. Sani, R. Long, and Z. Shang. 2021. Biochar from pyrolyzed Tibetan Yak dung as a novel additive in ensiling sweet sorghum: An alternate to the hazardous use of Yak dung as a fuel in the home. *J. Hazard. Mater.* 403: 123647.
- Chen, Y. X., X. D. Huang, Z. Y. Han, X. Huang, B. Hu, D. Z. Shi, and W. X. Wu. 2010. Effects of bamboo charcoal and bamboo vinegar on nitrogen conservation and heavy metals immobility during pig manure composting. *Chemosphere* 78: 1177-1181.
- Elferink, S. J. W. H. O., F. Driehuis, J. C. Gottschal, and S. F. Spoelstra. 1999. Silage fermentation processes and their manipulation. In *Silage making in the tropics with particular emphasis on smallholders : proceedings of the FAO electronic conference on tropical silage, 1 September-15 December 1999*. Rome : FAO, 2000, p. 17-30. (FAO Plant Production and Protection Paper, 161).
- Enders, A. and J. Lehmann. 2012. Comparison of wet-digestion and dry-ashing methods for total elemental analysis of biochar. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 43: 1042-1052.
- Eriksson, T., B. O. Rustas, and H. Gonda. 2022. Biochar addition at ensiling – effects on silage characteristics. *Proceedings of the 11th Nordic Feed Science Conference*, pp 38-40. Uppsala, Sweden.
- Gomes, A. L. M., F. A. Jacovacia, D. C. Bolsona, L. G. Nussiob, C. C. Jobima, and J. L. P. Daniel. 2019. Effects of light wilting and heterolactic inoculant on the formation of volatile organic compounds, fermentative losses and aerobic stability of oat silage. *Anim. Feed Sci. Techn.* 247: 194-198.
- Guo, X.; M. Zheng, S. Wu, X. Zou, X. Chen, Q. Zhang, and M. Wang. 2021. A Preliminary investigation on bacterial diversity and fermentation quality of high-moisture alfalfa silage prepared with biochar. *Agron.* 11: 1971.
- Jones, D. W. and J. J. Kay. 1976. Determination of volatile fatty acid C1-C6 and lactic acid in silage juice. *J. Sci. Food Agric.* 27: 1005-1014.
- Joseph S., D. Pow, K. Dawson, D. R. G. Mitchell, A. Rawal, J. Hook, S. Taherymoosavi, L. Van Zwieten, J. Rust, S. Donne, P. Munroe, B. Pace, E. Graber, T. Thomas, S. Nielsen, J. Ye, Y. Lin, P. Genxing, L. Li, and Z. M. Solaiman. 2015. Feeding biochar to cows: an innovative solution for improving soil fertility and farm productivity. *Pedosphere* 25: 666-679.
- Lao, E. J., and E. R. Mbega. 2020. Biochar as a feed additive for improving the performance of farm animals. *Malaysian J. Sus. Agri.* 4: 86-93.
- Lehannes, J. and S. Joseph. 2009. *Biochar for environmental management: science and technology*. MPG Books, UK.
- Morris, D. L. 1948. Quantitative determination of carbohydrates with dry-wood's anthrone reagent. *Science* 107: 254-255.
- Oliveira, F. R., A. K. Patel, D. P. Jaisi, S. Adhikari, H. Lu, and S. K. Khanal. 2017. Environmental application of biochar:

- Current status and perspectives. *Bioresour. Technol.* 246: 110-122.
- Pahlow, G. and R. E. Muck. 2003. Microbiology of ensiling. In *Silage science and technology*. pp. 31-94. Madison, Wisconsin, USA.
- Pereira, R. C., S. Muetzel, M. C. Arbestain, P. Bishop, K. Hina, and M. Hedley. 2014. Assessment of the influence of biochar on rumen and silage fermentation: A laboratory-scale experiment. *Anim. Feed Sci. Technol.* 196: 22-31.
- Purakayastha, T. J., S. Kumari and H. Pathak. 2015. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma* 239-240.
- Qomariyah N., A. Ella, S. N. Ahmad, Y. Yusriani, M. M. Sholikin, T. R. Prihambodo, Y. Retnani, A. Jayanegara, E. Wina, and I. G. Permana. 2023. Dietary biochar as a feed additive for increasing livestock performance: A meta-analysis of *in vitro* and *in vivo* experiment. *Czech J. Anim. Sci.* 68: 72-86.
- Romero, J. J., Y. Zhao, M. A. Balseca-Paredes, F. Tiezzi, E. Gutierrez-Rodriguez, and M. S. Castillo. 2017. Laboratory silo type and inoculation effects on nutritional composition, fermentation, and bacterial and fungal communities of oat silage. *J. Dairy Sci.* 100: 1812-1828.
- SAS. 2002. SAS ver. 9.0. Statistical Analysis Institute, Inc., Cary. N.C. USA.
- Schmidt, H-P. 2012. 55 Uses of Biochar, *Ithaka-Journal* 2012 Arbaz, Switzerland, pp. 450-454, www.ithaka-journal.net/en/ct/143.
- Schmidt, H-P., N. Hagemann, K. Draper, and C. Kammann. 2019. The use of biochar in animal feeding. *PeerJ* 7: e7373.
- van Soest, P. J., J. B. Robertson, and B. A. Lewis. 1991. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *J. Dairy Sci.* 74: 3583-3597.
- Wang, S., J. Zhao, Z. Dong, J. Li, N. A. Kaka, and T. Shao. 2020. Sequencing and microbiota transplantation to determine the role of microbiota on the fermentation type of oat silage. *Bioresour. Technol.* 309: 12371.
- Willson, N.-L., T. T. H. Van, S. P. Bhattarai, J. M. Courtice, J. R. McIntyre, T. P. Prasai, R. J. Moore, K. Walsh, and D. Stanley. 2019. Feed supplementation with biochar may reduce poultry pathogens, including *Campylobacter hepaticus*, the causative agent of spotty liver disease. *PLoS ONE* 14: e0214471.
- Windeatt, J. H., A. B. Ross, P. T. Williams, P. M. Forster, M. A. Nahil, and S. Singh. 2014. Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *J. Environ. Manag.* 146: 189-197.

A Study on the effects and application potential of pangolagrass biochar addition on the silage quality of forage oats ⁽¹⁾

Shu-Min Wang ⁽²⁾⁽⁴⁾ Jian-Fu Liu ⁽³⁾ and Chia-Sheng Chen ⁽²⁾

Received: Jun. 17, 2025; Accepted: Aug. 1, 2025

Abstract

This study investigated the use of forage oat as the ensiling material to evaluate the effects of adding pangolagrass-derived biochar (hereinafter referred to as PB) on silage quality. The objective was to assess the feasibility of PB as a silage additive and to explore its potential multifunctional benefits in both animal feed and environmental applications. Two forage oat lines, Line 43 and Line 26, developed by the Southern Region Branch of the Livestock Research Institute (hereinafter referred to as SBLRI), were used as experimental materials. A total of six ensiling trials were conducted for each line, using laboratory-scale vacuum bag silage. Five ensiling treatments were tested: CK (Control, no additive); CCK (Addition of balanced PB at 5 g/kg fresh weight; balanced PB: lactic acid-supplemented PB at 0.02 g/g); I (Inoculation with a commercial silage inoculant, transferred strain from SBLRI; *Lactobacillus plantarum*, *L. casei*, at 2×10^8 cfu/kg); CI (Combined treatment of balanced PB and inoculant (same proportions as above)); LA (Addition of lactic acid, 0.1 g/kg fresh weight). The silages were stored for 4.5 months. The results showed that, compared to the effects of oat line and dry matter (DM) content, the addition of PB was not a major factor affecting silage fermentation quality. Significant differences were observed between the two lines. Under low DM content, all treatments exhibited poor fermentation quality. For Line 43 at 38.4% DM, silage quality of Flieg's score for treatments I and CI reached "good" level, while the other three treatments were rated as "poor." At 44.2% DM, treatments I and CI again received "good" rating, whereas the remaining treatments were considered "acceptable". For Line 26, at both 41.5% and 50.0% DM, all treatments were rated "acceptable" or better. In particular, treatment LA as well as some CI and CCK treatments achieved "good" ratings. Overall, the addition of PB at 0.5% of fresh weight did not have adverse effect on silage fermentation, suggesting its potential feasibility as a silage additive. These results may provide a useful reference for the development of biochar applications in animal husbandry. Furthermore, a DM content of approximately 40% may represent a critical threshold affecting the fermentation quality of oat silage.

Key words: Pangolagrass biochar, Forage oat, Ensiling, Fermentation quality.

(1) Contribution No. 2836 from Taiwan Livestock Research Institute (TLRI), Ministry of Agriculture (MOA).

(2) Southern Region Branch, MOA-TLRI, Pingtung 94644, Taiwan, R. O. C.

(3) National Taiwan University.

(4) Corresponding author, E-mail: smwang@tlri.gov.tw.