

Review



CrossMark

Open Access

첨가제가 유기성 폐기물 퇴비화 과정 중 온실가스 발생에 미치는 영향: 리뷰 및 데이터 분석

정석순¹, 박병준², 윤정환¹, 이상필¹, 양재익², 김혁수^{2*}

¹강원대학교 농업생명과학연구원, ²강원대학교 농업생명과학대학 환경융합학부

Effects of Additives on Greenhouse Gas Emission during Organic Waste Composting: A Review and Data Analysis

Seok-Soon Jeong¹, Byung-Jun Park², Jung-Hwan Yoon¹, Sang-Phil Lee¹, Jae-E. Yang² and Hyuck-Soo Kim^{2*} (¹Agriculture and Life Science Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea, ²Department of Biological Environment, College of Agriculture and Life Science, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea)

Received: 20 November 2023/ Revised: 08 December 2023/ Accepted: 11 December 2023

Copyright © 2023 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Seok-Soon Jeong
<https://orcid.org/0000-0003-2311-8784>

Byung-Jun Park
<https://orcid.org/0000-0002-1234-4770>

Jung-Hwan Yoon
<https://orcid.org/0000-0001-8009-7807>

Sang-Phil Lee
<https://orcid.org/0000-0001-7299-257X>

Jae-E. Yang
<https://orcid.org/0000-0001-8641-6442>

Hyuck-Soo Kim
<https://orcid.org/0000-0001-9944-6245>

Abstract

Composting has been proposed for the management of organic waste, and the resulting products can be used as soil amendments and fertilizer. However, the emissions of greenhouse gases (GHGs) such as CO₂, CH₄, and N₂O produced in composting are of considerable concern. Hence, various additives have been developed and adopted to control the emissions of GHGs. This review presents the different additives used during composting and summarizes the effects of additives on GHGs during composting. Thirty-four studies were reviewed, and their results showed that the additives can reduce cumulative CO₂, CH₄, and N₂O emission by

10.5%, 39.0%, and 28.6%, respectively, during composting. Especially, physical additives (e.g., biochar and zeolite) have a greater effect on mitigating N₂O emissions during composting than do chemical additives (e.g., phosphogypsum and dicyandiamide). In addition, superphosphate had a high CO₂ reduction effect, whereas biochar and dicyandiamide had a high N₂O reduction effect. This implies that the addition of superphosphate, biochar, and dicyandiamide during composting can contribute to mitigating GHG emissions. Further research is needed to find novel additives that can effectively reduce GHG emissions during composting.

Key words: Biochar, Dicyandiamide, Methane, Nitrous oxide, Superphosphate

*Corresponding author: Hyuck-Soo Kim
Phone: +82-33-250-6442; Fax: +82-33-259-5563;
E-mail: kimhs25@kangwon.ac.kr

서론

유기성 폐기물(organic waste)은 농업, 제조업 등 인간 활동에 의해 발생하는 유기물 함유 물질로, 급격한 인구증가 및 도시화로 인해 2100년에는 전세계 유기성 폐기물 일일 발생량이 2010년 대비 3배 증가한 1,100만 톤에 도달할 것으로 전망하고 있다[1,2]. 따라서 유기성 폐기물의 부적절한 관리는 환경오염을 초래하여 생태계를 파괴하고 인간의 건강을 위협할 뿐만 아니라 이를 정화하기 위한 막대한 경제적 손실이 발생할 수 있다[1].

유기성 폐기물은 매립, 소각, 재활용(퇴비화) 등의 방법으로 관리되고 있다[1]. 한국환경공단 및 통계청에 따르면 2021년도 국내 유기성 폐기물 발생량은 음식물류 488만 톤, 유기성 오니류 712만 톤, 가축분뇨 5,189만 톤으로 이 중 대부분의 유기성 폐기물(67-97%)이 재활용되었다.

퇴비화(composting)는 유기성 폐기물 재활용 방법 중 하나로 토양비옥도 개선 및 비료사용량을 저감하는 등 지속가능한 농업에 기여할 수 있는 방법이다[3]. 하지만 퇴비화는 유기성 폐기물이 비생물(abiotic) 또는 생물(biotic)학적 과정을 통해 분해되기 때문에 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 온실가스(greenhouse gases, GHGs)가 필연적으로 발생한다[4].

퇴비화 과정은 온도를 기준으로 총 네 가지 단계로 구분된다. 초기(mesophilic, 25-40°C), 고온(thermophilic, 40-65°C), 냉각(cooling, 25-40°C), 숙성(maturation, 20-25°C)[5]. 초기 단계에서는 미생물이 활성화되고 유기물이 분해되면서 CO₂ 발생 및 온도가 상승하게 되고, 지속적인 산소 소모와 온도 상승으로 인한 고온 상태가 되면 혐기조건이 형성되어 CH₄ 발생이 일어난다[5,6]. N₂O는 암모니아화, 질산화, 탈질화 등 질소순환과 관련된 미생물 활동에 주로 영향을 받기 때문에, 40°C 이하로 유지되는 초기, 냉각 또는 숙성 단계에서 발생하는 경향을 보인다[6]. 퇴비화 과정 중에 온실가스가 발생하는 양상은 유기성 폐기물의 종류나 특성 또는 운용조건에 따라서 각 단계별로 상이할 수 있다[4]. 우리나라에서는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 가이드라인을 따라 가축분뇨와 유기성 고형폐기물의 퇴비화 과정에서 발생하는 CH₄와 N₂O에 대하여 온실가스 배출량을 산정하고 있다. 따라서 탄소중립을 실현하기 위해서는 퇴비화 과정 중 온실가스 발생을 저감시키기 위한 노력이 필요하다.

퇴비화 과정 중에 발생하는 온실가스를 저감시키기 위하여 운용조건(수분함량, 산소공급, C/N비 등)을 최적화하는 연구가 진행되어 왔으나 그 효율에는 한계가 있다[4]. 따라서 온실가스 저감을 목적으로 다양한 첨가제(additive)를 퇴비화 과정에 투입하여 온실가스 발생량 변화를 연구한 사례들이 소개되어 왔다. 본 연구에서는 이러한 퇴비화 첨가제 연구자료를 수집 및 정리하여 국내에서 퇴비화 과정 중 온실가스 저감을 위해 필요한 기초자료를 구축하고자 한다.

재료 및 방법

자료수집

퇴비화 과정 중 첨가제 적용을 통한 온실가스 발생 저감효과를 확인하기 위해 Google Scholar에서 “Compost”, “Additive”, “Gas emission”로 검색하여 1차적으로 자료를 수집하고, 연구에 사용된 첨가제를 키워드로 하여 2차적인 자료 수집을 수행하였다. 자료 수집 조건은 1) 온실가스 CO₂, CH₄, N₂O 중 하나 이상 포함, 2) 누적발생량(cumulative emission) 또는 최대 발생량(peak emission) 표기되어 있는 경우로 하였다. 첨가제의 특성에 따라 온실가스 발생 저감에 주는 영향이 다르기 때문에 물리적, 화학적, 생물학적 첨가제로 구분하여 온실가스 발생 저감에 미치는 영향을 분석하였다.

자료분석

퇴비화 과정 중 첨가제 투입에 따른 CO₂, CH₄, N₂O 발생량에 미치는 영향을 확인하기 위하여 수집한 자료 중 누적발생량이 제시되어 있는 논문만을 대상으로 통계분석을 수행하였다. 또한, 생물학적 첨가제의 경우 표본 수가 적어 통계처리에서 제외하였다. 통계처리는 SPSS (Statistical Package for the Social Science, Ver. 26.0, SPSS Inc., Chicago, IL, USA)을 이용하였으며 첨가제 간의 차이를 비교하기 위하여 t-검정과 다중선형회귀(multiple linear regression)를 수행하였다.

결과 및 고찰

물리적 첨가제가 온실가스 발생에 미치는 영향

물리적 첨가제는 퇴비화 과정 중에 본래의 성질이 크게 변하지 않는 물질로 바이오차(biochar)와 제올라이트(zeolite)가 대표적이며 그 외에도 메디컬 스톤(medical stone), 점토광물(bentonite, clay 등), 갈탄(lignite), 폐버섯배지(spent mushroom substrate) 등이 있다(Table 1). 물리적 첨가제는 퇴비더미(compost pile)의 공극률을 증가시켜 산소공급을 원활하게 하고 무기태 질소를 흡착하거나 질소고정과 관련된 미생물 활동을 증가시키는 등 생물학적 특성에도 영향을 주어 온실가스의 발생을 저감시킨다[7,8].

바이오차는 유기성 물질을 저산소 또는 무산소 조건에서 열분해하여 생성되기 때문에 높은 공극률과 넓은 표면적, 다양한 작용기와 흡착능력을 보유하고 있어 퇴비화 과정에서 발생하는 온실가스 저감에 효과가 있는 첨가제로 각광받고 있다[9, 10]. 바이오차 처리는 용적밀도를 감소시키고 통기성을 증가시켜[11] 산소공급을 원활하게 하기 때문에 호기성 미생물 활동이 활발해지면서 유기물 분해가 촉진되어 CO₂ 발생량이 증가하지만 외인성(exogenous) 유기물질을 격리시키는 효과로 인해 CO₂ 발생량이 감소될 수도 있다[10]. 또한 퇴비더미의 무산소 부분(anaerobic spot)이 감소되고 메탄생성균(methanogen) 활동이 저해되어 CH₄ 발생을 저감시킨다. 바이오차는 NH₄⁺, NO₃⁻를 흡착하여 질산화 또는 탈질화균의 대사를 억제

Table 1. Effects of physical additives on greenhouse gas emission (GHG) during organic waste composting

Additive	Feed stock	Change in GHGs emission (% respect to control)				Reference
		Comparison type ^a	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
Bean dregs	Pig manure + wheat straw	C	+25	+41	+16	[19]
Biochar(holm oak)	Green waste + municipal solid waste(organic)	C	-53	-95	-14	[15]
Biochar(wheat straw)	Pig manure + wheat straw	C	+36	-19	-38	[19]
Biochar(wheat straw) + Bean dregs	Pig manure + wheat straw	C	-17	-	-18	[19]
Biochar(cornstalk)	Pig manure + kitchen waste	C	-	-47	-	[20]
Biochar(pig manure)	Pig manure + kitchen waste	C	-	-58	-13	[20]
Biochar(eucalyptus wood)	Cattle manure + saw dust + vegetable scraps + teff straw	C	n.s ^b	-91	-57	[22]
Biochar(eucalyptus wood)	Humanure + saw dust + vegetable scraps + teff straw	C	n.s	-65	-56	[22]
Biochar(wood)	Cow manure + wheat straw	C	+51	-	-	[23]
Biochar(wheat straw)	Cow manure + wheat straw	C	+59	-	-	[23]
Biochar(tobacco)	Food waste digestate + saw dust + mature compost	C	-	-	+65	[24]
Biochar(bamboo)	Food waste digestate + saw dust + mature compost	C	-	-	-31	[24]
Biochar(bamboo)	Pig manure + saw dust	E	+53	-54	-36	[40]
Biochar(tobacco stalk)	Pig manure	C	-26	-42	-65	[41]
Biochar(bamboo)	Pig manure + wood chip + saw dust	C	-	-	-26	[42]
Biochar(bamboo)	Hen manure + wheat straw	E	-52 to -10	-55 to -35	-59 to 0	[43]
Biochar(bamboo)	Pig manure + saw dust	E	-	-54	-37	[44]
Biochar(wood)	Solid manure + orchard clipping residue	C	-19	-79	-	[45]
Biochar(tobacco stalk) + Zeolite	Pig manure	C	-30	-47	-78	[19]
Biochar(tobacco stalk) + Zeolite + Wood vinegar	Pig manure	C	-47 to -34	-61 to -50	-81 to -80	[19]
Ca-Bentonite	Pig manure + saw dust	C	n.s	n.s	-29	[21]
Ca-Bentonite	Sewage sludge + wheat straw	E	-	-86	-81	[46]
Clay	Pig manure + sawdust	C	-	-46	-87	[17]
Clay	Chicken manure + wheat straw	E	0 to +91	-50 to -9	-63 to 0	[47]
Corn stalk	Kitchen waste	C	-	-93	-47	[16]
Diatomite	Pig manure + saw dust	C	+12 to +30	-30 to -18	-84 to 27	[48]
Lignite(Bacchus Marsh)	Cattle manure	C	-12	-52	-72	[49]
Lignite(Loy Yang)	Cattle manure	C	-23	-59	-61	[49]
Lime	Food waste	C	-	-81 to -23	-50 to -39	[50]
Medical stone	Swine manure + wheat straw	C	-	-	-19	[39]
Medical stone	Pig manure + saw dust	E	+60	-74	-56	[40]
Medical stone	Sewage sludge + wheat straw	E	-	-87	-84	[46]
Medical stone	Pig manure + saw dust	E	-	-	-79 to -43	[51]
Medical stone	Pig manure + wheat straw	C	-	-28	-	[52]
Nano zero-valent iron	Pig manure + kitchen waste	C	-	-29	-	[20]

Additive	Feed stock	Change in GHGs emission (% respect to control)			Reference	
		Comparison type ^a	CO ₂	CH ₄		N ₂ O
Saw dust	Kitchen waste	C	-	-98	-73	[16]
Spent mushroom substrate	Kitchen waste	C	-	-98	-29	[16]
Spent mushroom substrate	Pig manure + cornstalk	C	-	-	-37	[53]
Wood vinegar	Pig manure + saw dust	E	+74	-68	-69	[40]
Zeolite	Chicken manure	C	-8	-56	-	[18]
Zeolite	Pig manure + saw dust	E	+40	-69	-67	[40]
Zeolite	Sewage sludge + wheat straw	E	-	-88	-79	[46]

^a C, Cumulative GHG emission; E, peak of GHG emission rate; ^b n.s, not significant.

할 뿐만 아니라 N₂O를 흡착하고 N₂로 환원시켜 N₂O 발생을 저감시킬 수 있다[10]. 이러한 바이오차의 온실가스 저감효과는 종류나 크기에 따라 달라질 수 있다. 예를 들어 He 등[12]은 벗짚과 대나무 바이오차를 조제 후 1 mm 미만과 4-8 mm 크기로 분류하여 퇴비화 과정에 첨가한 결과 입자크기가 크고 높은 공극률을 보유할수록 산소공급을 원활하게 하기 때문에 온실가스 발생 저감에 더 효과적인 것으로 보고하였다.

제올라이트는 수화된 알루미늄실리케이트(hydrated aluminosilicate)의 광물로 넓은 표면적, 흡착능력, 다공성 등을 보유하고 있다[13]. Awasthi 등[14]은 제올라이트를 최대 30% (w/w)까지 처리한 결과 통기성을 원활하게 함으로써 호기성 미생물을 활성화시켜 분해속도가 빨라지면서 CO₂ 발생량이 증가하는 반면에 CH₄와 N₂O 발생량은 감소하는 것으로 보고하였다.

물리적 첨가제의 온실가스 누적발생량에 관한 연구가 총 18건으로 CO₂가 10건, CH₄가 13건, N₂O 14건이었으며, CO₂, CH₄, N₂O의 누적발생량을 평균적으로 각각 5.1%, 49.2%, 43.2% 저감시키며(Fig. 1A), CO₂를 제외한 CH₄와 N₂O는 통계적 유의성은 없으나 처리량이 증가함에 따라 저감효과가

증가하는 경향을 보였다(Fig. 1B).

물리적 첨가제로 인해 퇴비화 과정 중 CO₂, CH₄, N₂O의 누적발생량이 각각 최대 53%[15], 98%[16], 87%[17] 감소되었으며 가장 적게는 8%[18], 0.6%[19], 13%[20] 감소하였다. 하지만 온실가스 발생 저감에 효과가 없거나[21,22], CO₂, CH₄, N₂O 누적발생량이 각각 최대 59%[23], 41%[19], 65%[24] 증가한 사례도 있었다.

화학적 첨가제가 온실가스 발생에 미치는 영향

화학적 첨가제는 퇴비화 과정에 용해되어 영향을 주는 물질들로 과인산석회(superphosphate), 석고(phosphogypsum), 디시아나미드(dicyanamide)가 대표적이며 석회(lime), 황산(sulfuric acid) 등이 있다(Table 2). 화학적 첨가제는 주로 pH를 조절하거나 특정 미생물의 활동을 저해하는 등의 작용을 통해 온실가스의 발생을 저감시킨다. 현재 우리나라 비료 공정 규격 설정[농촌진흥청고시 제2023-24호]에서는 가축분퇴비 및 퇴비에 소석회, 석회고토, 부산석고 등을 전체 원료의 5% (w/w) 이내에서 사용 가능하도록 하고 있다.

과인산석회, 석고, 황산의 첨가는 퇴비더미의 pH를 감소시

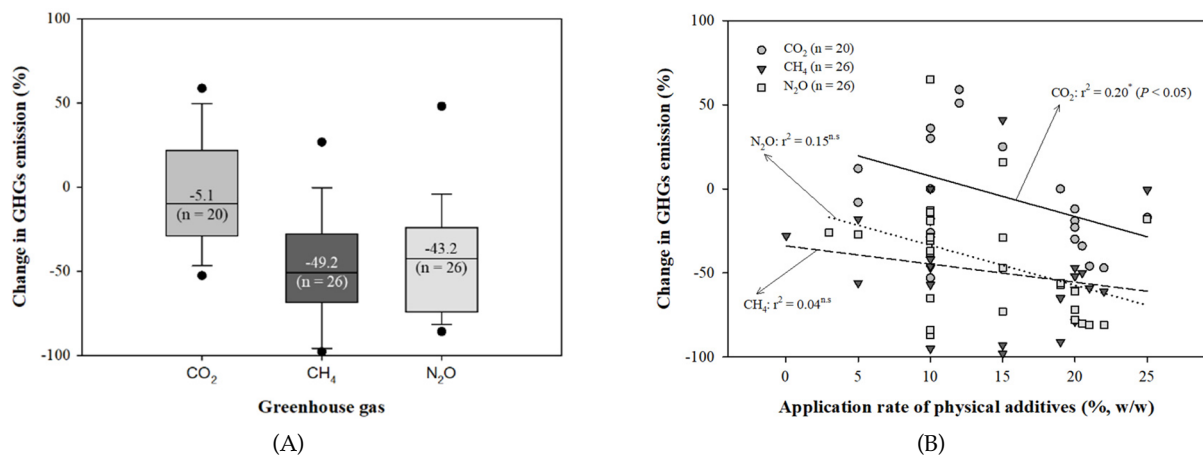


Fig. 1. Box plots showing 5th-95th percentile of the change in GHGs emission by physical additives (A) and change in GHGs emission by physical additive application rate (B). Values are the means, and values in parentheses are the number of sample in box plots. n.s means not significant.

Table 2. Effects of chemical additives on greenhouse gas emission (GHG) during organic waste composting

Additive	Feed stock	Change in GHGs emission (% respect to control)			Reference	
		Comparison type ^a	CO ₂	CH ₄		N ₂ O
Apple pomace	Sewage sludge	C	-	-22	-33	[54]
CaMgP fertilizer + Phosphogypsum	Pig manure + cornstalk	C	-	-	+31	[55]
Citric acid	Sewage sludge	C	-	-33	-51	[54]
Dicyandiamide	Sewage sludge	C	-	-34 to 0	-52 to -12	[28]
Dicyandiamide	Swine slurry + saw dust	C	-	-48 to +68	-92 to 0	[29]
Dicyandiamide	Pig manure + cornstalk	C	+6	-10	-32	[32]
Dicyandiamide	Swine slurry + saw dust	C	-	-20 to 0	-56 to -20	[56]
Elemental sulfur	Sewage sludge	C	-	-71	+48	[54]
Magnesium hydrogen phosphate	Sewage sludge	C	-	n.s. ^b	-70	[54]
Phosphogypsum	Sewage sludge + cornstalk	C	-	-49	+23	[26]
Phosphogypsum	Cattle manure	C	n.s.	-97 to -82	n.s.	[31]
Phosphogypsum	Pig feces + cornstalk	C	-	-61	n.s.	[33]
Phosphogypsum	Pig manure + cornstalk	C	-13	-44	-	[34]
Phosphogypsum	Swine manure	C	-	-	+8	[39]
Phosphogypsum	Pig manure + wheat straw	C	-	-23	-	[52]
Phosphogypsum	Pig manure + cornstalk	C	-	-	+22	[55]
Phosphogypsum	Kitchen waste + cornstalk	C	-	-86	+3	[57]
Phosphogypsum + Dicyandiamide	Sewage sludge + cornstalk	C	-	-57	-69	[26]
Phosphogypsum + Dicyandiamide	Pig manure + cornstalk	C	-14	-39	-36	[32]
Phosphogypsum + Dicyandiamide	Pig feces + cornstalk	C	-	-59 to -53	-35 to -33	[33]
Phosphoric acid	Sewage sludge	C	-	-53	+32	[54]
Potassium peroxodisulfate	Pig manure + kitchen waste	C	-	-71	+60	[20]
Superphosphate	Chicken manure	C	-28	-62	-	[18]
Superphosphate	Sewage sludge + cornstalk	C	-	-58	-31	[26]
Superphosphate	Pig manure + cornstalk	C	-38 to -32	-12 to -6	-40 to +16	[30]
Superphosphate	Pig manure + cornstalk	C	-27	-60 to -29	-	[34]
Superphosphate	Pig manure + saw dust	C	-	-34	-	[35]
Superphosphate	Pig manure + woody peat	C	-	-36	n.s.	[36]
Superphosphate	Sewage sludge	C	-	-43	+15	[54]
Superphosphate	Kitchen waste + cornstalk	C	-	-81	+15	[57]
Superphosphate + Dicyandiamide	Pig manure + cornstalk	C	-9	-33	-25	[32]
Superphosphate + Dicyandiamide	Sewage sludge + cornstalk	C	-	-63	-75	[26]

^a C, Cumulative GHG emission; E, peak of GHG emission rate; ^b n.s., not significant.

키고, SO₄²⁻ 농도를 증가시키는데 이때 황산환원박테리아(sulfate reducing bacteria)의 활동이 활발해지면서 메탄생성균과 에너지원(유기탄소)을 경쟁하기 때문에 CH₄ 발생이 감소한다 [25,26]. 하지만 과도하게 낮은 pH(5 이하)는 N₂O 환원효소의 생성을 저해하여 N₂O 발생량을 증가시킬 수 있어 주의가 필요하다[25].

디시안디아미드는 대표적인 질산화 억제제로 암모니아산화박테리아(ammonia oxidizing bacteria)의 생육을 저해함

으로써 질산화(nitrification) 작용을 감소시켜 N₂O의 발생을 저감시킨다[27]. 처리량이 0.4% (w/w) 이상일 때는 CH₄ 저감에도 효과가 있으며 제형(formulation)은 고체보다는 액체가 처리방식은 표면처리(surface broadcasting)보다는 처리 후 혼합(mixing)하는 것이 더 효과적이다[28,29].

화학적 첨가제의 온실가스 누적발생량에 관한 연구가 총 20건으로 CO₂가 6건, CH₄가 17건, N₂O 14건이었으며, CO₂, CH₄, N₂O의 누적발생량을 평균적으로 각각 16.4%, 33.5%,

20.0% 저감시키며(Fig. 2A), CO₂를 제외한 CH₄와 N₂O는 통계적 유의성은 없으나 처리량이 증가함에 따라 저감효과가 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2B).

화학적 첨가제로 인해 CO₂, CH₄, N₂O 누적발생량이 각각 최대 38%[30], 97%[31], 92%[29] 감소되었으며 가장 적게는 9%[32], 6%[30], 12%[28] 감소하였다. 석고와 과인산석회는 주로 CH₄ 저감에 효과가 있는데[26,31,33-36]. 과인산석회의 경우 높은 수준(10-30%, w/w)으로 처리할 경우 CO₂와 N₂O 발생을 저감시킬 수 있다[30]. 디시아마이드는 처리량에 따라서 N₂O 뿐만 아니라 CH₄ 저감에도 효과가 있어[26,33,32] 석

고 또는 과인산석회를 디시아마이드와 혼합하여 처리할 경우 비교적 적은 처리량으로도 CH₄와 N₂O 저감에 효과를 볼 수 있다[26,28,32]. 하지만 온실가스 발생 저감에 효과가 없거나 [28,31,34] CO₂, CH₄, N₂O 누적발생량이 각각 최대 6%[32], 68%[29], 65%[20] 증가한 경우도 있었다.

생물학적 및 혼합 첨가제가 온실가스 발생에 미치는 영향

생물학적 첨가제의 온실가스 누적발생량에 관한 연구가 총 3건이었으며 CO₂가 2건, CH₄가 1건, N₂O 2건으로 타 첨가제보다 연구가 상대적으로 덜 진행되고 있다(Table 3).

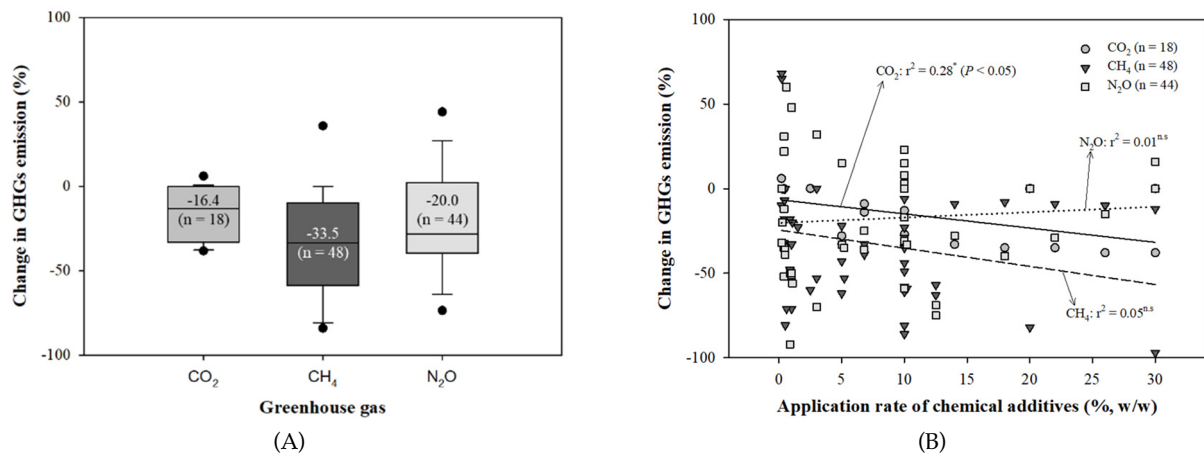


Fig. 2. Box plots showing 5th-95th percentile of the change in GHGs emission by chemical additives (A) and change in GHGs emission by chemical additive application rate (B). Values are the means and values in parentheses are the number of sample in box plots. n.s. means not significant.

Table 3. Effects of biological or compound additives on greenhouse gas emission (GHG) during organic waste composting

Additive	Feed stock	Change in GHGs emission (% respect to control)			Reference	
		Comparison type ^a	CO ₂	CH ₄		N ₂ O
Bacteria ^b	Cow manure	C	+22	↓	↓	[23]
Biochar + Bacteria ^b	Cow manure	C	-15	↓	↓	[23]
Biochar + Bacteria ^b	Cow manure	C	-21	↓	↓	[23]
Bacteria ^c	Sheep manure + corn stalk	C	+193	-11	-90	[37]
Biochar + Bacteria ^c	Sheep manure + corn stalk	C	+2	-66	-69	[37]
Nitrifying bacteria ^d	Sewage sludge + rice husk	C	-	-	-35	[38]
Biochar + Bacteria ^e	Pig manure + saw dust	E	-	-80	-45	[44]
Biochar + Bacteria ^f	Pig manure + saw dust	E	-	-69	-45	[44]
Medical stone + Phosphogypsum	Swine manure + wheat straw	C	-	-	-43	[39]
Zeolite + Ferrous sulfate	Chicken manure	C	-12	-51	-	[18]
Zeolite + Ferrous sulfate + Superphosphate	Chicken manure	C	-28	-74	-	[18]

^a C, Cumulative GHG emission; E, peak of GHG emission rate; ^b From fresh cow manure by using modified basal slat media; ^c Nitrogen-fixing bacteria, inorganic phosphorus dissolving bacteria, organic phosphorus dissolving bacteria, potassium dissolving bacteria; ^d 1:1:1 mixture of *Berevibacillus Agri* N2, *Gordonia paraffinivorans* N52 and *Streptomyces* sp. N23; ^e High temperature aerobic microorganism; ^f Effective facultative microorganism.

미생물을 첨가할 경우 CO₂ 누적발생량이 최대 193% 증가하였으며 CH₄와 N₂O는 각각 최대 11%, 90% 감소하였다[23, 37,38]. Wang 등[37]은 박테리아(생물학적)를 바이오차(물리적)와 혼합하여 처리할 시 CO₂ 발생량이 193% 증가하는 것을 2%까지 현저히 감소시킬 뿐만 아니라 CH₄ 발생량이 11% 감소하는 것을 66%까지 감소시키는 것으로 보고하였다.

또한 앞서 설명한 생물학적 처리제와 물리적 처리제를 혼합하여 처리한 경우 외에도 물리적 처리제와 화학적 처리제를 혼합하여 처리한 연구사례가 있었다(Table 3). Lei 등[39]은 메디컬 스톤과 석고를 각각 10% (w/w) 처리할 경우 N₂O가 메디컬 스톤에서는 19% 감소하는 반면에 석고에서는 8% 증가하였는데 이 둘을 5% + 5% 처리할 경우 석고가 메디컬 스톤의 흡착능력과 구조적 특성을 최적화시키는데 도움을 주어 N₂O 누적발생량이 43% 감소하는 것으로 보고하였다. 이처럼 다른 종류의 첨가제(물리, 화학, 생물학적)를 조합하는 방식에 따라서는 상승효과(synergy effect)가 나타날 수 있을 것으로 판단된다.

첨가제가 온실가스 발생에 미치는 영향 비교

전체 수집한 자료를 기반으로 정리했을 때 퇴비화 과정 중 첨가제의 투입은 CO₂, CH₄, N₂O 누적발생량을 평균적으로 각각 10.5%, 39.0%, 28.6% 저감시키는 것으로 나타났다. 첨가제 종류에 따라서는 물리적 첨가제가 평균적으로 5.1%, 49.2%, 43.2% 저감시켰으며 화학적 첨가제는 16.4%, 33.5%, 20.0% 저감시키는 것으로 조사되었다. CO₂와 CH₄는 첨가제 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었으나 N₂O는 물리적 첨가제가 화학적 첨가제보다 저감효과가 유의하게 높은 것으로 나타났다 (Fig. 3).

생물학적 첨가제를 제외한 CO₂ 10종, CH₄ 23종, N₂O 22종을 대상으로 첨가제가 온실가스 발생에 미치는 영향을 비교하기 위하여 우리나라 비료 공정규격 설정[농촌진흥청고시 제

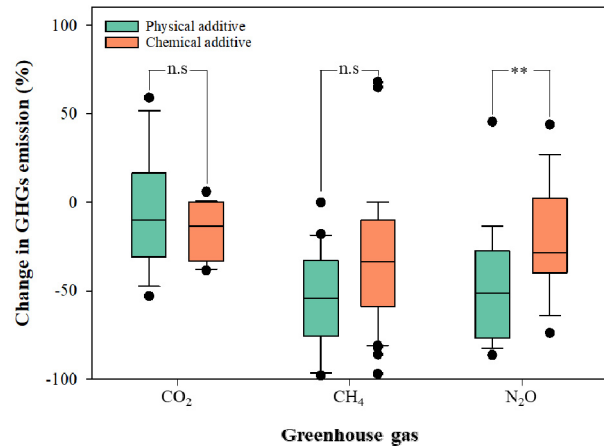


Fig. 3. Comparison of change in GHGs emission under different additive type. ** and n.s mean significant at $p < 0.01$ and not significant.

2023-24호]에서 고시한 부산물비료의 사용가능한 원료이면서 선행연구가 상대적으로 많은 석고를 기준으로 더미(dummy) 변수를 이용한 다중회귀분석을 수행하였는데, 그 결과 과인산 석회가 석고보다 CO₂ 발생 저감효과가 높았으며 그 외 첨가제는 차이가 없는 것으로 나타났다(Table 4).

CH₄ 발생 저감효과에 대해서는 첨가제 간에 유의한 차이가 없었고 콩 찌꺼기(bean dregs)와 디시안디아마이드가 CH₄ 발생량을 증가시키는 것으로 나타났다(Table 5). 다만 콩 찌꺼기의 경우 표본 수가 1이기 때문에 CH₄ 발생량을 증가시키는 것으로 보기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 바이오차, 점토, 규조토(diatomite), 디시안디아마이드, 갈탄, 인산수소마그네슘(magnesium hydrogen phosphate), 톱밥(saw dust)이 석고보다 N₂O 발생 저감효과가 높았으나 각 첨가제의 표본 수를 고려하였을 때 바이오

Table 4. Unstandardized and standardized coefficients, standard error, and *t* values for multiple regression analysis of effects of additives on cumulative CO₂ emission

Additive	Number of sample	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	<i>t</i>	<i>p</i>
		β	SE	β		
(Constant)		29.74	13.93		2.135	0.040
Bean dregs	2	-11.36	27.80	-0.06	-0.409	0.685
Biochar	13	-28.76	16.66	-0.36	-1.726	0.093
Ca-Bentonite	1	-29.74	39.60	-0.11	-0.751	0.458
Diatomite	2	-8.74	29.69	-0.05	-0.295	0.770
Dicyandiamide	6	-23.74	19.35	-0.21	-1.227	0.228
Ferrous sulfate	2	11.13	37.90	0.06	0.294	0.771
Lignite	2	-47.24	29.69	-0.25	-1.591	0.121
Superphosphate	11	-53.02	16.74	-0.59	-3.167	0.003
Wood vinegar	3	-8.95	34.85	-0.06	-0.257	0.799
Zeolite	7	-34.36	27.80	-0.32	-1.236	0.225

Table 5. Unstandardized and standardized coefficients, standard error, and *t* values for multiple regression analysis of effects of additives on cumulative CH₄ emission

Additive	Number of sample	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	<i>t</i>	<i>p</i>
		β	SE	β		
(Constant)		-45.87	9.11		-5.038	0.000
Apple pomace	1	23.87	31.37	0.08	0.761	0.450
Bean dregs	2	74.29	22.32	0.35	3.329	0.002
Biochar	13	-16.45	12.54	-0.19	-1.311	0.195
Ca-Bentonite	1	45.87	31.37	0.15	1.462	0.149
Citric acid	1	12.87	31.37	0.04	0.410	0.683
Clay	1	-0.13	31.37	0.00	-0.004	0.997
Corn stalk	1	-47.13	31.37	-0.16	-1.502	0.139
Diatomite	2	21.87	23.10	0.10	0.947	0.348
Dicyandiamide	19	26.28	10.80	0.34	2.433	0.018
Elemental sulfur	1	-25.13	31.37	-0.08	-0.801	0.427
Ferrous sulfate	2	-22.80	30.62	-0.11	-0.745	0.460
Lignite	2	-10.13	23.10	-0.05	-0.439	0.663
Lime	2	-5.93	23.10	-0.03	-0.257	0.798
Magnesium hydrogen phosphate	1	45.87	31.37	0.15	1.462	0.149
Medical stone	1	17.87	31.37	0.06	0.570	0.571
Nano zero valent iron	1	17.87	31.37	0.06	0.570	0.571
Phosphoric acid	1	-7.13	31.37	-0.02	-0.227	0.821
Potassium peroxodisulfate	1	-25.13	31.37	-0.08	-0.801	0.427
Saw dust	1	-52.13	31.37	-0.17	-1.662	0.102
Spent mushroom substrate	1	-52.13	31.37	-0.17	-1.662	0.102
Superphosphate	17	7.15	10.80	0.09	0.662	0.511
Wood vinegar	3	3.06	28.11	0.02	0.109	0.914
Zeolite	7	2.59	22.32	0.02	0.116	0.908

차와 디시안디아미드가 N₂O 저감에 효과적인 것으로 판단된다. 반면에 과황산칼륨(potassium peroxodisulfate)은 N₂O 발생량을 유의하게 증가시키는 것으로 나타났으나 표본 수가 1인 점을 고려 시 과황산칼륨이 N₂O 발생량을 증가시키는 효과가 있다고 판단하기에는 어려움이 있을 것으로 판단된다 (Table 6).

본 연구에서는 첨가제가 퇴비화 과정 중 발생하는 온실가스에 미치는 영향에 대한 자료를 수집하여 비교분석을 수행하였다. 분석결과에 따르면 첨가제는 퇴비화 과정 중 CO₂, CH₄, N₂O 누적발생량을 10.5%, 39.0%, 28.6% 저감시키는 것으로 조사되었으며 N₂O의 경우 물리적 첨가제가 화학적 첨가제보다 저감효과가 큰 것으로 나타났다. 개별 첨가제로 볼 경우 CO₂는 과인산석회가 N₂O는 바이오차와 디시안디아미드가 저감 효과가 우수한 것으로 나타났으며 CH₄는 첨가제 간에 유의한 차이를 확인할 수 없었다. 따라서, 과인산석회, 바이오차, 디시안디아미드 등을 퇴비화 과정 중에 첨가하면 탄소중립을 위

한 온실가스 배출량 저감에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 더불어 온실가스 배출량 저감에 효과적인 첨가제를 탐색하기 위한 후속연구도 지속적으로 수행될 필요가 있을 것이다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment

This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science and Technology Development (Project No. RS-2022-RD010368)" Rural Development Administration, Republic of Korea.

Table 6. Unstandardized and standardized coefficients, standard error, and *t* values for multiple regression analysis of effects of additives on cumulative N₂O emission

Additive	Number of sample	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	<i>t</i>	<i>p</i>
		β	SE	β		
(Constant)		-6.19	8.70		-0.712	0.480
Apple pomace	1	-28.81	30.10	-0.09	-0.891	0.377
Bean dregs	2	17.53	21.35	0.08	0.821	0.415
Biochar	14	-24.67	12.15	-0.28	-2.030	0.048
Ca-Bentonite	1	-22.81	30.10	-0.07	-0.758	0.452
CaMgP Fertilizer	2	-8.01	22.16	-0.04	-0.361	0.719
Citric acid	1	-44.81	30.10	-0.14	-1.488	0.143
Clay	1	-80.81	30.10	-0.26	-2.684	0.010
Corn stalk	1	-40.81	30.10	-0.31	-1.356	0.181
Diatomite	2	-49.31	22.16	-0.22	-2.225	0.031
Dicyandiamide	17	-33.69	10.54	-0.40	-3.196	0.002
Elemental sulfur	1	54.19	30.10	0.18	1.800	0.078
Lignite	2	-60.31	22.16	-0.27	-2.722	0.009
Lime	2	-38.41	22.16	-0.17	-1.733	0.089
Magnesium hydrogen phosphate	1	-63.81	30.10	-0.21	-2.120	0.039
Medical stone	2	-24.81	22.16	-0.11	-1.120	0.268
Phosphoric acid	1	38.19	30.10	0.12	1.269	0.210
Potassium peroxodisulfate	1	66.19	30.10	0.21	2.199	0.032
Saw dust	1	-66.81	30.10	-0.22	-2.219	0.031
Spent mushroom substrate	2	-26.81	22.16	-0.12	-1.210	0.232
Superphosphate	12	-6.03	11.19	-0.06	-0.538	0.593
Wood vinegar	3	-2.67	33.28	-0.02	-0.080	0.936
Zeolite	4	-47.13	30.16	-0.30	-1.563	0.124

References

- Guo HN, Wu SB, Tian YJ, Zhang J, Liu HT (2021) Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A review. *Bioresource Technology*, 319, 124114. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124114>.
- Awasthi MK, Sarsaiya S, Wang Q, Wang M, Chen H, Ren X, Zhang Z (2018) Mitigation of global warming potential for cleaner composting. in: Varjani SJ, Parameswaran B, Kumar S, Khare SK, *Biosynthetic Technology and Environmental Challenges*. pp. 271-305, Springer, Singapore.
- Pergola M, Persiani A, Palese AM, Di Meo V, Pastore V, D'Adamo C, Celano G (2018) Composting: The way for a sustainable agriculture. *Applied Soil Ecology*, 123, 744-750. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.016>.
- Cao Y, Wang X, Bai Z, Chadwick D, Misselbrook T, Sommer SG, Qin W, Ma L (2019) Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 235, 626-635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepor.2019.06.288>.
- Perez T, Vergara SE, Silver WL (2023) Assessing the climate change mitigation potential from food waste composting. *Scientific Reports*, 13, 7608. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34174-z>.
- Sánchez A, Artola A, Font X, Gea T, Barrera R, Gabriel D, Sánchez-Monedero MA, Roig A, Cayuela ML, Míndini C (2015) Greenhouse gas from organic waste composting: Emissions and measurement. In: Lichtfouse E, Schwarabauer J, Robert D, CO₂ sequestration, biofuels and depollution. pp. 33-70. Springer, New York, USA.
- Sanchez-Monedero MA, Cayuela ML, Roig A, Jindo K, Mondini C, Bolan N (2018) Role of biochar as an

- additive in organic waste composting. *Bioresource Technology*, 247, 1155-1164.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.193>.
8. Soudejani HT, Kazemian H, Inglezakis VJ, Zorpas AA (2019) Application of zeolites in organic waste composting: A review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 22, 101396.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101396>.
 9. Czekafa W, Malinska K, Cáceres R, Janczak D, Dach J, Lewicki A (2016) Co-composting of poultry manure mixtures amended with biochar - The effect of biochar on temperature and C-CO₂ emission. *Bioresource Technology*, 200, 921-927.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.019>.
 10. Yin Y, Yang C, Li M, Zheng Y, Ge C, Gu J, Li H, Duan M, Wang X, Chen R (2021) Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review. *Science of the Total Environment*, 798, 149294.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294>.
 11. Ravindran B, Awasthi MK, Karmegam N, Chang SW, Chaudhary DK, Selvam A, Nguyen DD, Milon AR, Munuswamy-Ramanujam G (2022) Co-composting of food waste and swine manure augmenting biochar and salt: Nutrient dynamics, gaseous emissions and microbial activity. *Bioresource Technology*, 344, 126300.
<https://doi.org/10.1016/j.biorech.2021.126300>.
 12. He X, Yin H, Han L, Cui R, Fang C, Huang G (2019) Effects of biochar size and type on gaseous emissions during pig manure/wheat straw aerobic composting: Insights into multivariate-microscale characterization and microbial mechanism. *Bioresource Technology*, 271, 375-382.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.104>.
 13. Shan G, Li W, Gao Y, Tan W, Xi B (2021) Additives for reducing nitrogen loss during composting: A review. *Journal of Cleaner Production*, 307, 127308.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127308>.
 14. Awasthi MK, Wang Q, Huang H, Ren X, Lahori AH, Mahar A, Ali A, Shen F, Li R, Zhang Z (2016) Influence of zeolite and lime as additives on greenhouse gas emissions and maturity evolution during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 216, 172-181.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.065>.
 15. Vandecasteele B, Sinicco T, D'Hose T, Nest TV, Mondini C (2016) Biochar amendment before or after composting affects compost quality and N losses, but not P plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 168, 200-209.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.045>.
 16. Yang F, Li GX, Yang QY, Luo WH (2013) Effect of bulking agents on maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Chemosphere*, 93, 1393-1399.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.07.002>.
 17. Ren X, Wang Q, Li R, Chang CC, Pan J, Zhang Z (2020) Effect of clay on greenhouse gas emissions and humification during pig manure composting as supported by spectroscopic evidence. *Science of Total Environment*. 737, 139712.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139712>.
 18. Peng S, Li H, Xu Q, Lin X, Wang Y (2019) Addition of zeolite and superphosphate to windrow composting of chicken manure improves fertilizer efficiency and reduces greenhouse gas emission. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 36845-36856.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06544-6>.
 19. Yang Y, Awasthi MK, Du W, Ren X, Lei T, Lv J (2020) Compost supplementation with nitrogen loss and greenhouse gas emissions during pig manure composting. *Bioresource Technology*, 297, 122435.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122435>.
 20. Liu Y, Ma R, Wang J, Wang G, Li G, Wuyun D, Yuan J (2023) Effect of nano zero-valent iron, potassium persulphate, and biochar on maturity and gaseous emissions during multi-material co-composting. *Environmental Technology&Innovation*, 32, 103309.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103309>.
 21. Wu JP, Li ML, Wang Y, Lin S, Hu RG, Xiang RB (2023) Impact of bentonite on greenhouse gas emissions during pig manure composting and its subsequent application. *Journal of Environmental Management*, 344, 118453.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118453>.
 22. Castro-Herrera D, Prost K, Kim DG, Yimer F, Tadesse M, Gebrehiwot M, Brüggemann N (2023) Biochar addition reduces non-CO₂ greenhouse gas emissions during composting of human excreta and cattle manure. *Journal of Environmental Quality*, 52, 814-828.
<https://doi.org/10.1002/jeq2.20482>.
 23. Awasthi MK, Duan Y, Awasthi SK, Liu T, Zhang Z (2020) Effect of biochar and bacterial inoculum additions on cow dung composting. *Bioresource Technology*, 297, 122407.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122407>.
 24. Li D, Manu MK, Varjani S, Wong JWC (2023) Role

- of tobacco and bamboo biochar on food waste digestate co-composting: Nitrogen conservation, greenhouse gas emissions, and compost quality. *Waste Management*, 156, 44-54.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.10.022>.
25. Cao Y, Wang X, Liu L, Velthof GL, Misselbrook T, Bai Z, Ma L (2020) Acidification of manure reduces gaseous emissions and nutrient losses from subsequent composting process. *Journal of Environmental Management*, 264, 110454.
<https://doi.org/10.1016/j.envman.2020.110454>.
 26. Yuan J, Li Y, Chen S, Li D, Tang H, Chadwick D, Li S, Li W, Li G (2018) Effects of phosphogypsum, superphosphate, and dicyandiamide on gaseous emission and compost quality during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 270, 368-376.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.023>.
 27. Di HJ, Cameron KC (2016) Inhibition of nitrification to mitigate nitrate leaching and nitrous oxide emissions in grazed grassland: A review. *Journal of Soils and Sediments*, 16, 1401-1420.
<https://doi.org/10.1007/s11368-016-1403-8>.
 28. Jiang J, Kang K, Wang C, Sun X, Dang S, Wang N, Wang Y, Zhang C, Yan G, Li Y (2018) Evaluation of total greenhouse gas emissions during sewage sludge composting by the different dicyandiamide added forms: Mixing, surface broadcasting, and their combination. *Waste Management*, 81, 94-103.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.003>.
 29. Oliverira LV, Higarashi MM, Nicoloso RS, Coldebella A (2019) Use of dicyandiamide to reduce nitrogen loss and nitrous oxide emission during mechanically turned co-composting of swine slurry with sawdust. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 2567-2579.
<https://doi.org/10.1007/s12649-019-00616-x>.
 30. Wu J, He S, Li G, Zhao Z, Wei Y, Lin Z, Tao D (2019) Reducing ammonia and greenhouse gas emission with adding high levels of superphosphate fertilizer during composting, 26, 30921-30929.
<https://doi.org/10.1007/s11356-019-06209-4>.
 31. Hao X, Larney FJ, Chang C, Travis GR, Nichol CK, Bremer E (2005) The effect of phosphogypsum on greenhouse gas emissions during cattle manure composting. *Journal of Environmental Quality*, 34, 774-781. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0388>.
 32. Yang Y, Yin Z, Li L, Li Y, Li Y, Luo Y, Li G, Yuan J (2022) Effects of dicyandiamide, phosphogypsum and superphosphate on greenhouse gas emissions during pig manure composting. *Science of the Total Environment*, 846, 157487.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157487>.
 33. Luo Y, Li G, Luo W, Schuchardt F, Jiang T, Xu D (2013) Effect of phosphogypsum and dicyandiamide as additives on NH₃, N₂O and CH₄ emissions during composting. *Journal of Environmental Sciences*, 25, 1338-1345.
[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60126-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60126-0).
 34. Li S, Gu X, Li H, Li M, Liu Z, Xu Z, Li J, Luo Y, Wang M, Wan X (2023) Effects of phosphorus-containing additives on carbon transformation during pig manure composting. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103290.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103290>.
 35. Zhang Y, Huang M, Zheng F, Guo S, Song X, Liu S, Li S, Zou J (2021) Decreased methane emissions associated with methanogenic and methanotrophic communities in a pig manure windrow composting system under calcium superphosphate amendment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18, 6244.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18126244>.
 36. Zhang D, Luo W, Yuan J, Li G, Luo Y (2017) Effects of woody peat and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting. *Waste Management*, 68, 57-63.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.042>.
 37. Wang Z, Xu Y, Yang T, Liu Y, Zheng T, Zheng C (2023) Effects of biochar carried microbial agent on compost quality, greenhouse gas emission and bacterial community during sheep manure composting. *Biochar*, 5, 3.
<https://doi.org/10.1007/s42773-022-00202-w>.
 38. Zhao Y, Li W, Chen L, Meng L, Zhang S (2023) Impacts of adding thermotolerant nitrifying bacteria on nitrogenous gas emissions and bacterial community structure during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 368, 128359.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128359>.
 39. Lei L, Gu J, Wang X, Song Z, Yu J, Wang J, Dai X, Zhao W (2021) Effects of phosphogypsum and medical stone on nitrogen transformation, nitrogen functional genes, and bacterial community during aerobic composting. *Science of the Total Environment*, 753, 141746.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141746>.
 40. Mao H, Zhang H, Fu Q, Zhong M, Li R, Zhai B, Wang Z, Zhou L (2019) Effects of four additives in pig manure composting on greenhouse gas emission reduc-

- tion and bacterial community change. *Bioresource Technology*, 292, 121896. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121896>.
41. Wang Q, Awasthi MK, Ren X, Zhao J, Li R, Wang Z, Wang M, Chen H, Zhang Z (2018) Combining biochar, zeolite and wood vinegar for composting of pig manure: The effect on greenhouse gas emission and nitrogen conservation. *Waste Management*, 74, 221-230. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.015>.
42. Wang C, Lu H, Dong D, Deng H, Strong PJ, Wang H, Wu W (2013) Insight into the effects of biochar on manure composting: evidence supporting the relationship between N₂O emission and denitrifying community. *Environmental Science & Technology*, 47, 7341-7349. <https://doi.org/10.1021/es305293h>.
43. Liu N, Zhou J, Han L, Ma S, Sun X, Huang G (2017) Role and multi-scale characterization of bamboo biochar during poultry manure aerobic composting. *Bioresource Technology*, 241, 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.144>.
44. Mao H, Lv Z, Sun H, Li R, Zhai B, Wang Z, Awasthi MK, Wang Q, Zhou L (2018) Improvement of biochar and bacterial powder addition on gaseous emission and bacterial community in pig manure compost. *Bioresource Technology*, 258, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.082>.
45. Harrison BP, Gao S, Gonzales M, Thao T, Bischak E, Ghezzehei TA, Berhe AA, Diza G, Ryals RA (2022) Dairy manure co-composting with wood biochar plays a critical role in meeting global methane goals. *Environmental Science & Technology*, 56, 10987-10996. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c03467>.
46. Wang M, Awasthi MK, Wang Q, Chen H, Ren X, Zhao J, Li R, Zhang Z (2017) Comparison of additives amendment for mitigation of greenhouse gases and ammonia emission during sewage sludge co-composting based on correlation analysis. *Bioresource Technology*, 243, 520-527. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.158>.
47. Chen H, Awasthi MK, Liu T, Zhao J, Ren X, Wang M, Duan Y, Awasthi SK, Zhang Z (2018) Influence of clay as additive on greenhouse gases emission and maturity evaluation during chicken manure composting. *Bioresource Technology*, 266, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.073>.
48. Ren X, Wang Q, Awasthi MK, Zhao J, Wang J, Liu T, Li R, Zhang Z (2019) Improvement of cleaner composting production by adding Diatomite: From the nitrogen conservation and greenhouse gas emission. *Bioresource Technology*, 286, 121377. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121377>.
49. Impraim R, Weatherley A, Coates T, Chen D, Suter H (2020) Lignite improved the quality of composted manure and mitigated emissions of ammonia and greenhouse gases during forced aeration composting. *Sustainability*, 12, 10528. <https://doi.org/10.3390/su122410528>.
50. Zhang L, Shi T, Xu Z, Bao Z, Li J, Li G, Yuan J (2023) Effect of lime and calcium magnesium phosphate on gaseous emissions, maturity, and bacterial dynamics during food waste composting. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103306. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103306>.
51. Wang Q, Wang Z, Awasthi MK, Jiang Y, Li R, Ren X, Zhao J, Shen F, Wang M, Zhang Z (2016) Evaluation of medical stone amendment for the reduction of nitrogen loss and bioavailability of heavy metals during pig manure composting. *Bioresource Technology*, 220, 297-304. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.081>.
52. Lei L, Gu J, Wang X, Song Z, Yu J, Guo H, Xie J, Wang J, Sun W (2022) Effects and microbial mechanisms of phosphogypsum and medical stone on organic matter degradation and methane emissions during swine manure composting. *Journal of Environmental Management*, 315, 115139. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115139>.
53. Liu Y, Ma R, Li D, Qi C, Han L, Chen M, Fu F, Yuan J, Li G (2020) Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer, biochar and spent mushroom substrate on compost maturity and gaseous emissions during pig manure composting. *Journal of Environmental Management*, 267, 110649. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110649>.
54. Pan J, Cai H, Zhang Z, Liu H, Li R, Mao H, Awasthi MK, Wang Q, Zhai L (2018) Comparative evaluation of the use of acidic additives on sewage sludge composting quality improvement, nitrogen conservation, and greenhouse gas reduction. *Bioresource Technology*, 270, 467-475. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.050>.
55. Li Y, Luo W, Li G, Wang K, Gong X (2018) Performance of phosphogypsum and calcium magnesium phosphate fertilizer for nitrogen conservation in pig manure composting. *Bioresource Technology*, 250, 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.172>.

-
56. Sardá LG, Higarashi MM, Nicoloso RS, Falkoski C, Ribeiro SMS, Silveira CAP, Soares HM (2020) Effects of dicyandiamide and Mg/P on the global warming potential of swine slurry and sawdust cocomposting. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 30405-30418.
57. Yang F, Li G, Shi H, Wang Y (2015) Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting. *Waste Management*, 36, 70-76. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.012>.
- <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09244-8>.