

양돈장 사료의 곰팡이독소 오염률 조사

신현숙¹ · 김근호¹ · 서진성¹ · 손영민¹ · 박지용² · 윤순식¹ · 정병열^{1*}

농림축산검역본부 세균질병과¹, (주)코브크²

Prevalence of mycotoxin contamination in pig feedstuffs

Hyun Sook Shin¹, Keun-Ho Kim¹, Jin Sung Seo¹, Young Min Son¹, Jiyong Park², Soon Seek Yoon¹, Byeong Yeal Jung^{1*}

¹Bacterial Disease Division, Animal and Plant Quarantine Agency, Gimcheon 39660, Korea

²Korea Veterinary Consulting Group, Jinju 52801, Korea

Received September 10, 2021

Revised December 10, 2021

Accepted December 10, 2021

Corresponding author:

Byeong Yeal Jung

E-mail: jungby@korea.kr

https://orcid.org/0000-0003-3229-8932

To analyze prevalence of mycotoxins, a total of 74 feedstuff samples were collected from silos (n=37) and hoppers (n=37) in nine pig farms. Six mycotoxins were tested with commercialized ELISA kits. All samples were contaminated with four or more mycotoxins. Zearalenone was detected in all of the tested samples. Ochratoxin, deoxynivalenol and H-2/HT-2 toxin were detected in more than 90% of the samples. And also, fumonisin was positive in 89.2% of the samples from the silos, 75.2% from the hoppers, respectively. On the other hand, aflatoxin was detected in about 40% of the samples. When the behavior of lactating sows was observed, possible mycotoxicosis was suspected. It was confirmed that their feedstuffs were contaminated with high levels of mycotoxins such as ochratoxin and T-2/HT-2 toxin. After cleaning the feedline, the clinical symptoms in sows suspected with mycotoxicosis were disappeared. Although mycotoxin concentration in most of the feedstuffs was below the acceptance level, these data indicate that what are required is more monitoring and continuous management for mycotoxins in pig feedstuffs.

Key Words: Mycotoxin, Feedstuff, Pig, ELISA

서론

사료는 가축의 성장, 복지, 생산성에 중요한 인자일 뿐 아니라 축산물 품질에도 중요한 역할을 한다. 특히 사료 중 곰팡이독소는 곰팡이가 생산하는 2차 대사산물로서 400종 이상이 알려져 있으며, 중독된 가축에 사료섭취 감소, 대사장애, 내·외분비계 변화, 면역기능 저하 등을 유발한다. 또한 아플라톡신, 오크라톡신, 푸모니신은 국제암연구기관에서 규정한 발암물질로(IARC, 2021) 축산물에 잔류된 곰팡이독소는 소비자 건강에 악영향을 미칠 수 있다(Chaytor 등, 2011; Elliott 등, 2020; Yang 등, 2020).

국제식품규격위원회, 유럽연합 등은 국제적인 식품 안전성관리 측면에서 곰팡이독소에 대한 표준화된 권고기준을 제시하고 있으며, 선진국에서도 자국 내 동물사료 안전관리 체계를 구

축하여 곰팡이독소 등 유해물질을 관리하고 있다. 한편 우리나라는 「사료관리법」의 「사료 내 유해물질의 범위 및 허용기준」에 곰팡이독소 검출기준을 고시하여 관리하고 있다(농촌진흥청, 2017; 농림축산식품부, 2019).

주요 곰팡이 중 *Aspergillus*, *Penicillium* 속은 주로 사료의 저장과정에서 아플라톡신, 오크라톡신 등을 분비하고, *Fusarium* 속 곰팡이는 곡류 재배과정에서 독소를 분비하는데 디옥시니발레놀, 제랄레논, 푸모니신, T-2/HT-2 독소 등이 해당한다(Alshannaq와 Yu, 2017). 대부분 곰팡이독소는 사료의 제조과정에서 파괴되지 않으며, 특히 곰팡이들은 하나 이상의 독소를 분비하는 경우가 많아 중복오염이 흔히 발생한다(Pleadin 등, 2012). 반추동물은 위 내 공생균에 의해 곰팡이독소 중독이 적은 반면, 돼지는 반추동물과 비교해 독소에 대한 감수성이 높아 사료에 곰팡이독소 발생 시 큰 경제적 손실을 가져올 수 있다



(Elliott 등, 2020).

최근 대한한돈협회에서 실시한 곰팡이독소 발생실태 조사 결과에 따르면 120건 중 아플라톡신은 22.0%, 오크라톡신은 12.8%, 제랄레논은 70.3%, 푸모니신과 디옥시니발레놀은 100% 시료에서 양성이었다(대한한돈협회, 2021). 또한, 송 등(2010)은 국내 양돈장 사료 449건을 수집하여 분석한 결과, 17건에서 기준치인 10 µg/kg (ppb)를 초과하는 아플라톡신을 검출하였다. 한편 농촌진흥청과 한국사료협회에서도 사료원료 등에서 곰팡이독소를 검출하여, 사료뿐 아니라 사료원료에 대해서도 지속적인 곰팡이독소 점검의 필요성을 강조하였다(홍, 2013; 국립축산과학원, 2015). 국제적으로도 사료 및 사료원료 수출입국에서 곰팡이독소의 위해성을 인식하고 아플라톡신 등에 대한 모니터링을 실시하여 결과를 보고하고 있다(Pereyra 등, 2011; Shi 등, 2018; Gruber-Dorninger 등, 2019; Chiotta 등, 2020).

High performance liquid chromatography (HPLC)는 곰팡이독소를 포함한 다양한 화합물 검출에 주로 사용되는 분석 방법이다. 그러나 시료 추출물을 정제하는 과정이 어렵고, 비용이 많이 들며, 검출시간이 많이 소요되는 단점이 있다. 반면 enzyme linked immunosorbent assay (ELISA)는 HPLC와 비교할 때 민감도, 특이도, 신속성, 간편성, 경제성 측면에서 매우 효과적인 방법으로 HPLC를 대체하여 독소검출에 널리 이용되고 있다(Song 등, 2010; Pereyra 등, 2011).

본 연구는 곰팡이독소중독증으로 의심되는 양돈장의 사료 중 곰팡이독소 오염도를 확인하고자 수행하였다. 오염 원인을 구체적으로 파악하기 위하여 사육단계로 구분된 각 돈사별 사료탱크와 급이기로부터 시료를 채취하였다. 또한 경남지역 다른 양돈장에서도 시료를 채취하여 지역 양돈장 사료에 유행하는 곰팡이독소의 종류와 그들의 오염수준을 조사하였다.

재료 및 방법

시료 채취

양돈장 사료에서 곰팡이독소의 오염도를 조사하기 위하여 곰팡이독소 중독증이 의심되는 양돈장 1개와 이와 유사한 사육규모(2,000두 이상)를 가진 양돈장 8개 등 경남지역에서 총 9개 양돈장을 선정하였다. 시료 수집은 2018년 4월~5월에 이루어졌으며, 후보돈사, 분만사, 이유자돈사, 육성·비육사 사료자동급이설비의 사료탱크와 돈방급이기에 동시에 채취하였다. 채취일로부터 1주일 이내에 입고된 사료를 대상으로 하였으며, 총 74건(사료탱크=37, 돈방급이기=37)에 대하여 분석을 수행하였다.

곰팡이독소 검출 및 정량

사료 중 곰팡이독소를 검출하기 위한 키트의 선정은 Song 등(2010)의 연구 결과를 참고하여 정확도 및 정밀도가 높은 것으로 확인된 Veratox[®] Quantitative ELISA kit (Neogen, USA)를 사용하였으며, 독소별 추출용매, 키트의 검출한계 및 정량범위는 Table 1에 나타난 바와 같다. 시료는 20 mesh를 통과할 수 있도록 분쇄하였고, 곰팡이독소에 따라 추출용매를 달리 적용하였으며 제조사의 권장 방법에 따라 검사를 수행하였다. 최종 반응물은 650 nm 파장의 흡광도를 측정하고, Veratox software (Neogen)를 이용하여 정량하였으며, 검출한계 미만의 수치를 나타낸 시료는 음성으로 처리하였다.

결 과

양돈장의 사료탱크와 돈방급이기에 각각 37개씩, 총 74건의 사료에 대하여 곰팡이독소 오염도를 조사하였다. 검출한계 이상의 독소가 검출된 사료는 아플라톡신이 31건(41.9%), 오크라톡신 71건(95.9%), 디옥시니발레놀 69건(93.2%), 푸모니신 61건(82.4%), T-2/HT-2 독소는 71건(95.9%)이었다. 특히 제랄레논의 경우 모든 시료에서 검출되었다(Table 2). 총 74건 시료 중 14건(18.9%)은 4종 곰팡이독소가 동시검출되었으며, 39건(52.7%)은 5종 곰팡이독소에, 그리고 21건(28.4%)은 6종 곰팡이독소가 동시검출되었다. 따라서 검사한 모든 사료 시료는 4종 이상의 곰팡이독소에 혼합오염되었으며, 특히 오크라톡신, 디옥시니발레놀, 제랄레논, T-2/HT-2 독소의 혼합오염이 50건(67.6%)으로 가장 많았다(data not shown).

비록 검사한 사료의 곰팡이독소 평균 오염치는 사료관리법의 기준농도를 초과하지 않았으나, 사료탱크에서 제랄레논 오염이 권고기준을 초과한 경우가 1건, 그리고 급이기에 기준을 초과한 시료가 아플라톡신, 제랄레논, T-2/HT-2 독소에서 각각 1건

Table 1. Target mycotoxins and kit performance used in this study

Mycotoxin	Solvent	Detection limit (ppb)	Quantitation range (ppb)
Aflatoxins (AF)	Methanol	1.4	5.0~50.0
Ochratoxin (OT)	Methanol	1.0	2.0~25.0
Deoxynivalenol (DON)	Water	100.0	500~5000.0
Zearalenone (ZEN)	Methanol	10.0	25.0~500.0
Fumonisin (FUM)	Methanol	200.0	500.0~6000.0
T-2/HT-2 toxin (T2/HT2)	Methanol	10.0	25.0~250.0

Table 2. Prevalence of mycotoxins in feedstuffs in pig farms

Source (n)	No. (%) of positive samples with indicated mycotoxins					
	AF*	OT	DON	ZEN	FUM	T2/HT2
Silo (37)	15 (40.5)	36 (97.3)	34 (91.9)	37 (100.0)	33 (89.2)	36 (97.3)
Hopper (37)	16 (43.2)	35 (94.6)	35 (94.6)	37 (100.0)	28 (75.7)	35 (94.6)
Total (74)	31 (41.9)	71 (95.9)	69 (93.2)	74 (100.0)	61 (82.4)	71 (95.9)

*Abbreviation was shown in Table 1.

Table 3. Range of mycotoxins in pig feedstuffs according to source

Mycotoxin	Source (n*)	Mean [†] ±SD (ppb)	Min (ppb)	Max (ppb)	Acceptance level (ppb)
AF	Silo (15)	2.23±1.08	1.50	5.50	10 [‡]
	Hopper (16)	2.60±2.34	1.50	11.55	
OT	Silo (36)	8.17±3.97	3.60	22.70	200 [‡]
	Hopper (35)	7.19±3.92	1.10	21.20	
DON	Silo (34)	391.18±129.18	200.00	700.00	900 [§]
	Hopper (35)	388.57±156.34	200.00	800.00	
ZEN	Silo (37)	48.33±21.31	13.00	101.10	100 [§]
	Hopper (37)	46.81±19.79	19.60	102.30	
FUM	Silo (33)	1339.39±842.41	400.00	4100.00	5000 [§]
	Hopper (28)	1223.21±876.02	300.00	3600.00	
T2/HT2	Silo (36)	31.55±15.65	10.10	77.20	250 [§]
	Hopper (35)	38.04±49.40	13.10	316.60	

*Number of positive samples.

[†]Mean concentration of positive samples.

[‡]Allowed level.

[§]Recommended level.

Table 4. Concentration of mycotoxins in feedstuffs of mycotoxicosis suspected farm (ppb)

Breeding stage	Source	AF	OT	DON	ZEN	FUM	T2/HT2
Gestation sow	Silo	ND*	5.40	400.00	62.70	1400.00	29.30
	Hopper	ND	3.90	400.00	68.40	1300.00	34.30
Lactating sow	Silo	ND	5.10	300.00	63.60	1200.00	42.20
	Hopper	11.55	9.60	600.00	69.10	ND	316.60
Weaned piglet	Silo	ND	10.50	600.00	69.40	1800.00	31.80
	Hopper	ND	3.70	600.00	73.10	650.00	30.40
Grower/finisher	Silo	ND	3.60	700.00	88.95	1400.00	48.10
	Hopper	ND	2.70	600.00	61.95	700.00	50.30

*Not detected.

씩 있었다(Table 3). 사료탱크와 급이기에서 곰팡이독소 검출농도를 비교한 결과, 유의한 차이는 관찰되지 않았다($P>0.05$).

특정 질병없이 사료섭취 거부와 현저히 둔한 움직임을 보여 곰팡이중독증이 의심된 농장의 분만사 급이기에서는 아플라톡신이 허용기준의 1.2배(11.6 ppb), T-2/HT-2 독소는 관리기준의 약 1.3배(316.6 ppb) 높게 검출되었다(Table 4). 특히 상

기 곰팡이중독 의심 농장의 곰팡이독소 오염수준을 전체 평균 오염수준과 비교한 결과, 아플라톡신은 4.4배, T-2/HT-2 독소는 8.3배 높게 나타났다. 아울러 의심 농장의 사료급이설비를 점검한 결과, 호퍼와 구동부 등에 부패한 사료가 다량으로 끼어 있었다. 부패한 사료를 제거하고 급이라인을 분해·세척한 후 얻어진 사료에서는 아플라톡신은 1.7 ppb, T-2/HT-2 독소는 29.7

ppb로 낮아졌으며, 모든의 이상행동도 개선되었다(data not shown). 따라서 이 농장의 모든이 나타난 이상증상은 곰팡이독소중독증으로 진단할 수 있었다.

고 찰

경남지역 9개 양돈장 사료를 대상으로 곰팡이독소를 검출한 결과, 모든 시료가 제랄레논에 오염되어 있었고 오크라톡신, 디옥시니발레놀, T-2/HT-2 독소는 90% 이상의 시료에서 검출되었다(Table 2). 더욱이 모든 시료는 4종 이상의 곰팡이독소에 혼합오염되어 있었다.

한편 높은 독소검출률에도 불구하고 사료 중 곰팡이독소의 평균 농도는 모두 사료관리법의 관리기준을 초과하지 않았다(Table 3). 그러나 사료탱크에서 채취한 37건의 시료에서 아플라톡신 1건 (2.7%)만이 허용기준치의 1/2을 초과하였으며, 디옥시니발레놀, 제랄레논, 푸모니신은 각각 9건(24.3%), 15건(40.5%), 3건(8.1%)이 권장농도의 1/2을 초과하였다(data not shown). 이러한 결과는 한돈협회 자료(대한한돈협회, 2021)와 유사하였으며, 작물 재배과정에서 발생하는 곰팡이독소로 알려진 디옥시니발레놀, 제랄레논, 푸모니신의 검출빈도가 높은 것은 오염된 원료에 의한 것으로 추정되어 이에 대한 관리가 필요한 것으로 생각되었다.

더욱이 사료원료에서 *Fusarium* 속 곰팡이독소의 검출빈도가 증가하고 있으며(Pereya, 2011; Gruber-Dorninger 등, 2019), 니발레놀 등 규제-관리가 되지 않은 곰팡이독소의 피해 또한 보고되며(Kim 등, 2011; Nogueira, 2018, Chiotta, 2020), 아울러 장기간에 걸친 저농도의 곰팡이독소 노출이 급성 중독에 의한 피해보다 더 큰 손실을 유발할 수 있어(Pleadin, 2012) 사료의 품질관리가 매우 시급한 실정이다. 본 연구에서 나타난 바와 같이 곰팡이독소는 혼합오염되는 경향이 많고 독소들의 상호 상승작용(Pereya, 2011; Dąbrowski, 2016) 뿐 아니라 기준치 이하의 곰팡이독소 노출에 의한 장내미생물 군의 변화도 보고되고 있어(Moon, 2020), 독소별 기준치 초과여부만으로 곰팡이독소로부터 돼지의 안전성을 보장할 수 없을 것이다. 그러므로 사료 안전성 확보를 위하여 “사료의 품질을 효율적이고 안전하게 관리하기 위한 참고사항”으로 운영(농림축산식품부, 2019)되는 곰팡이독소 규정에 대해 강제성을 부과하고 사료 뿐 아니라 사료원료에 대한 모니터링 강화 등 독소절감을 위한 노력이 필요할 것으로 생각되었다.

농장의 사료탱크는 결로현상이나 누수에 의하여 쉽게 습도가

올라갈 수 있고 중심부의 사료가 먼저 빠지는 갈때기 형태로 인하여 사료 적체가 일어나기 쉽다. 또한 사료자동급이설비는 구동부, 디스크, 파이프라인, 코너부 등에 사료가 끼이기 쉽고, 결로현상 또한 빈번하여 적절한 온도 조건이 된다면 곰팡이가 증식하기 좋은 환경이 된다. 본 연구의 곰팡이독소오염 개선사례에서 나타났듯이, 사료자동급이설비에 대한 주기적인 청소와 관리의 곰팡이독소에 의한 중독증을 예방할 수 있는 가장 확실한 방법으로 생각되었다.

곰팡이독소의 위해성을 보고한 논문은 많으나, 곡물 종류, 표본추출, 분석 방법, 다양한 독소와 이들의 상호작용 등 곰팡이독소 분석에 고려되어야 할 인자들이 매우 많다(Whitlow, 2010; 국립축산과학원, 2015; Castellari, 2015). 그러므로 농가의 자율적인 곰팡이독소 관리강화와 함께 체계적인 조사 방법을 정립하고 주기적인 발생실태 파악이 필요할 것으로 생각되었다.

결 론

곰팡이독소중독 증세를 나타낸 돼지들이 섭취한 사료에는 아플라톡신과 T-2/HT-2 독소가 기준치 이상으로 오염되어 있었다. 이 농장을 포함한 9개 농장의 총 74개 사료 시료에 대하여 곰팡이독소오염을 조사한 결과, 양성을 나타낸 시료 비율은 아플라톡신이 41.9%, 오크라톡신 95.9%, 디옥시니발레놀 93.2%, 푸모니신 82.4%, T-2/HT-2독소는 95.9%, 그리고 제랄레논은 모든 시료에서 검출되었다. 각 독소의 평균농도는 「사료 내 유해물질의 범위 및 허용기준」에서 제시하는 허용 및 권고기준보다 낮은 수치로 확인되었으나 몇몇 시료에서는 기준을 초과하거나 우려할 정도의 독소가 검출되었다. 곰팡이독소 오염과 피해 예방을 위하여 사료업체뿐 아니라 농장주의 지속적인 사료관리 강화 노력이 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 농림축산검역검사기술개발사업(과제번호: B-1543081-2021-23-01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

CONFLICT OF INTEREST

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

ORCID

Hyun Sook Shin, <https://orcid.org/0000-0003-1431-4249>
 Keun-Ho Kim, <https://orcid.org/0000-0001-6126-8818>
 Jin Sung Seo, <https://orcid.org/0000-0002-3473-6994>
 Young Min Son, <https://orcid.org/0000-0002-4962-3562>
 Jiyong Park, <https://orcid.org/0000-0002-0132-6155>
 Soon Seek Yoon, <https://orcid.org/0000-0003-0908-8785>
 Byeong Yeal Jung, <https://orcid.org/0000-0003-3229-8932>

REFERENCES

- 국립농업과학원. 2020. 잡곡의 주요 곰팡이독소와 독성곰팡이 오염실태 및 붉은곰팡이의 니발레놀 생성요인 구명 연구. 농업과학기술연구보고서.
- 국립축산과학원. 2020. 2020 고온기 가축피해예방 및 축사환경관리 핵심기술.
- 농림축산식품부. 2019. 사료 등의 기준 및 규격. 농림축산식품부고시 제2019-58호.
- 농촌진흥청 국립농업과학원. 2017. 농산물 중 주요 곰팡이독소 오염실태 조사 및 발생생태 연구.
- 농촌진흥청 국립축산과학원. 2015. 가축 사료 내 곰팡이독소 발생 현황 조사 및 독소 저감기술 활용 연구. 친환경안전축산물생산기술사업 연구보고서.
- 농촌진흥청. 2017. 국내외 사료 안전관리체계 개선 연구. 친환경안전축산물생산기술사업 연구보고서.
- 대한한돈협회. 2021. 한돈협, 양돈용 배합사료 곰팡이독소 모니터링 발표. 월간한돈 1월호: 267-269.
- 한국농촌경제연구원. 2018. 최근 기상이변에 따른 국제곡물 수급 및 가격의 영향과 전망.
- 홍현진. 2013. 곰팡이독소에 대한 이해와 2012년 주요 원료의 곰팡이독소 분석현황. 한국사료협회 격월간 사료 9월10월: 54-61.
- Alshannaq A, Yu JH. 2017. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food. *Int J Environ Res Public Health* 14: 632.
- Castellari CC, Cendoya MG, Marcos Valle FJ, Barrera V, Pacin AM. 2015. Extrinsic and intrinsic factors associated with mycotoxigenic fungi populations of maize grains (*Zea mays* L.) stored in silobags in Argentina. *Rev Argent Microbiol* 47: 350-359.
- Chaytor AC, Hansen JA, van Heugten E, See MT, Kim SW. 2011. Occurrence and decontamination of mycotoxins in swine feed. *Anim Biosci* 24: 723-738.
- Chiotta ML, Fumero MV, Cendoya E, Palazzini JM, Alaniz-Zanon MS, Ramirez ML, Chulze SN. 2020. Toxicogenic fungal species and natural occurrence of mycotoxins in crops harvested in Argentina. *Rev Argent Microbiol* 52: 339-347.
- Dabrowski M, Obremski K, Gajecka M, Gajecki MT, Zielonka L. 2016. Changes in the subpopulations of porcine peripheral blood lymphocytes induced by exposure to low doses of zearalenone (ZEN) and deoxynivalenol (DON). *Molecules* 21: 557.
- Elliott CT, Connolly L, Kolawole O. 2020. Potential adverse effects on animal health and performance caused by the addition of mineral adsorbents to feeds to reduce mycotoxin exposure. *Mycotoxin Res* 36: 115-126.
- Gruber-Dorninger C, Jenkins T, Schatzmayr G. 2019. Global mycotoxin occurrence in feed: a ten-year survey. *Toxins* 11: 375.
- IARC. 2021. Agent classified by the IARC Monographs. <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc>.
- Kim DH, Kim HJ, Jang HS, Kim YM, Choi HB, Ahn JS. 2011. Simultaneous analysis and survey for contamination of nivalenol, deoxynivalenol, T-2 toxin and zearalenone in feed. *J Fd Hyg Safety* 26: 1-11.
- Moon SH, Koh SE, Oh Y, Cho HS. 2020. Exposure to low concentrations of mycotoxins triggers unique responses from the pig gut microbiome. *Korean J Vet Serv*. 43: 39-44.
- Nogueira MS, Decundo J, Martinez M, Dieguez SN, Moreyra F, Moreno MV, Stenglein SA. 2018. Natural contamination with mycotoxins produced by *Fusarium graminearum* and *Fusarium poae* in malting barley in Argentina. *Toxins* 10: 78.
- Pereyra CM, Cavaglieri LR, Chiacchiera SM, Dalcero AM. 2011. Mycobiota and mycotoxins contamination in raw materials and finished feed intended for fattening pigs production in eastern Argentina.

- Vet Res Commun 35: 367-379.
- Pleadin J, Zadavec M, Perši N, Vulic A, Jaki V, Mitak M. 2012. Mould and mycotoxin contamination of pig feed in northwest Croatia. *Mycotoxin Res* 28: 157-162.
- Shi H, Li S, Bai Y, Prates LL, Lei Y, Yu P. 2018. Mycotoxin contamination of food and feed in China: occurrence, detection techniques, toxicological effects and advances in mitigation technologies. *Food Control* 91: 202-215.
- Song YK, Jung BY, Choi JS, Moon OK, Lee SH, Chung DH, PAK SI, Park CK. 2010. Survey on aflatoxins in pig feeds in Korean pig farms. *Kor J Vet Publ Hlth*. 34: 237-243.
- Whitlow LW, Hagler WM Jr, Diaz DE. 2020. Mycotoxins in feeds. *Feedstuffs* 74-84.
- Yang CW, Song GH, Lim WS. 2020. Effects of mycotoxin-contaminated feed on farm animals. *J Hazard Mater* 389: 122087.