

DOI:10.11686/cyxb2024215

http://cyxb.magtech.com.cn

蒋鹏, 李磊, 解昊郡, 等. 净化沼液滴灌对砂壤土质量、青贮玉米生产力的影响及安全消纳容量分析. 草业学报, 2025, 34(4): 64—81.

JIANG Peng, LI Lei, XIE Hao-jun, *et al.* Effect of purified biogas slurry drip irrigation on sandy loam soil quality, silage maize productivity and analysis of safe application rate. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(4): 64—81.

净化沼液滴灌对砂壤土质量、青贮玉米生产力的影响及安全消纳容量分析

蒋鹏¹, 李磊², 解昊郡³, 徐得甲³, 王锐³, 虎强⁴, 孙权^{3*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏 银川 750002; 3. 宁夏大学农学院, 宁夏 银川 750021; 4. 宁夏防沙治沙与葡萄酒职业技术学院, 宁夏 银川 750199)

摘要:针对宁夏草畜产业“种养结合”不紧密, 种植端土壤质量下降、作物生产力不高, 而养殖端大量粪污直接施用存在环境和健康风险等问题, 采用多级过滤工艺获得净化沼液, 设置不同滴灌量(0、225、450、675、900、1125、1350 m³·hm⁻²), 以液肥形式滴灌于指示作物青贮玉米, 系统研究其对土壤质量、青贮玉米生产力的影响及开展安全消纳容量分析。结果表明, 土壤pH、全盐、速效氮、有效磷、速效钾及重金属铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)含量随着净化沼液滴灌量增加呈显著增加趋势, 而土壤有机质含量随着净化沼液滴灌量增加表现为先增加后降低趋势, 其中, 还田量为900 m³·hm⁻²时土壤有机质含量最高, 同时, 该处理显著提高了土壤水稳性大团聚体(>0.25 mm)含量、平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、微生物生物量碳(MBC)含量及酶活性, 且提高了土壤质量指数(SQI)。青贮玉米产量、干物质及淀粉含量随着净化沼液施用量增加均呈先增加后降低趋势, 线性回归方程模拟得出净化沼液还田量为805.56~925.00 m³·hm⁻²可更好地促进青贮玉米产量与品质提升。此外, 青贮玉米中Cu、Zn、Pb、Cd、Cr含量随着净化沼液施用量增加呈增加趋势, 但远远低于饲料卫生限量值。净化沼液滴灌量900 m³·hm⁻²下SQI及青贮玉米生产力最高, 以此滴灌量为计算依据, 按照重金属Cd元素“木桶效应”则可计算出土壤环境消纳容量为连续滴灌25年可维持土壤重金属含量不超标, 而按照全国第二次土壤普查宁夏土壤盐渍化划分标准可计算出连续滴灌19年可能不会发生土壤次生盐渍化。

关键词:净化沼液; 青贮玉米; 产量; 土壤质量指数; 重金属

Effect of purified biogas slurry drip irrigation on sandy loam soil quality, silage maize productivity and analysis of safe application rate

JIANG Peng¹, LI Lei², XIE Hao-jun³, XU De-jia³, WANG Rui³, HU Qiang⁴, SUN Quan^{3*}

1. School of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 3. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 4. Ningxia Technical College of Wine and Desertification Prevention, Yinchuan 750199, China

Abstract: Ningxia's forage and livestock industries currently face multiple issues; forage plant breeding and production is below requirement, the soil quality in the forage production areas is declining, the yields are modest, and the application of a large amounts of manure as fertilizer has both environmental and health risks. In this study, a

收稿日期: 2024-02-06; 改回日期: 2024-07-25

基金项目: 奶牛粪污生物强化处理与分类再利用创新模式研究与示范(2022BEG02004)资助。

作者简介: 蒋鹏(1992—), 女, 山东泰安人, 在读博士。E-mail: Jiangpeng3867@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: sqnxu@sina.com

multi-stage filtration process was used to obtain purified biogas slurry, and an experiment was set up to apply the slurry at different rates (0, 225, 450, 675, 900, 1125, 1350 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) by drip irrigation. The purified slurry liquid fertilizer was applied to a silage maize crop, and its effects on soil quality and silage maize yield were systematically studied to determine the safe application rate. The results showed that soil pH, the contents of total salt, available nitrogen, available phosphorus, available potassium and heavy metals including copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd) and chromium (Cr) increased significantly with increased biogas slurry application rate, while the content of soil organic matter initially increased and then decreased with increased application rate. Soil organic matter level was highest under the 900 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ treatment. This treatment also significantly increased the content of soil water-stable macroaggregates (>0.25 mm), mean weight diameter, geometric mean diameter, microbial biomass carbon content, enzyme activity and quality index. The yield, dry matter content and starch content of silage maize increased initially and then decreased with successive increases in the application rate of purified biogas slurry. A linear regression equation showed that a purified slurry application rate of 806—925 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ best promoted the yield and quality of silage maize. In addition, the contents of Cu, Zn, Pb, Cd and Cr in silage maize showed an increasing trend with increase in the application rate of purified biogas slurry. However, heavy metal levels observed were far lower than the permissible limits in animal feed. Based on this study, it was concluded that the soil quality index and silage maize productivity were the highest under the slurry application rate of 900 $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$. Based on this drip application rate, and the permissible levels of the heavy metal element, Cd, the soil environmental absorption capacity can be calculated. After continuous drip irrigation for 25 years, the soil heavy metal content would not exceed the standard. Furthermore, based on the second national soil census Ningxia soil salinization division standard, it can be calculated that continuous drip irrigation for 19 years would not result in soil secondary salinization.

Key words: purified biogas slurry; silage maize; yield; soil quality index; heavy metal

随着我国农业结构转型,畜牧业逐渐成为农业发展的重点,宁夏回族自治区地处西北内陆,干旱少雨,光热资源丰富,昼夜温差大,利于农作物光合产物的累积,品质优良,具备天然的养殖优势,目前,基本形成具有鲜明区域特点和优势资源配置的产业带。高质量畜禽养殖业产生的沼液资源富含氮、磷、钾等营养元素,同时含有促进作物生长的氨基酸及多种酶物质,无害化利用沼液,可为农业种养循环、绿色生产起到积极推动作用^[1-2]。在众多利用方式中,清洁能源和肥料化仍是主要的资源化利用方式^[3-4],沼液作为沼气工程厌氧条件下制取的液体,将其科学还田不仅可实现废弃物资源化利用,同时,可提高作物营养生长,减少农业用水量,尤其在黄河引水量缩减的背景下,节水对于生态安全尤为重要。

研究表明,沼液中自身所含有的有机分子极性基团与硅酸盐黏土矿物表面所吸附的水分子或氧分子之间形成的氢键,有助于提高土壤团聚体的稳定性^[5-7];沼液灌施后土壤结构会在 3 个月内发生显著变化,但这种改良效果只是短期的,要维持沼液对土壤结构的改善作用,需要进行长期连续的沼液灌施^[8]。也有研究表明,沼气原料发酵后,仍有高达 90% 的营养成分保留在沼液中,因此,沼液可以作为有机肥施入土壤,有助于培肥地力^[9-10]。唐存柳等^[11]、郑健等^[12]、蔡茂等^[13]研究表明,沼液可以显著增加土壤氮素与有机质含量,而过量的沼液灌溉会引起土壤碳、氮、磷等元素比例失调,土壤微生物将过度消耗氮素,造成土壤缺乏速效氮。同时,沼液施用也会对重金属迁移产生较大影响,沼液中铅(Pb)、铜(Cu)、铬(Cr)、镉(Cd)和锌(Zn)等重金属元素会促进土壤—作物系统中对应重金属的累积^[14]。此外,沼液也会对作物产量与品质产生重要影响,万海文^[15]利用沼液在小麦(*Triticum aestivum*)田追施 2.25~3.38 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 可显著增加产量;刘庆平^[16]研究表明,沼液施加氮用量超过 175 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 则可能会抑制玉米(*Zea mays*)生长,降低产量,且 Cu 和 Zn 含量增加显著,有土壤污染超标风险;曹易繁^[17]研究表明,当施用量达到 45 $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 时,青贮玉米的产量与品质得到双提升,其中,淀粉含量比对照处理显著提高了

43.63%。很显然,上述研究结果、施用量的不一致,源于沼液来源差异、是否过滤净化等。

然而,在生产中,沼液由于其高化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、高盐、高重金属等属性,将其肥料化还田存在生态污染风险,为此,本研究在团队前期实践基础上,采用多级过滤工艺获得净化沼液。目前,大量的沼液研究集中于南方红壤土水稻(*Oryza sativa*)、林木及蔬菜,而缺乏北方砂壤土及牧草种植的研究。基于此,本研究设置净化沼液不同滴灌量,以饲草青贮玉米为指示对象,系统研究净化沼液不同滴灌量对砂壤土质量及青贮玉米生产力的影响,探讨净化沼液滴灌量及土壤质量指数与青贮玉米产量的关系,阐明土壤—青贮玉米系统重金属变化,以期为宁夏砂壤土质量提升及高产高质牧草种植提出科学消纳容量及还田年限。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

于2021—2022年在宁夏银川西夏区农垦平吉堡生态庄园有限公司(106.012° E, 38.245° N)开展短期沼液安全还田定位试验,该区域平均海拔1170 m,地貌属宁夏北部贺兰山洪积倾斜平原、黄河冲积平原。研究区属暖温带干旱气候,常年干旱少雨多风,近3年来,该地区年均降水量190.62 mm,年均气温9.04℃(图1),蒸发量接近2000 mm,日照充足,平均日照时数为3009 h,平均霜冻期为195 d,无霜期为171 d。

试验地剖面土壤质地为砂质壤土和粉砂质壤土,成土母质为冲积物及灌溉淤积物。2021年取样测定基础土壤样品背景值,采用激光粒度仪(NKT6100-B,中国山东)并结合土壤机械组成国际制标准分析表明,0~20 cm土层砂粒含量超过50%,土壤质地为砂质壤土,而20~60 cm土层土壤粉粒含量超过45%,通体质地为粉砂质壤土;土壤容重表现为随着土壤深度增加而降低,0~20 cm土层因砂粒含量高导致容重较大,田间持水量表现为随着土壤深度增加而提升,土壤结构整体反映出保肥保水性能差(表1)。

表1 土壤基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil

深度 Depth (cm)	机械组成 Mechanical composition (%)			土壤质地 Soil texture	容重 BD (g·cm ⁻³)	田间持水量 FC (%)
	砂粒 Sand (0.02~2 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.02 mm)	黏粒 Clay (<0.002 mm)			
0~20	55.54±3.72a	32.23±0.49b	12.23±0.47a	砂质壤土 Sandy loam	1.42±0.04a	16.54±0.50a
20~40	37.14±1.08b	48.65±3.83a	14.21±0.10a	粉砂质壤土 Silty loam	1.39±0.03a	17.89±0.63a
40~60	37.12±1.64b	49.65±1.50a	13.23±0.35a	粉砂质壤土 Silty loam	1.41±0.07a	18.03±0.27a

BD: 容重 Bulk density; FC: 田间持水量 Field capacity. 同列不同小写字母表示不同土层间差异显著($P<0.05$),下同。The different lowercase letters in the same column indicates that there are significant differences among soil layers ($P<0.05$), the same below.

土壤pH值为8.29~8.53,处于碱性、强碱性过渡水平;参照中国土壤第二次普查分级,养分库容结果显示有机质、速效氮含量处于4~5级较低水平,有效磷处于3级中等水平,速效钾处于2级丰富水平(表2),土壤重金属Cu、Zn、Pb、Cr、Cd含量均低于国家标准农田限量值^[18](表3)。

1.2 试验材料

1.2.1 供试沼液 沼液原料来自宁夏农垦集团平吉堡奶牛六厂氧化塘沼液池,因沼液原料存在高电导率(7.37 ms·cm⁻¹)、高化学需氧量(3860.00 mg·L⁻¹)及高氨氮(1013.50 mg·L⁻¹)风险,因此,原材料收集后开展沼液净化,具体净化流程见图2。通过脱稳(氧化塘添加0.005 mol·L⁻¹ FeCl₃·6H₂O,搅拌后用漏勺舀出上部悬浮物

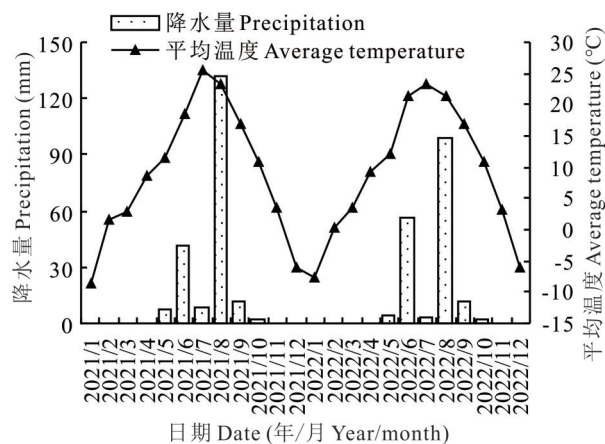


图1 试验区降水量与平均温度变化

Fig. 1 Changes of precipitation and average temperature in the test area

表 2 土壤基本化学性质

Table 2 Basic chemical properties of soil

深度 Depth (cm)	pH	全盐 Total salt ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效氮 Available nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Available phosphorus ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available potassium ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
0~20	8.29±0.05a	0.23±0.01a	15.26±0.15a	47.78±1.42a	22.43±0.69a	188.62±6.65a
20~40	8.48±0.08a	0.25±0.02a	10.62±0.36b	35.15±0.90b	7.97±0.38b	124.39±7.61b
40~60	8.53±0.09a	0.27±0.01a	8.27±0.18c	30.76±0.52c	6.54±0.15b	113.54±6.18b

表 3 土壤重金属含量

Table 3 Heavy metal content of soil ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

深度 Depth (cm)	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr
0~20	15.69±2.47a	0.44±0.06a	13.69±0.87a	0.39±0.05a	24.26±1.20a
20~40	7.45±0.12b	0.25±0.04b	5.54±0.55b	0.30±0.03a	18.48±2.39a
40~60	1.96±0.35c	0.18±0.35b	4.01±0.30b	0.28±0.05a	21.03±0.82a
国标限量值 National standard limit	190.00	300.00	170.00	0.60	200.00

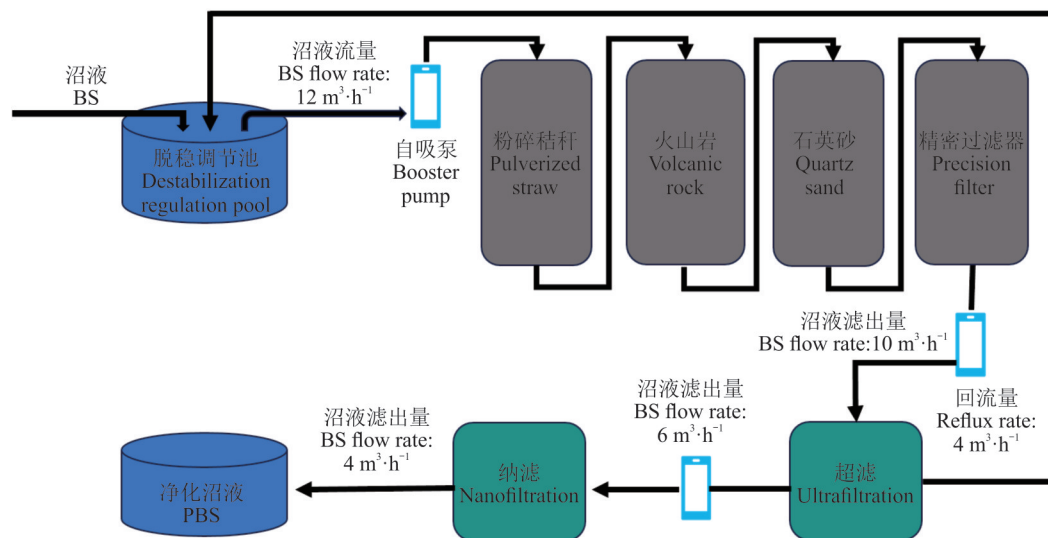


图 2 沼液多级净化工艺流程

Fig. 2 Multi-stage purification process of biogas slurry

BS: 沼液 Biogas slurry; PBS: 净化沼液 Purified biogas slurry.

弃去)、粗滤(沼液通过多层不同材质的滤料,滤料分别为玉米秸秆、火山岩、石英砂)、精密过滤(采用陶瓷微滤膜,膜孔径为 500 nm)、超滤(采用陶瓷微滤膜,膜孔径为 300 nm)、纳滤(采用聚磺酰胺滤膜,膜孔径为 10 nm)多级过滤所得沼液外观呈褐棕色,气味无恶臭,化学需氧量、氨态氮及固形物去除率分别为 93.63%、97.89%、99.82%,电导率去除率为 86.02%(表 4)。此外,净化沼液重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 含量分别相比原液降低了 55.73%、54.00%、43.84%、50.00%、46.56%(表 5),均低于农田标准限量值^[19]。

1.2.2 供试品种 青贮玉米品种选用当地主推品种“登海青贮 3571”,采购于市场。

1.3 试验设计

本研究立足净化沼液最大消纳量的问题为导向,基于水资源节约利用原则,围绕青贮玉米品质提升为目标,开展净化沼液不同梯度滴灌量研究,净化沼液滴灌量依据其全氮含量($0.40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)设计不同梯度,生育期灌溉量以常规灌溉定额 $3900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 为依据,净化沼液滴灌量条件下,生育期灌溉定额相应减少。采用单因素多水平随

表4 沼液基本化学性质

Table 4 Basic chemical properties of biogas slurry

材料 Material	化学需氧量 COD (mg·L ⁻¹)	氨态氮 NH ₃ -N (mg·L ⁻¹)	固形物 Solid (mg·L ⁻¹)	pH	电导率 EC (ms·cm ⁻¹)	全氮 TN (g·L ⁻¹)	全磷 AP (g·L ⁻¹)	全钾 AK (g·L ⁻¹)
沼液原液 BS	3860.00±231.26	1013.50±64.34	20420.00±740.35	8.03±0.04	7.37±0.21	1.23±0.09	0.15±0.04	0.08±0.03
净化沼液 PBS	246.00±19.14	21.34±0.55	35.74±0.92	7.65±0.11	1.03±0.05	0.40±0.17	0.13±0.01	0.05±0.01

COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand; NH₃-N: 氨态氮 Ammonia nitrogen; EC 电导率 Electric conductivity; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium.

表5 沼液重金属含量

Table 5 Heavy metal content of biogas slurry (mg·L⁻¹)

材料 Material	Cu	Zn	Cr	Cd	Pb
沼液原液 BS	34.56±1.23	24.33±6.64	1.46±0.09	0.06±0.00	4.66±0.06
净化沼液 PBS	15.30±0.97	11.19±0.11	0.82±0.03	0.03±0.01	2.49±0.15
国家限量标准 National limit standard	—	—	50.00	3.00	50.00

机机组试验设计,试验设置7个处理,分别为:1)不施肥处理,全生育期滴水12次,灌溉定额为3900 m³·hm⁻²;2)沼液225 m³·hm⁻²,分别于2叶一心、6、9、12、15、18、21叶和灌浆中期分8次施用;滴水12次,但减水225 m³·hm⁻²;3)沼液450 m³·hm⁻²,同上分8次施用;滴水12次,但减水450 m³·hm⁻²;4)沼液675 m³·hm⁻²,同上分8次施用;滴水12次,但减水675 m³·hm⁻²;5)沼液900 m³·hm⁻²,同上分8次施用;滴水12次,但减水900 m³·hm⁻²;6)沼液1125 m³·hm⁻²,同上分8次施用;滴水12次,但减水1125 m³·hm⁻²;7)沼液1350 m³·hm⁻²,同上分8次施用;滴水12次,但减水1350 m³·hm⁻²。具体试验方案参见表6。每个处理小区60 m²(10 m×6 m),3次重复,

共计21个小区。小区净面积为43.2 m²。采用机械精量点播,宽窄行、南北行向种植,宽行70 cm,窄行40 cm,株距20 cm;栽培密度约为90900株·hm⁻²。小区与保护行间设1 m走道,铺设支管道的走道2 m,各小区为独立的滴灌单元,每两行铺设一根滴灌带,滴灌带铺设在窄行内,试验区四周种植2~4行保护行。

1.4 样品采集与指标测定

1.4.1 试验样品采集 2021年4月初采集基础土壤样品,在试验区东、南、西、北、中方位分别采集0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm土壤样品,同一层次混匀后装入自封袋保存,带回实验室用于土壤机械组成与土壤化学性质测定;采用环刀法采集不同土壤层次剖面样品,用于土壤容重与田间持水量分析。此外,分别于2021与2022年9月中旬收获前,在每个小区采用“五点法”采集0~20 cm土壤样品,去除枯枝落叶等杂质混匀后装入自封袋,低温带回实验室用于土壤化学性质、酶活性、微生物生物量碳、微生物生物量氮及重金属(铜、锌、铅、镉、铬)含量测定;然后每个小区挖开0~20 cm土壤剖面,选用竹刀沿剖面自上而下竖切厚度约为5 cm土壤,去除动植物残体和砂石等可见物,剥去接触面变形的土壤,装入塑料方盒中带回实验室用于土壤团聚体测定。

分别于2021与2022年9月中旬收获前,在每个小区采集种植前标记的青贮玉米3株,然后按照不同部位(根、茎、叶、穗)分解带回实验室,然后切段(<2 cm)后置于烘箱105℃杀青30 min后调温60℃烘干6~8 h至恒重,采

表6 试验设计方案

Table 6 Experimental design scheme

处理 Treatment	实施措施 Implementation measures			滴水次数 Water drip times	滴沼液次数 Biogas slurry drip times
	净化沼液 PBS (m ³ ·hm ⁻²)	净化沼液含 氮量 PBS-N (kg·hm ⁻²)	水 Water (m ³ ·hm ⁻²)		
S ₀	0	0	3900	12	0
S ₁	225	90	3675	12	8
S ₂	450	180	3450	12	8
S ₃	675	270	3225	12	8
S ₄	900	360	3000	12	8
S ₅	1125	450	2775	12	8
S ₆	1350	540	2550	12	8

用称重法称取干物质重量后待测。

1.4.2 指标测定及方法 土壤 pH 按照水土比 5:1 振荡混匀静置后采用 pH 计 (pHS-3E, 上海雷磁) 测定^[20]; 按照水土比 2.5:1 振荡混匀直接采用电导率仪 (DDS-11A, 上海雷磁) 测定土壤电导率, 采用全盐含量与电导率线性关系公式 $y=3.0023x+0.1456$ 计算全盐含量, 式中: y 表示全盐含量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); x 表示电导率 ($\text{ms}\cdot\text{cm}^{-1}$)^[21]; 采用重铬酸钾-浓硫酸加热法测定有机碳含量^[20]; 采用碱解扩散法测定速效氮含量^[20]; 采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定有效磷含量^[20]; 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸铵溶液浸提-火焰光度计法测定速效钾含量^[20]; 采用湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量^[20]; 采用磷酸苯二钠比色法测定碱性磷酸酶活性^[22]; 采用靛酚蓝比色法测定脲酶活性^[22]; 采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活性^[22]; 采用高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶活性^[22]; 采用氯仿熏蒸硫酸钾浸提-重铬酸钾容量法测定微生物生物量碳含量^[23]; 采用氯仿熏蒸硫酸钾浸提-凯氏定氮法测定微生物生物量氮含量^[23]; 采用美国 ICP-MS (安捷伦 7800, 美国) 测定重金属铜、锌、铅、镉、铬元素含量, 外标法测试, MS 检出限 1 ppm。

青贮玉米收获期, 每个小区实收统计产量, 然后换算每 hm^2 产量; 将称重后的玉米植株干物质粉碎后过 0.25 mm 筛用于淀粉及重金属含量测定。其中, 采用蒽酮硫酸法测定淀粉含量^[22]; 植株不同部位重金属铜、锌、铅、镉、铬元素测定方法同土壤重金属测定方法, 结合不同部位干物质质量权重, 采用加权平均法计算得出整株重金属平均含量。

1.5 计算公式

1.5.1 土壤平均质量直径 (mean weight diameter, MWD) 与几何平均直径 (geometric mean diameter, GMD)

$$R_{0.25} = M_{0.25} / M_T \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (3)$$

式中: $M_{0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体质量; M_T 为筛分前称取的土样总质量 (g); $R_{0.25}$ 为 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体含量 (%); \bar{x}_i 为 i 粒级团聚体平均直径 (mm); W_i 为 i 粒级团聚体的质量分数 (%); $\ln \bar{x}_i$ 为 i 粒径团聚体平均直径的自然对数 (mm)。

1.5.2 土壤微生物生物量碳 (microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮 (microbial biomass nitrogen, MBN)

$$B_C = E_C / K_{EC} \quad (4)$$

$$B_N = E_N / K_{EN} \quad (5)$$

式中: B_C 表示土壤 MBC; E_C 为熏蒸与未熏蒸土壤浸提液有机碳的差值; K_{EC} 为转换系数, 取值为 0.45; B_N 表示土壤 MBN; E_N 为熏蒸与未熏蒸土壤浸提液全氮的差值; K_{EN} 为转换系数, 取值为 0.54。

1.5.3 土壤质量指数 采用全数据集方法计算耕层 (0~20 cm) 土壤质量指数 (soil quality index, SQI)^[24], 先对本研究检测的 15 个土壤指标进行主成分分析, 提取各项指标公因子方差, 计算指标公因子方差与公因子方差之和的比值, 即可得到各项指标权重值。然后, 用下式计算土壤质量指数, SQI 数值越高, 表明土壤质量越好。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i S_i \quad (6)$$

式中: SQI 为土壤质量指数; W_i 为第 i 项指标权重值; S_i 为第 i 项指标得分; n 为各数据集指标数量, 本研究中 $n=15$ 。

1.5.4 土壤生态风险评估 生态风险指数 (ecological risk index, ERI) 用于分析土壤重金属的污染程度和评估潜在的生态风险^[25], 污染程度等级划分参见表 7, 其计算公式为:

$$ERI = \sum B_i / C_i \times T_i \quad (7)$$

式中: B_i 为重金属 i 的实测含量; C_i 为重金属 i 的宁夏土壤环境质量标准限制; T_i 为毒性反应因子, 参考徐争启等^[26]的计算结果, Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 五种元素的毒性系数分别为 5、1、5、30 和 2。

1.5.5 净化沼液消纳容量

$$Q_i = \frac{a_{pi} + (\omega_{si} - \omega_{bi}) \times 1.42 \times 0.2 \times 10^4}{\rho_{si}}$$

式中: Q_i 为以 i 元素为限量指标的土壤耕层 0~20 cm 净化沼液消纳容量 ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$); ω_{si} 为土壤中 i 元素的限量标准值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); ω_{bi} 为土壤中 i 元素的背景值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ_{si} 为净化沼液中 i 元素含量的平均值 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); a_{pi} 为通过收获植物而输出的 i 元素含量 ($\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$); 1.42 为土壤的容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); 0.2 为土壤耕层深度 (m)^[25]。

1.6 数据处理

采用 Excel 2003 软件整理试验数据, 采用 SPSS 25.0 方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 比较不同年限、不同处理间差异 ($P < 0.05$, $n = 3, 5$); 采用 Origin 2021 作图, 采用 SPSS 25.0 进行数据标准化、降维。

2 结果与分析

2.1 净化沼液滴灌对土壤物理性质的影响

土壤不同粒径水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量下均存在显著差异 ($P < 0.05$), 年际间无显著差异 ($P > 0.05$)。2021 年: > 2 mm 粒径水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量处理间无显著差异 ($P > 0.05$); 1~2 mm 粒径水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量下存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中, S_6 处理增加了该粒径水稳性团聚体含量; 0.25~1 mm 粒径水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量下存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中, S_4 处理下含量最高, 其次为 S_3 处理, 二者处理下水稳性团聚体含量显著高于其他处理; < 0.25 mm 水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量下也存在显著性差异 ($P < 0.05$), 其中, S_4 处理相比 S_0 处理显著降低了该粒径水稳性团聚体含量, 降幅为 7.01%。2022 年: > 2 mm 粒径水稳性团聚体含量在净化沼液不同滴灌量处理间无显著差异 ($P > 0.05$); 0.25~1 mm 粒径水稳性团聚体含量随着净化沼液滴灌量增加表现为先增加后降低趋势, 其中, S_4 处理下该粒径水稳性团聚体含量最高, 但该处理却降低了 1~2 mm 粒径水稳性团聚体含量, 同时, 该处理相比其他处理也显著降低了 < 0.25 mm 水稳性团聚体含量 (图 3)。

土壤水稳性团聚体平均质量直径 (MWD) 随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势, 各处理间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。2021 与 2022 年均属 S_4 处理下土壤 MWD 最高, 且该处理下 2022 年相比 2021 年增加了

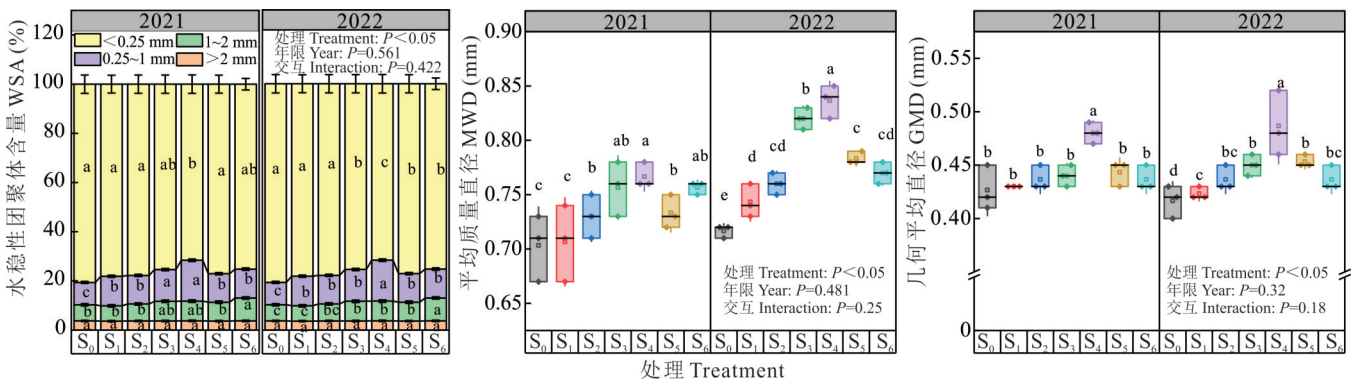


图3 净化沼液滴灌对土壤物理性质的影响

Fig.3 Effect of PBS drip irrigation on soil physical properties

不同小写字母表示不同施肥处理下差异显著 ($P < 0.05$), 下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different fertilization treatments ($P < 0.05$), the same below. WSA: 水稳性团聚体 Water-stable aggregate; MWD: 平均质量直径 Mean weight diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter.

表7 污染指数与污染程度等级划分

Table 7 Pollution index and classification

等级 Grade	潜在生态危害指数 Ecological risk index
清洁 Cleanly	< 100
轻微 Slight	100~150
中等 Moderate	150~300
重度 Severely	300~600
极重 Extremely	> 600

9.09%；土壤水稳性团聚体几何平均直径(GMD)随着净化沼液滴灌量增加也呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$), S_4 处理下 GMD 均达到最大,且该处理下 2022 年相比 2021 年增加了 2.08%。

2.2 净化沼液滴灌对土壤化学性质的影响

土壤化学性质在不同沼液滴灌量处理下也存在显著性差异($P<0.05$,图 4)。其中,土壤 pH 随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$);土壤全盐含量随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后趋于平稳变化规律,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$),但年间差异性不显著($P>0.05$);土壤速效氮含量随着净化沼液滴灌量增加呈逐步增加趋势,2022 年 S_6 处理下土壤速效氮含量达到最大,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 处理分别增加了 33.03%、10.50%、29.49%、33.10%、6.53%;土壤有效磷含量也属 S_6 处理下最大,2022 年 S_6 处理相比于 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 处理分别增加了 46.49%、23.86%、37.48%、45.69%、43.48%、23.66%。此外,年间有效磷含量也存在显著性差异($P<0.05$),2022 年 S_6 处理相比 2021 年增加了 20.79%;土壤速效钾含量在各处理间存在显著性差异($P<0.05$),2021 年属 S_4 处理下含量最高,相比于 S_0 处理增加了 10.03%,2022 年属 S_2 处理下含量最大,相比于 S_0 、 S_3 、 S_4 处理分别增加 16.42%、10.42%、5.33%;土壤有机质含量随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$)。2021 年 S_5 处理下土壤有机质含量达最高,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_6 处理分别增加了 12.32%、10.91%、8.14%、3.86%、12.69%。2022 年 S_4 处理下土壤有机质含量达最高,相比 S_0 、 S_1 、 S_5 、 S_6 处理分别增加 13.94%、9.84%、9.15%、11.99%,另外,2022 年 S_4 处理下土壤有机质含量相比 2021 年增加了 7.04%。

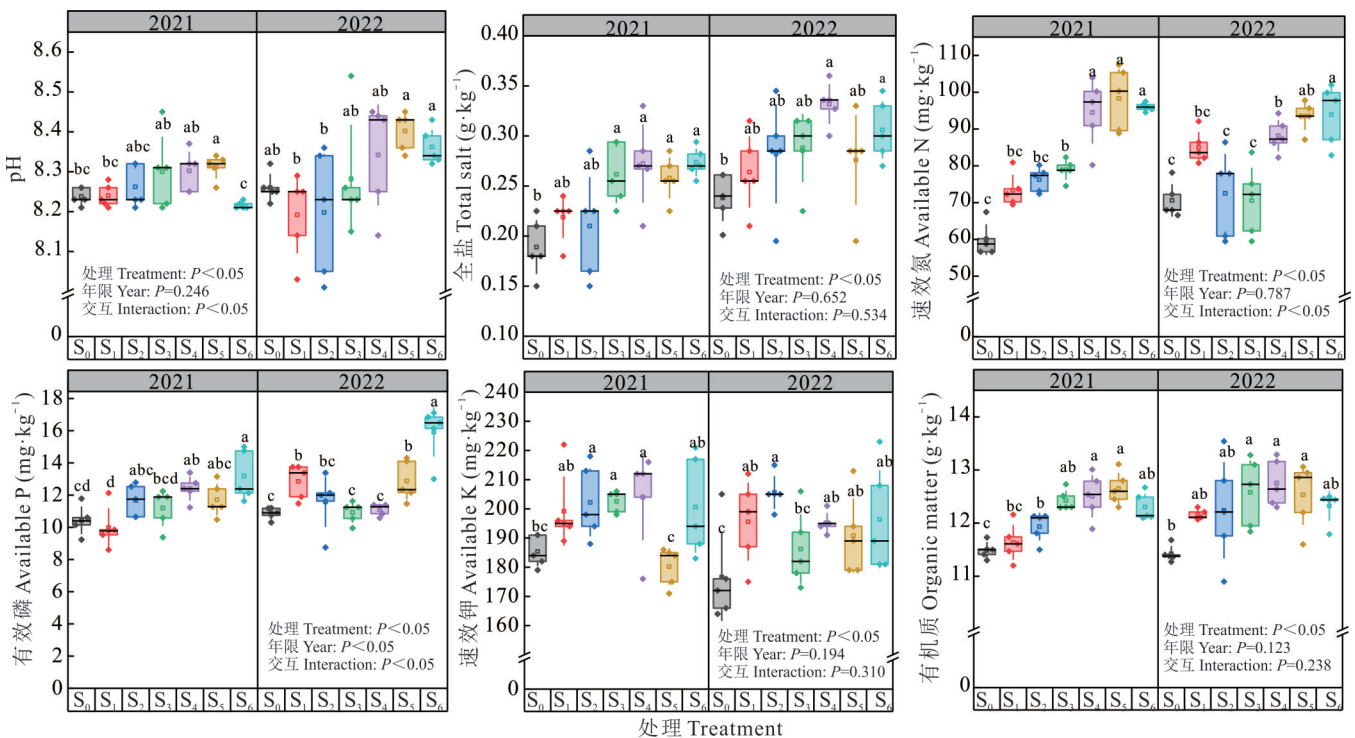


图 4 净化沼液滴灌对土壤化学性质的影响

Fig.4 Effect of PBS drip irrigation on soil chemical properties

2.3 净化沼液滴灌对土壤生物学性质的影响

土壤微生物生物量碳(microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮(microbial biomass nitrogen, MBN)含量年间差异性不显著($P>0.05$,图 5)。2022 年随着净化沼液滴灌量增加, MBC、MBN 含量呈增加趋势,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$); S_4 处理下土壤 MBC 含量达到最高,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 处理分别增加了 49.74%、34.37%、14.25%、17.46%; S_6 处理下土壤 MBN 含量达到最大,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 处理分别增加了

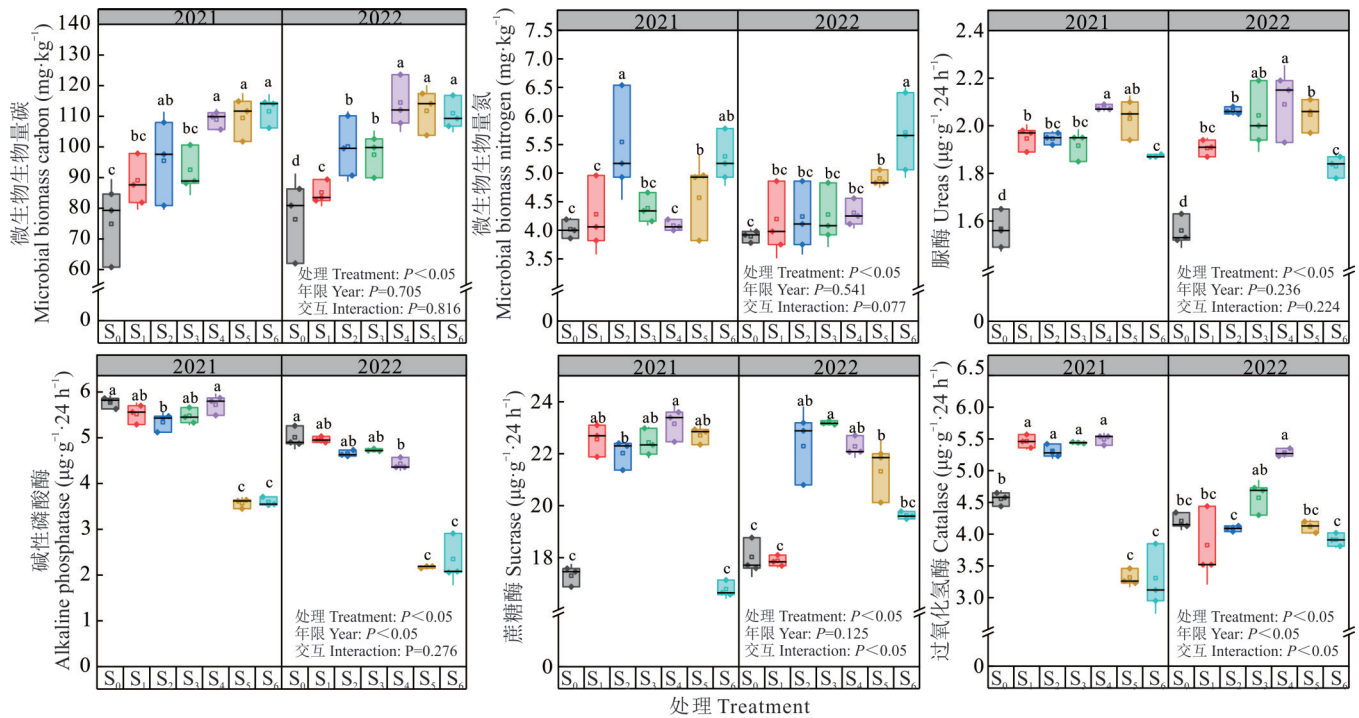


图5 净化沼液滴灌对土壤生物学性质的影响

Fig.5 Effects of PBS drip irrigation on soil biological properties

46.79%、35.95%、34.67%、33.41%、32.48%、16.29%。土壤脲酶活性随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$),年际间差异不显著($P > 0.05$)。土壤碱性磷酸酶活性在年际间存在显著性差异($P < 0.05$),2022年随着净化沼液滴灌量增加表现为逐渐降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$),其中 S_0 处理达到最大, S_4 、 S_5 、 S_6 相比 S_0 分别降低11.58%、56.49%、53.09%。土壤蔗糖酶活性随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$)。土壤过氧化氢酶活性随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$),2021年 S_4 处理达到最大,相比 S_0 、 S_5 、 S_6 处理分别增加20.39%、65.36%、65.86%,2022年 S_4 处理达到最大,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_5 、 S_6 处理分别增加25.41%、37.86%、29.10%、28.09%、35.04%,2022年 S_4 处理相比2021年降低了3.83%,且年际间存在显著性差异($P < 0.05$)。

2.4 净化沼液滴灌对土壤重金属含量的影响

净化沼液滴灌下土壤重金属含量也发生显著性变化($P < 0.05$,图6)。其中,土壤重金属铜随着净化沼液滴灌量增加呈逐步增加趋势,各处理间都存在显著性差异($P < 0.05$); S_6 处理下的土壤重金属含量达到最高,重金属铜、锌、铅、铬含量在年际间无显著差异($P > 0.05$)。土壤生态风险指数综合评价表明,随着净化沼液滴灌量增加,ERI值呈逐步增加趋势,各处理下土壤生态风险指数均存在显著性差异($P < 0.05$)。2021年 S_6 处理下ERI达到最大,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 处理分别显著增加41.12%、36.48%、28.23%、24.44%、17.98%、11.24%;2022年也属 S_6 处理下ERI达到最大,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 处理分别显著增加48.53%、40.47%、32.43%、25.72%;2022年 S_6 处理相比2021年增加9.15%。由此可见,净化沼液滴灌仍存在重金属污染土壤风险,且随着滴灌增加表现为增加趋势。

2.5 净化沼液滴灌对青贮玉米生产力的影响

2.5.1 对青贮玉米生产力的影响 青贮玉米产量随着净化沼液滴灌量增加呈先增加后降低趋势(图7),各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$),2021年 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 处理间无显著性差异($P > 0.05$),其中 S_5 处理下产量最高,达到50004.99 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,相比 S_0 、 S_1 、 S_2 分别显著增加87.52%、42.13%、24.27%。青贮玉米适时收获标准为干物质含量与淀粉含量达到双“30%”,本研究中,随着净化沼液滴灌量增加干物质含量及淀粉含量均呈先增加

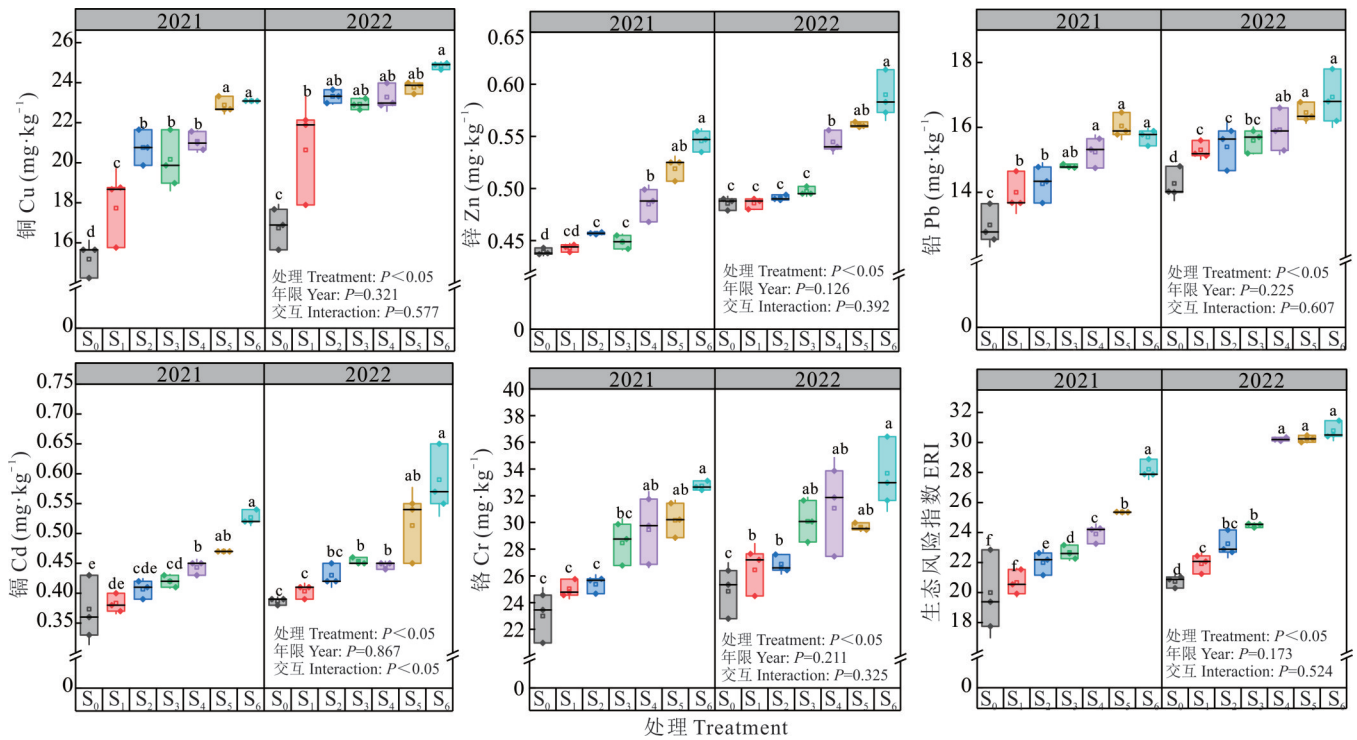


图 6 净化沼液滴灌对土壤重金属含量的影响

Fig.6 Analysis of PBS drip irrigation on soil heavy metal content

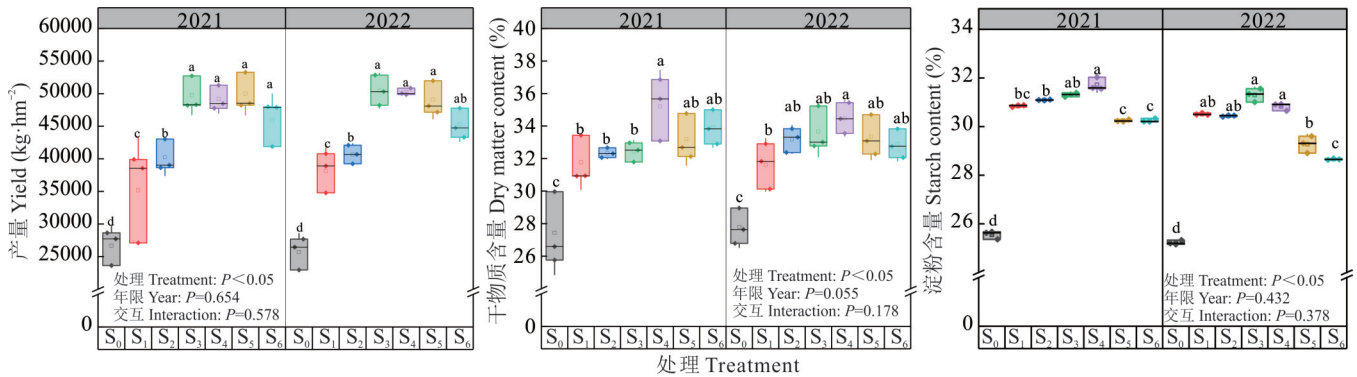


图 7 净化沼液滴灌对青贮玉米生产力的影响

Fig.7 Effects of PBS drip irrigation on the productivity of silage maize

后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P < 0.05$),干物质含量在 S₄ 处理下达到最大,2021 与 2022 年分别达到 35.12%、34.78%,而 S₀ 处理下干物质含量分别为 27.52%、27.64%,分别显著提升了 7.60%、7.14%;淀粉含量在 2021 年 S₄ 处理下最高,达到 31.87%,而 2022 年 S₃ 处理下含量最高,为 31.64%。

2.5.2 净化沼液滴灌量与青贮玉米产量与品质关系分析 通过建立净化沼液滴灌量与青贮玉米产量与品质一元二次函数方程(图 8),各处理间均存在极显著性差异($P < 0.01$)。根据 $dy/dx=0$,求得青贮玉米产量达到最大条件下 2021 与 2022 年净化沼液滴灌量分别为 932.12、910.05 $m^3 \cdot hm^{-2}$,青贮玉米干物质含量达到最大条件下 2021 与 2022 年净化沼液滴灌量分别为 925.00、886.00 $m^3 \cdot hm^{-2}$,青贮玉米淀粉含量达到最大条件下 2021 与 2022 年净化沼液滴灌量分别为 805.56、862.50 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 。由此可见,净化沼液滴灌量为 805.56~925.00 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 时可更好地促进青贮玉米产量提升与品质改善。

2.6 净化沼液滴灌对青贮玉米重金属含量的影响

净化沼液滴灌处理下青贮玉米重金属元素含量均在各处理间存在显著性差异($P < 0.05$),其中 S₆ 处理下重

金属铜、锌、铅、镉、铬元素含量达到最大值,其中,铜、锌元素含量相比 S_0 处理分别增加60.60%、73.81%,而铅、镉、铬元素含量相比 S_0 处理分别增加1.56、2.17、1.83倍,由此可见,青贮玉米重金属元素含量随着净化沼液施用量增加呈显著增加趋势,但远远低于饲料卫生限量值^[27](表8)。

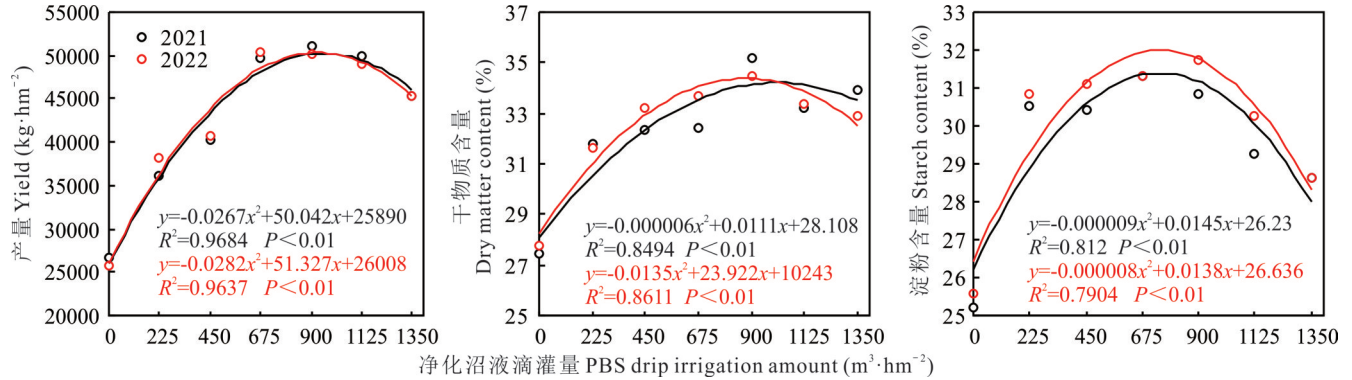


图8 净化沼液滴灌量与青贮玉米产量与品质关系分析

Fig.8 Analysis of the relationship between PBS drip irrigation amount and the yield, quality of silage maize

表8 净化沼液滴灌对青贮玉米重金属含量的影响(2022)

Table 8 Effects of PBS drip irrigation on the heavy metal content of silage maize (2022)

处理 Treatment	Cu (mg·kg ⁻¹)	Zn (mg·kg ⁻¹)	Pb (μg·kg ⁻¹)	Cd (μg·kg ⁻¹)	Cr (μg·kg ⁻¹)
S_0	1.32±0.01e	0.42±0.01d	28.78±1.21d	20.53±0.23b	2.12±0.23c
S_1	1.37±0.07e	0.44±0.01d	30.09±0.65d	21.73±0.67b	2.42±0.33c
S_2	1.52±0.03d	0.47±0.03d	35.12±0.21cd	29.09±3.01b	3.82±3.39b
S_3	1.66±0.06c	0.56±0.01c	35.15±0.43bc	26.41±2.86b	3.76±0.67b
S_4	1.69±0.03c	0.65±0.03b	40.18±2.32ab	26.40±2.86b	3.54±0.88b
S_5	1.91±0.04b	0.73±0.03a	41.21±1.32a	40.79±6.69a	4.13±0.67a
S_6	2.12±0.03a	0.73±0.04a	45.01±5.79a	44.47±0.67a	6.47±0.88a
饲料限量值 Feed limit value (mg·kg ⁻¹)	—	—	30.00	1.00	5.00

注:不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$),—表示未明确。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$). — indicate not clear.

2.7 净化沼液滴灌下土壤质量指数及其与青贮玉米产量关系分析

为综合评价不同净化沼液滴灌量对土壤质量的影响,采用全数据集方法分别对土壤物理指标:平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD);化学性质:pH、全盐(total salt, TS)、有机质(organic matter, OM)、速效氮(available nitrogen, AN)、有效磷(available phosphorus, AP)、速效钾(available potassium, AK);生物学指标:脲酶(urease, URE)、碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, ALP)、蔗糖酶(sucrose, SUC)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)及重金属生态风险指数(ERI)共计15个指标进行0~1无量纲标准化,并以特征值 ≥ 1 ,累计解释率 $\geq 90\%$ 为提取原则求得各指标公因子方差,进而计算各指标权重(表9)。

2021年不同处理下土壤指标得分雷达图表明,15个指标中, S_4 处理下AN、SUC、ALP、MBC、MBN、GMD指标得分相比其他处理均最高,而pH在 S_0 处理下得分最高,OM、CAT在 S_3 处理下得分最高,AP、URE在 S_5 处理下得分最高,TS、AK、MWD在 S_6 处理下得分最高(图9)。2022年不同处理下土壤指标得分雷达图表明,15个指标中,AN、OM、MBC、MBN、GMD、MWD在 S_4 处理下得分最高,pH、URE在 S_0 处理下得分最高,而AK在 S_2 处理下得分最高,TS、ALP、SUC在 S_3 处理下得分最高,CAT在 S_5 处理下得分最高,ERI、AP在 S_6 处理下得分

最高。

2021—2022 年际间土壤质量指数随着净化沼液滴灌量增加均表现为先增加后降低趋势(图 10), 其中, 2021 年各处理下土壤质量指数存在显著性差异 ($P < 0.05$), 大小依次为 $S_4 > S_3 > S_2 > S_6 > S_5 > S_0 > S_1$, S_4 处理下土壤质量指数(0.545)相比 S_0 处理(0.452)显著增加了 20.06%, 相比 S_6 处理(0.481)增加了 12.50%; 2022 年土壤质量指数大小依次为 $S_4 > S_3 > S_1 > S_2 > S_5 > S_6 > S_0$, S_4 处理下土壤质量指数(0.547)相比 S_0 处理(0.441)显著增加了 24.03%。此外, 年际变化发现各处理间差异不显著 ($P > 0.05$)。此外, 线性回归分析显示 SQI 与青贮玉米产量极显著正相关 ($P < 0.01$)。

2.8 净化沼液消纳容量分析

通过土壤背景值、限量值并结合净化沼液不同重金属含量与植株平均富集含量综合计算求得土壤环境消纳容量, 其中, 净化沼液铬元素因其含量远远低于限量值从而消纳容量可达 $694694.67 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 而净化沼液中镉元素因其含量为限量值的 0.05 倍, 所以其消纳容量为 $22786.66 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。基于本研究认为 S_4 处理(净化沼液滴灌量: $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)下土壤质量指数及青贮玉米产量较高, 特以该滴灌量为计算依据, 根据重金属镉元素“木桶效应”(木桶效应指由多块木板构成的木桶, 其盛水量

表 9 土壤质量评价指标公因子方差和权重

Table 9 Common factor variance (CFV) and weight of soil quality evaluation indicators

指标 Indicator	2021		2022	
	公因子方差 CFV	权重 Weight	公因子方差 CFV	权重 Weight
MWD	0.901	0.066	0.901	0.062
GMD	0.857	0.062	0.857	0.059
pH	0.741	0.054	0.741	0.051
TS	0.954	0.070	0.954	0.066
AN	0.992	0.072	0.992	0.069
AP	0.989	0.072	0.989	0.069
AK	0.965	0.070	0.965	0.067
OM	0.892	0.065	0.892	0.062
URE	0.901	0.066	0.901	0.062
ALP	0.998	0.073	0.998	0.069
SUC	0.956	0.070	0.956	0.066
CAT	0.979	0.071	0.979	0.068
MBC	0.949	0.069	0.949	0.066
MBN	0.925	0.067	0.925	0.064
ERI	0.723	0.053	0.723	0.050

MWD: 平均质量直径 Mean weight diameter; GMD: 几何平均直径 Geometric mean diameter; TS: 全盐 Total salt; OM: 有机质 Organic matter; AN: 速效氮 Available nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; URE: 脲酶 Urease; ALP: 碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase; SUC: 蔗糖酶 Sucrase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase; MBC: 微生物生物量碳 Microbial biomass carbon; MBN: 微生物生物量氮 Microbial biomass nitrogen; ERI: 生态风险指数 Ecological risk index; CFV: 公因子方差 Common factor variance.

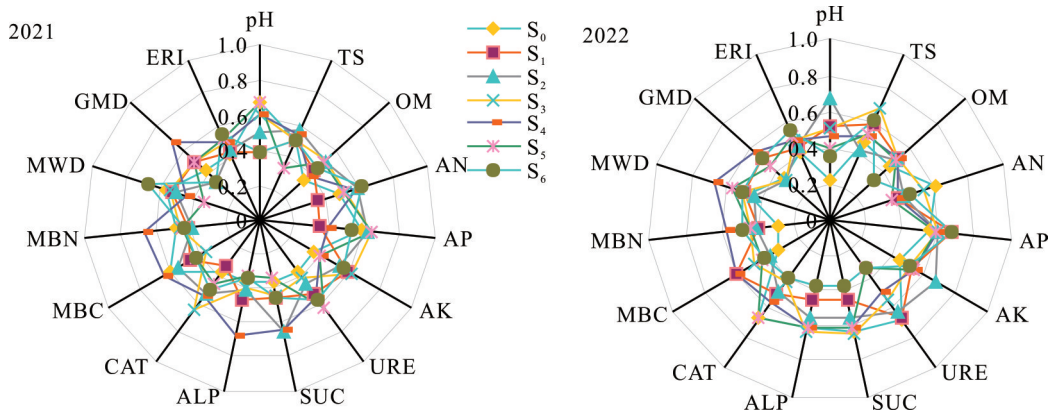


图 9 不同处理土壤指标得分雷达图

Fig.9 Radar graph of the soil parameter scores for different treatments

的关键因素并不是最长的板块, 而是最短的板块), 则可计算出, 在这种净化沼液滴灌强度下可连续滴灌 25 年而维持土壤重金属含量不超标(表 10)。而按照宁夏土壤次生盐渍化划分标准, 预计滴灌超过 19.25 年可能会导致土壤发生次生盐渍化(表 11)。

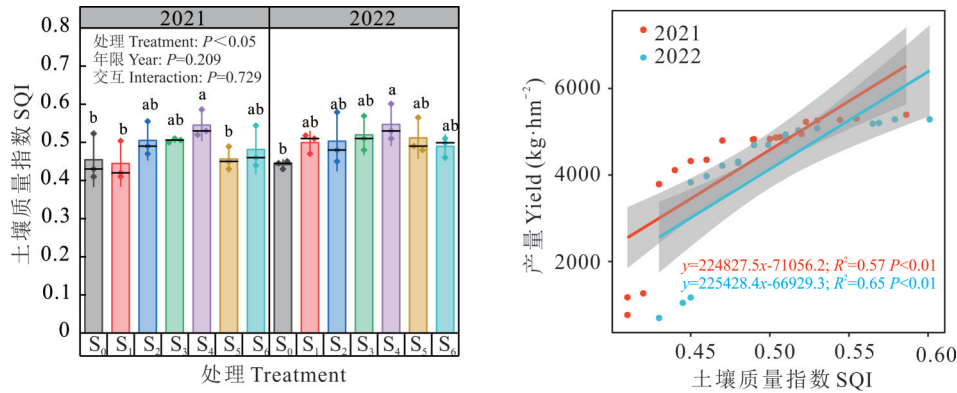


图 10 耕层土壤质量指数及与产量关系

Fig.10 Soil quality index of plough layer and its relationship with yield

表 10 沼液消纳容量分析(重金属)

Table 10 PBS absorption capacity (heavy metal)

指标 Index	土壤重金属限量值 SHM limit value (mg·kg ⁻¹)	土壤重金属起始值 SHM background value (mg·kg ⁻¹)	净化沼液重金属含量 PBS heavy metal content (mg·kg ⁻¹)	植株重金属含量 Plant heavy metal content (g·hm ⁻²)	消纳容量 Digestion capacity (m ³ ·hm ⁻²)	消纳年限 Digestion years (a)
铜 Cu	190	15.69±0.04	15.30±1.04	24.70±1.49	37394.00±2732.97	41.55±3.04
锌 Zn	300	0.44±0.01	11.19±0.03	8.73±0.40	87004.67±196.96	96.67±0.22
铅 Pb	170	13.69±0.54	2.49±0.10	0.79±0.04	204935.67±8299.00	227.71±9.22
镉 Cd	0.60	0.39±0.02	0.03±0.01	0.37±0.03	22786.66±1240.76	25.32±0.38
铬 Cr	200	24.26±0.41	0.82±0.02	0.48±0.03	694694.67±17586.23	771.88±19.54

SHM: 土壤重金属 Soil heavy metal. 统计分析为平均值±标准误, 下同 Statistical analysis was mean±standard error, the same below.

表 11 沼液消纳容量分析(全盐)

Table 11 PBS absorption capacity (total salt)

指标 Index	盐渍化标准值 Salinization standard value (g·kg ⁻¹)	土壤全盐起始值 TS background value (g·kg ⁻¹)	2年积累值 TS accumulate value (g·kg ⁻¹)	全盐年均增加量 TS increase (g·kg ⁻¹)	消纳年限 Digestion years (a)
全盐 Total salt	1.00	0.23±0.01	0.31±0.02	0.04±0.00	19.25±0.12

注: 盐渍化标准值采用第二次全国土壤普查宁夏盐渍化土壤划分标准。

Note: Salinization standard value adopts the second national soil survey of Ningxia salinization soil classification standard.

3 讨论

3.1 净化沼液滴灌对土壤质量的影响

目前,普遍认为土壤质量包括土壤物理、化学、生物学性质及重金属含量,随着科学技术水平提高,其定义也被逐步丰富,它的变化也处于一个动态过程^[28]。净化沼液作为外源添加,它会对土壤质量产生影响,其中,物理性质中变化最为明显的是土壤水稳性团聚体^[29-30]。本研究表明,>2 mm、0.25~1 mm 粒径水稳性团聚体含量随着净化沼液滴灌量增加表现为先增加后降低趋势,其中,滴灌量为 900 m³·hm⁻²时该粒径水稳性团聚体含量最高,同时,相比其他滴灌量处理显著降低了<0.25 mm 水稳性团聚体含量。此外,通过水稳性团聚体计算得出平均质量直径与几何平均直径也属滴灌量为 900 m³·hm⁻²处理最大,该参数越大,表明土壤结构越稳定。这与朱荣玮^[31]在苏北沿海脱盐草甸土、王威等^[32]在黄淮海平原砂姜黑土、唐蛟等^[33]在黄淮海平原潮土及陈皓等^[34]在江苏黄褐土上的研究结果基本一致,分析原因可能为沼液中含有大量能够分解土壤有机物的微生物,能产生具有胶结作用的多

糖胶、脂肪、蜡等物质,可有效地改善土壤团粒结构^[35-36]。

土壤养分是评价土壤质量的核心指标之一,大量研究表明,沼液可显著提高土壤速效养分含量^[37-38]。本研究表明,随着净化沼液施用量增加,土壤速效氮、有效磷、速效钾及有机质含量呈显著增加趋势,这与前人研究结果相一致,分析原因为净化沼液在滴灌后,可以吸收、挥发并通过硝化作用将沼液中的铵态氮转化为土壤硝态氮,而净化沼液自身含有的磷钾元素及纤维素、木质素等高分子物质在微生物作用下能够快速分解为土壤有机物,显著提高了土壤有效磷、速效钾及有机质含量^[39]。本研究也表明,随着净化沼液滴灌量增大,土壤pH呈先增加后降低趋势,这与罗伟^[40]、李小宇^[41]的研究结果基本一致,这主要由于净化沼液呈微碱性,在石灰性土壤上滴灌会导致土壤pH短暂增加,但过量沼液可能由于有机酸含量积累或者氨氮硝化作用产生的 H^+ 导致土壤pH呈降低趋势^[41]。土壤全盐反映出土壤溶质含量,其含量越大越容易造成土壤次生盐渍化发生。本研究表明,土壤电导率在滴灌量为 $1350\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时最高,这与李娜等^[42]利用餐厨沼液在砂壤土得出的全盐含量随沼液比例增加而升高的结果相一致。从土壤次生盐渍化角度考虑,以净化沼液 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理为例,2年土壤全盐含量增加了 $0.04\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,按照全国第二次土壤普查宁夏次生盐渍化划分标准(全盐 $\geq 1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算^[43],预计大概19年可能会导致土壤发生次生盐渍化。然而在生产中针对滴灌区域通常每3年进行一次冬灌淋洗,会有效地降低全盐含量,则上述限额可以进一步提升。

土壤中存在一系列促进土壤化学反应进程的生物酶,对土壤质量起关键性作用的酶有脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶及过氧化氢酶^[44-48]。杜妍宁^[49]研究表明,随着沼液施用量增加,土壤脲酶、蔗糖酶活性逐渐增强,而本研究表明,随着沼液施用量增加,土壤酶活性表现为先增加后降低趋势,尤其在滴灌量为 $1350\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时下显著降低,这与其有所差异,分析可能原因为,净化沼液携带大量的外源酶,滴灌后会为土壤微生物新陈代谢创造适宜的环境,可以提高土壤酶活性,促进土壤有机物的分解、转换和养分释放。但高量净化沼液滴灌可能由于重金属等污染物增加反而会降低土壤酶活性。此外,沼液滴灌也会对土壤微生物活动产生影响,本研究表明,适量的净化沼液滴灌可提高土壤MBC与MBN含量,可实现增加土壤微生物群落的丰富度与土壤碳源的代谢强度^[50]。

沼液因动物饲料重金属添加导致其成为沼肥中次要的重金属载体,固液分离后大部分重金属会残留在沼渣中,而少部分重金属会迁移至沼液中,长期不合理沼液滴灌存在环境污染风险^[51]。赖星等^[52]连续施用猪粪沼液原液滴灌3年后,土壤重金属含量呈显著增加趋势,但低于农田重金属限量值,Chen等^[53]研究表明,在连续施用沼液10年后,土壤Zn和Pb的有效态量显著增加;Bian等^[54]研究表明,施用沼液原液10年后,稻田土壤Cu和Pb含量超出土壤环境质量标准。而本研究采用净化沼液连续2年滴灌后发现土壤重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Cr均出现增加现象,且随着滴灌量增加表现为显著增加趋势,但远远低于我国农田土壤重金属限量值。因净化沼液滴灌量 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 下土壤质量指数及青贮玉米产量较高,特以该滴灌量为计算依据,根据重金属镉元素“木桶效应”计算出,在这种净化沼液滴灌强度下可连续滴灌25年而维持土壤重金属含量不超标。为有效地延长滴灌年限,在今后的工作中可采用净化沼液滴灌条件下配施生物质炭,利用其物理吸附、离子交换、沉淀络合的机制实现对重金属钝化,避免其在食物链中迁移富集。

3.2 净化沼液滴灌对青贮玉米生产力的影响

净化沼液含有丰富的营养元素及氨基酸、维生素、植物激素,这些物质对农作物的产量和品质均有良好的改善效果。蒋胜军^[55]研究表明,沼液施用量为 $18.75\sim 22.50\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,可以显著增加水稻产量,而当沼液施用量为 $45\sim 54\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,淀粉及干物质含量均有显著的提升;Xu等^[56]采用处理后的沼液灌溉大白菜(*Brassica rapa* spp. *pekinensis*),结果表明处理后的沼液灌溉能改善大白菜的营养品质、抗氧化性能并且提高产量,且重金属Cr、Pb和Cd的去除率可达50.00%、60.70%和59.70%;此外,也有研究表明,追施沼液可以增加玉米的灌浆强度,加快籽粒干物质和淀粉的积累,进而提高玉米品质和产量^[57-58]。本研究表明,青贮玉米产量在净化沼液施用量为 $225\sim 900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时表现为增加趋势,而净化沼液施用量为 $1125、1350\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时分别相比施用量为 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 均有所降低。此外,随着净化沼液滴灌量增加,青贮玉米干物质及淀粉含量均呈先增加后降低趋势,各处理间均存在显著性差异($P<0.05$),干物质含量在净化沼液施用量 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下达到最大,2021与2022年分别达到

35.12%、34.78%，分别相比沼液未滴灌处理增加了7.60%、7.14%，淀粉含量在2021年也属净化沼液施用量 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 处理下最高，达到31.87%，这与前人的研究结果基本一致，高量滴灌导致青贮玉米产量与品质下降的原因可能为土壤结构变差，养分比例失衡，无法满足作物营养生长需要，产量出现降低现象^[58]。此外，本研究滴灌量与前人研究滴灌量有所差异，本质在于本研究利用净化多级过滤设备，有效地降低了污染物浓度，而前人研究的沼液多呈浓缩高浓度状态。

4 结论

净化沼液滴灌量为 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时可提高土壤有机质含量、水稳性大团聚体含量、平均质量直径、几何平均直径、微生物生物量碳含量及酶活性，进而提高了土壤质量指数。线性回归方程模拟发现净化沼液滴灌量为 $805.56\sim 925.00\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 时有助于实现青贮玉米产量与收获标准双“30%”（淀粉 $\geq 30\%$ 、干物质量 $\geq 30\%$ ）提升的目的。基于滴灌量 $900\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 为计算依据，连续滴灌19年可能不会导致土壤次生盐渍化的发生，连续滴灌25年可维持重金属含量不超标。

参考文献 References:

- [1] Kumar S, Malav L C, Malav M K, *et al.* Biogas slurry: Source of nutrients for eco-friendly agriculture. *International Journal of Extensive Research*, 2015, 2(2): 42–46.
- [2] You L, Yu S Q, Liu H Y, *et al.* Effects of biogas slurry fertilization on fruit economic traits and soil nutrients of *Camellia oleifera* Abel. *PLoS One*, 2019, 14(5): 0208289.
- [3] Abdul N, Khan F H, Mahmood R, *et al.* Comparative study of biogas slurry with farmyard manure as fertilizer on maize crop. *Science International*, 2010, 22(4): 297–301.
- [4] Li C L, Wang Q, Shao S Z, *et al.* Stable isotope effects of biogas slurry applied as an organic fertilizer to rice, straw, and soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(29): 8090–8097.
- [5] Zheng L. Effects of biogas slurry irrigation on soil structure stability of salinized fluvo-aquic soil in the Huang-Huai-Hai Plain. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.
郑莉. 沼液施用对黄淮海平原盐化潮土土壤结构稳定性的影响. 北京: 中国农业科学院, 2020.
- [6] Qi Y C, Wang Y Q, Liu J, *et al.* Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1): 340–347.
祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 340–347.
- [7] Madari B, Machado P, Torres E, *et al.* No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2005, 80(1/2): 185–200.
- [8] Desosal L L, Glanville H C, Marshall M R, *et al.* Stoichiometric constraints on the microbial processing of carbon with soil depth along a riparian hillslope. *Biology and Fertility of Soils*, 2018, 54: 949–963.
- [9] Chen S L, Yu W W, Zhang Z, *et al.* Soil properties and enzyme activities as affected by biogas slurry irrigation in the Three Gorges Reservoir areas of China. *Journal of Environment Biology*, 2015, 36(2): 513–520.
- [10] Walsh J J, Jones D L, Gareth E J, *et al.* Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 840–845.
- [11] Tang C L, Jin Z W, Yao G W, *et al.* Effects of combined application of biochar and biogas slurry on regulating nitrogen cycle function genes and promoting nitrogen efficiency. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(8): 2843–2852.
唐存柳, 靳泽文, 姚光伟, 等. 生物质炭—沼液联合施用对调控氮循环功能基因促进氮素增效的影响. *环境化学*, 2023, 42(8): 2843–2852.
- [12] Zheng J, Li X Y, Ma J, *et al.* Effect of biogas slurry combined with straw biochar on soil organic matter and total nitrogen content. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(5): 1111–1121.
郑健, 李欣怡, 马静, 等. 秸秆生物炭配施沼液对土壤有机质和全氮含量的影响. *农业环境科学学报*, 2020, 39(5): 1111–1121.
- [13] Cai M, Yu X B, Zhou W W, *et al.* Effect of slurry on soil quality. *Journal of Tropical Biology*, 2014, 5(1): 52–56.
蔡茂, 余雪标, 周卫卫, 等. 沼液排放对土壤质量的影响. *热带生物学报*, 2014, 5(1): 52–56.

- [14] Zhao Q Z, Yang Z M, Kong F J, *et al.* Effect of biogas slurry return to field on heavy metal accumulation in soil-crop system: A meta-analysis. *Environmental Science*, 2023, 44(7): 4091–4099.
赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 等. 沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响: Meta分析. *环境科学*, 2023, 44(7): 4091–4099.
- [15] Wan H W. Effects of biogas slurry on corn and wheat physiological characteristics, soil nutrients and yield. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
万海文. 沼液对土壤养分和玉米、小麦生理特性及产量的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [16] Liu Q P. Effect of siogas slurry on soil fertility, heavy metal content and corn yields in black soil. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
刘庆平. 沼液农用对黑土土壤肥力、重金属含量和玉米产量的影响. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- [17] Cao Y F. Effects of biogas slurry application on annual silage crops yield, quality and soil nutrients. Yangzhou: Yangzhou University, 2022.
曹易繁. 沼液施用对周年青贮作物产量、品质和土壤养分的影响. 扬州: 扬州大学, 2022.
- [18] Li X T. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land, GB 15618-2018. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation, 2018.
李晓戩. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准, GB 15618-2018. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局, 2018.
- [19] Xiong W, Sun X F, Li J M, *et al.* Biogas slurry for agricultural use, GB/T 40750-2021. Beijing: State Administration for Market Regulation, Standardization Administration, 2021.
熊伟, 孙宪法, 李景明, 等. 农用沼液, GB/T 40750-2021. 北京: 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会, 2021.
- [20] Bao S D. Soil agrochemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Fan L Q, Yang J G, Xu X, *et al.* Salinity characteristics of soil and correlation of saline-alkali soil in Ningxia irrigation district. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(35): 221–225.
樊丽琴, 杨建国, 许兴, 等. 宁夏引黄灌区盐碱地土壤盐分特征及相关性. *中国农学通报*, 2012, 28(35): 221–225.
- [22] Li H S. Plant physiological and biochemical experiment principle and technology. Beijing: Higher Education Press, 2001.
李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [23] Lu R K. Soil agrochemical analysis method. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2002.
- [24] Chen Q Y, Liu Z J, Zhou J B, *et al.* Long-term straw mulching with nitrogen fertilization increases nutrient and microbial determinants of soil quality in a maize-wheat rotation on China's Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2021, 775: 145930.
- [25] Liu B Y, Wang Y P, Yao Z F, *et al.* Risk assessment and safe consumption analysis of heavy metals under different planting patterns of biogas slurry. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(8): 1507–1515.
刘炳好, 王一佩, 姚作芳, 等. 沼液还田下不同种植模式的重金属风险评价及安全消纳量分析. *生态环境学报*, 2023, 32(8): 1507–1515.
- [26] Xu Z Q, Ni S J, Tuo X G, *et al.* Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112–115.
徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112–115.
- [27] Sha Y S, Wang L W, Wu Y B, *et al.* Hygienical standard for feeds, GB 13078-2017. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization administration, 2017.
沙玉圣, 王黎文, 武玉波, 等. 饲料卫生标准, GB 13078-2017. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 2017.
- [28] Guhra T, Stolze K, Totsche K U. Pathways of biogenically excreted organic matter into soil aggregates. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 164: 108483.
- [29] Liao H, Hao X L, Zhang Y C, *et al.* Soil aggregate modulates microbial ecological adaptations and community assemblies in agricultural soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 172: 108769.
- [30] Tang X, Qiu J C, Xu Y Q, *et al.* Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in

- a region of south China affected by sheet erosion. *Catena*, 2022, 218: 106543.
- [31] Zhu R W. Effects of biogas slurry and biochar on soil aggregate organic carbon and microbial community diversity. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.
朱荣玮. 施用沼液和生物炭对土壤团聚体有机碳及其微生物多样性的影响. 南京: 南京林业大学, 2019.
- [32] Wang W, Tang J, Yin J Z, *et al.* Aggregates and associated organic carbon in lime concretion black soil in response to combined full-rate straw incorporation and biogas slurry application. *Soil*, 2023, 55(1): 53–61.
王威, 唐蛟, 殷金忠, 等. 秸秆全量还田配施沼液对砂姜黑土水稳性团聚体及结合有机碳的影响. *土壤*, 2023, 55(1): 53–61.
- [33] Tang J, Wang W, Pan F F, *et al.* The effects of biogas slurry irrigation on aggregation and stability of fluvo-aquic soil in Huang-Huai-Hai plain. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(2): 10–17.
唐蛟, 王威, 潘飞飞, 等. 沼液灌施对潮土土壤团聚体组成及稳定性的影响. *灌溉排水学报*, 2022, 41(2): 10–17.
- [34] Chen H, Lou M H, Xu X, *et al.* Effects of digested dairy slurry application on soil aggregates and their organic carbon composition in wheat and maize rotation system. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 14(1): 50–61.
陈皓, 娄梦函, 徐轩, 等. 奶牛粪沼液对小麦-玉米轮作土壤团聚体有机碳组分的影响. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(1): 50–61.
- [35] Liao H, Hao X, Li Y T, *et al.* Protists regulate microbially mediated organic carbon turnover in soil aggregates. *Global Change Biology*, 2024, 30(1): 17102.
- [36] Li G R, Yu C Y, Shen P F, *et al.* Crop diversification promotes soil aggregation and carbon accumulation in global agroecosystems: A meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 2024, 350: 119661.
- [37] Yang J H, Liu M Y, Zhang J, *et al.* Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 743–754.
杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 743–754.
- [38] Xu M, Xian Y, Wu J, *et al.* Effect of biogas slurry addition on soil properties, yields, and bacterial composition in the rice-rape rotation ecosystem over 3 years. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(5): 2534–2542.
- [39] Amlinger F, GÖTZ B, Dreher P, *et al.* Nitrogen in biowaste and yard waste compost: Dynamics of mobilisation and availability: A review. *European Journal of Soil Biology*, 2003, 39(3): 107–116.
- [40] Luo W. Effects of biogas slurry on potato yield, quality and soil environmental quality. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.
罗伟. 沼液对马铃薯产量、品质及土壤环境质量的影响研究. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [41] Li X Y. Effect of the location-based application of biogas slurry for three consecutive years on rice production and soil environmental quality. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2013.
李小宇. 连续三年定位施用沼液对水稻生产及土壤环境质量的影响研究. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [42] Li N, Xi H, Zhou Y, *et al.* Effect of water-salt regulation of drip irrigation using digested effluent of food waste on soil environment and broccoli yield. *Water Saving Irrigation*, 2024(5): 10–17.
李娜, 奚辉, 周扬, 等. 餐厨沼液滴灌水盐调控对土壤环境和西兰花产量的影响. *节水灌溉*, 2024(5): 10–17.
- [43] Li L, Wang J, Zhu Z M, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer reduction combined with organic fertilizer/straw application on soil fertility index and maize yield in saline-alkali soil. *Soil Bulletin*, 2020, 51(4): 928–935.
李磊, 王晶, 朱志明, 等. 氮肥减施与有机肥/秸秆配施对盐碱地土壤肥力指标及玉米产量的影响. *土壤通报*, 2020, 51(4): 928–935.
- [44] Yang X, Zhu Y M, Xu Y J, *et al.* Simulated warming and low O₂ promote N₂O and N₂ emissions in subtropical montane forest soil. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(10): 2706–2719.
- [45] Chen S Y, Li Q, Kong F J, *et al.* Integrated analysis of effects of livestock and poultry manure biogas slurry returning to fields on soil NO₃⁻-N accumulation. *China Environmental Science*, 2023, 43(S1): 179–185.
陈思扬, 李晴, 孔凡靖, 等. 沼液还田对土壤NO₃⁻-N累积影响的整合分析. *中国环境科学*, 2023, 43(S1): 179–185.
- [46] Zeng W S, Qiu J R, Wang D H, *et al.* Ultrafiltration concentrated biogas slurry can reduce the organic pollution of groundwater in fertigation. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 151294.
- [47] Pettit N M, Smith A R J, Freedman R B, *et al.* Soil urease: Activity, stability and kinetic properties. *Soil Biology and*

- Biochemistry, 1976, 8(6): 479–484.
- [48] Dick W A, Cheng L, Wang P. Soil acid and alkaline phosphatase activity as pH adjustment indicators. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(13): 1915–1919.
- [49] Du Y N. Effects of biogas slurry and biochar applications on soil nitrogen and phosphorus in the poplar plantation in a costal area, China. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2018.
杜妍宁. 施用沼液和生物炭对杨树人工林土壤氮、磷的影响. 南京: 南京林业大学, 2018.
- [50] Huang Q Y, Yan H B, Liu Y H, *et al.* Effects of microalgae-bacteria inoculation ratio on biogas slurry treatment and microorganism interactions in the symbiosis system. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 362: 132271.
- [51] Peng J Y, Zhang S A, Han Y Y, *et al.* Soil heavy metal pollution of industrial legacies in China and health risk assessment. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151632.
- [52] Lai X, Wu J, Wang J W, *et al.* The long-term effects of biogas slurry on soil properties and potential risks of heavy metals in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(6): 359–364, 370.
赖星, 伍钧, 王静雯, 等. 连续施用沼液对土壤性质的影响及重金属污染风险评价. *水土保持学报*, 2018, 32(6): 359–364, 370.
- [53] Chen Z M, Wang Q, Ma J W, *et al.* Fungal community composition change and heavy metal accumulation in response to the long-term application of an aerobically digested slurry in a paddy soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 196: 110453.
- [54] Bian B, Wu H S, Zhou L J. Contamination and risk assessment of heavy metals in soils irrigated with biogas slurry: a case study of Taihu basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(4): 1–15.
- [55] Jiang S J. Analysis of the effect of biogas slurry on rice yield and quality. *Sichuan Agricultural Science and Technology*, 2018(11): 16–19.
蒋胜军. 沼液对水稻产量和品质的影响分析. *四川农业科技*, 2018(11): 16–19.
- [56] Xu Z M, Wang Z, Gao Q, *et al.* Influence of irrigation with microalgae-treated biogas slurry on agronomic trait, nutritional quality, oxidation resistance, and nitrate and heavy metal residues in Chinese cabbage. *Journal of Environmental Management*, 2019, 244: 453–461.
- [57] Ghimire K, Gautam D M, Mishra K, *et al.* Influence of biogas slurry and urea on yield and quality of okra (*Abelmoschus esculentus* L.) fruits. *Journal of Agriculture and Environment*, 2015, 16: 161–169.
- [58] Hartemink A E, Barrow N J. Soil pH-nutrient relationships: The diagram. *Plant and Soil*, 2023, 486(1): 209–215.