

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.03.006

雷金银, 雷晓婷, 何进勤, 等. 马铃薯加工废水灌溉农田土壤肥力特征及其对施肥的响应. 土壤, 2022, 54(3): 473–480.

马铃薯加工废水灌溉农田土壤肥力特征及其对施肥的响应^①

雷金银¹, 雷晓婷¹, 何进勤^{1*}, 祁焕军^{1,2}, 金建新¹, 周丽娜¹, 桂林国¹, 冯付军³

(1 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 银川 750002; 2 宁夏大学农学院, 银川 750021; 3 宁夏西吉县农技推广中心, 宁夏西吉 756200)

摘要: 为探明施肥措施对马铃薯淀粉加工废水灌溉后农田土壤肥力的影响, 设置 7 个施肥处理: T₁(CK), 不施肥; T₂, 常规施肥; T₃, 优化施肥(减氮增磷); T₄, 优化施肥+增氧剂; T₅, 优化施肥 70%+生物有机肥; T₆, 优化施肥 70%+生物有机肥+增氧剂; T₇, 缓释肥(沃夫特 26-10-12), 取样并检测土壤养分指标及微生物数量。结果表明, 与灌溉前相比, 灌溉后种植前 0~20 cm 和 20~50 cm 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾均激增, 分别增加 68.65%、70.73%、95.47%、86.41%、434.60%、931.05% 和 485.07%、580.31%, 收获后不同施肥处理土壤养分均显著下降, 且处理间差异显著。灌溉后种植前 0~20 cm 土壤真菌、细菌和放线菌分别增加 10 倍、50 倍和 1.5 倍, 微生物总量增加 34 倍, 收获后 T₁ 中土壤真菌有所下降, 其余施肥处理下土壤真菌显著增加, 各施肥处理土壤细菌和微生物总量显著降低, 放线菌显著增加。其中 T₅、T₆ 细菌、放线菌和微生物总量最高, T₄ 真菌最高。两种供试玉米品种株高和地上生物量在不同施肥措施下均由高到低为: T₆>T₅>T₇>T₃>T₄>T₂>T₁。由此可知, 马铃薯淀粉废水灌溉农田具有一定的肥效, 且通过减施化肥, 增施有机肥和增氧剂可有效促进马铃薯淀粉废水的肥效作用。

关键词: 马铃薯加工废水; 灌溉; 土壤肥力; 施肥措施

中图分类号: S-3 **文献标志码:** A

Soil Fertility Characteristics and Its Response to Fertilization of Potato Starch Processing Wastewater Irrigation

LEI Jinyin¹, LEI Xiaoting¹, HE Jinjin^{1*}, QI Huanjun^{1,2}, JIN Jianxin¹, ZHOU Lina¹, GUI Linguo¹, FENG Fujun³

(1 Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2 Agricultural College, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3 Ningxia Xiji Agricultural Technology Extension and Service Center, Xiji, Ningxia 756200, China)

Abstract: An experiment was conducted in 2017–2018 to explore the effects of potato starch processing wastewater irrigation on soil fertility characteristics, crop yield, and the regulatory effects of different fertilization on its fertilizer efficiency. 7 fertilization treatments were set: T₁ (CK), no fertilization; T₂, conventional fertilization; T₃, optimized fertilization (reduced nitrogen and increased phosphorus); T₄, optimized fertilization + oxygenator; T₅, optimized fertilization 70% + bio-organic fertilizer; T₆, optimized fertilization 70% + bio-organic fertilizer + oxygenator; T₇, slow-release fertilizer (Wofte 26-10-12), soil nutrients and microbial counts were detected. The results showed that the contents of soil organic matter, available nitrogen, phosphorus and potassium of topsoil (0–20 cm) and subsurface soil (20–50 cm) were increased by 68.65% and 70.73%, 95.47% and 86.41%, 434.60% and 931.05%, 485.07% and 580.31% after 60 days irrigation and before planting compared to before irrigation. After harvest, soil nutrient contents were all decreased significantly and significantly different in different fertilizations. Meanwhile, fungi, bacteria and actinomycetes in topsoil were increased by 10, 50 and 1.5 times respectively, and total microbes increased by 34 times. Fungi was increased under different fertilization except T₁, bacteria and total microbes were decreased, and actinomycetes was increased significantly after harvest. Among different fertilization, bacteria, actinomycetes and total microbes were highest under T₅ and T₆, and fungi was highest under T₄. The height and aboveground biomass of both tested maize varieties were in the same sequence under

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41561059)、宁夏回族自治区重点研发项目(2017BY085)和宁夏农林科学院全产业链创新项目(YES-2016-06, NKYG-17-01)资助。

* 通讯作者(hexiaofei1211@163.com)

作者简介: 雷金银(1981—), 男, 宁夏西吉人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤质量与农业生态环境构建等方面研究。E-mail: leijsy@126.com

different fertilization: $T_6 > T_5 > T_7 > T_3 > T_4 > T_2 > T_1$. Hence, it can be concluded that potato starch processing wastewater has a certain fertilizer efficiency, and the fertilizer effect of potato starch wastewater can be effectively promoted by reducing the application of chemical fertilizer and increasing the application of organic fertilizer and oxygenator.

Key words: Potato starch processing wastewater; Irrigation; Soil fertility; Fertilization

宁夏南部山区生态环境恶劣,干旱缺水是当地农业发展的最大限制因素^[1]。马铃薯由于适应能力强,成为当地经济发展和脱贫致富的支柱产业,在当地经济和社会发展中处于无法替代的地位。区内西吉县素有“中国马铃薯之乡”之称。每年西吉马铃薯加工业给当地农民带来的经济收入占总收入的 1/4 以上,占工业经济的 1/2 左右。20 世纪 90 年代初期,马铃薯淀粉产业的兴起为山区农民脱贫致富找到了一条出路,有力地拉动了当地经济的增长,取得了良好的经济效益和显著的社会效益。目前,马铃薯淀粉加工成为宁南山区马铃薯鲜薯消化的重要途径,每年全区 1/3 的马铃薯用于生产淀粉,产值达 2 亿多元。但随之而产生的淀粉加工废水的污染问题也日益凸现出来,据测算,每加工生产 1 t 精淀粉需耗水 12 t,每年排放的淀粉废水将近 3×10^6 t^[2-3]。何进勤等^[4]、李晓婷等^[5]和赵博超等^[6]研究指出,马铃薯淀粉的生产加工过程主要是物理变化过程,生产中一般不添加任何有毒、有害化学物质,只需加入少量的柠檬酸(用于漂白淀粉),废水中含有大量氨基酸、氮、磷、钾等作物需要的营养物质。以“肥水”还田加以利用,不仅可以避免对环境造成严重污染,而且减少水肥资源的巨大浪费。国内外关于废水灌溉发展农业开展了大量研究,许多研究表明废水灌溉能够提高土壤肥

力、增加土壤酶活性、促进种植作物生长^[7-13];但也有专家研究指出,长期施用高含量碳耗氧有机物的淀粉废水会使农田土壤腐殖质组分变劣、土壤物理结构变差。此外,在污灌过程中 NO_3^- 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等物质下移,潜伏着污染地下水的危险^[14-15]。因此,在利用淀粉废水进行灌溉的过程中,如何做到扬长避短是一个值得长期探索的问题。本文针对马铃薯淀粉加工废水灌溉农田后营养物质在土壤中的稳定性及其肥效特征进行研究,探讨施肥措施对其养分的影响,提出基于马铃薯废水灌溉的旱作农田土壤肥力调控技术,为完善马铃薯废水还田和可持续利用提供技术保障。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于宁夏原州区西吉县将台乡火沟村,该区海拔 1 830 ~ 2 052 m,年干燥度 1.42,年均气温 5.3 °C,多年平均降雨量 378 mm,无霜期 123 d, $\geq 10^\circ\text{C}$ 年活动积温 1 928.4 °C。土壤为黑垆土,种植前表层 0 ~ 20 cm 土壤肥力状况为有机质 12.25 g/kg,碱解氮 75 mg/kg,有效磷 15.75 mg/kg,速效钾 167.5 mg/kg。试验废水取自附近西吉万里马铃薯淀粉加工有限公司生产废水,废水基本成分见表 1。

表 1 马铃薯淀粉加工废水基本成分含量
Table 1 Contents of basic components of potato starch processing wastewater

COD (g/L)	BOD ₅ (g/L)	总磷 (mg/L)	硝态氮 (mg/L)	铵态氮 (mg/L)	悬浮物 (g/L)	蛋白质 (g/100g)	粗纤维 (%)	淀粉 (g/100g)	pH
33.86.9 ± 3.00	11.64.0 ± 10.00	6.87 ± 0.80	156.50 ± 4.10	44.30 ± 3.90	2.01 ± 8.30	1.67 ± 0.04	1.05 ± 0.03	1.47 ± 0.12	4.46 ± 0.28

1.2 试验设计

试验在种植前利用马铃薯淀粉加工废水灌溉一次,然后以废水灌溉农田为研究对象,采用完全随机试验设计,共设 7 个施肥处理: T_1 (CK),不施肥; T_2 ,常规施肥; T_3 ,优化施肥(减氮增磷); T_4 ,优化施肥+增氧剂; T_5 ,优化施肥 70%+生物有机肥; T_6 ,优化施肥 70%+生物有机肥+增氧剂; T_7 ,缓释肥(沃夫特 26-10-12)。每个小区面积 4 m × 10 m,重复 3 次。供试作物为青贮玉米,选用电玉 188 和辽单 565 两个品种。于灌溉 2 个月后开展施肥、播种,所有肥料均在播种前一次性施入,各小区试验方案见表 2。

1.3 观测指标与方法

1.3.1 废水指标测定 马铃薯淀粉加工废水 COD、BOD₅、pH、硝态氮、铵态氮、总磷、粗纤维、淀粉、蛋白质等测定参考文献[16]。

1.3.2 土壤养分指标测定 土壤有机质测定采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法-外加热法;碱解氮测定采用碱解扩散法;有效磷测定采用 NaHCO_3 浸提-分光光度计法;速效钾采用乙酸氨浸提-火焰光度计法^[17]。

1.3.3 土壤微生物数量及其区系特征 在播种前和收获后采集各处理土壤,主要测定表层 0 ~ 20 cm 土壤微生物区系组成。细菌、真菌和放线菌采用平板

表 2 施肥方案(kg/hm²)
Table 2 Fertilization program

处理	化肥纯养分			肥料施用量				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	尿素	二铵	缓释肥	生物有机肥	增氧剂
T ₁ (CK)	0	0	0	0	0	—	—	—
T ₂	247.5	103.5	0	450	225	—	—	—
T ₃	123	138	0	150	300	—	—	—
T ₄	123	138	0	150	300	—	—	30
T ₅	86.1	96.6	0	105	210	—	1 500	—
T ₆	86.1	96.6	0	105	210	—	1 500	30
T ₇	86.1	39.75	47.27	—	—	472.5	—	—

培养计数法测定，培养基分别用牛肉膏蛋白胨琼脂、PDA 和改良高氏 1 号琼脂培养基^[18]。

1.3.4 玉米株高和生物量测定 株高标记测定,生物量采用样方法测定。

1.4 数据统计分析

应用 Excel 2007 进行数据处理和作图, Minitab 17.0 进行 ANOVA 统计分析和 LSD 法均值两两比较分析。

2 结果与分析

2.1 施肥对马铃薯加工废水灌溉农田土壤养分特征的影响

2.1.1 土壤有机质 马铃薯淀粉加工废水灌溉农田极显著地增加了土壤有机质含量($P<0.01$)。灌溉后 60 d 种植前表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤有机质比灌溉前分别增加 68.65% 和 70.73%(表 3)。废水灌溉带来的土壤有机质增加, 经过一季玉米生长, 土壤有机质仍然有所增加, 与废水灌溉前相比, 收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理下表层 0~20 cm 土壤有机质分别增加 17.14%、3.59%、16.24%、2.94%、13.4%、16.98%、23.02%, 底层 20~50 cm 土壤有机质除 T₅ 处理略有下降外, T₁、T₂、T₃、T₄、T₆、T₇ 处理下均有所增加, 分别提高 32.26%、35.56%、57.59%、55.77%、53.42%、60.68%。废水灌溉带入的有机物料, 导致土壤有机质激增, 但是其很不稳定, 与废水灌溉后种植前相比, 收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理下表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤有机质极显著下降, 分别降低 30.54%、22.53%、38.58%、20.71%、31.07%、7.7%、38.96%、8.76%、32.72%、46.31%、30.64%、10.14% 和 27.06%、5.88%。表层 0~20 cm 土壤有机质 T₂ 和 T₇ 处理差异极显著, 其他各处理间差异不显著。其中 T₂、T₄ 处理有机质最低, T₇ 最高, 表明常规施肥氮肥过量和增施增氧

剂增加土壤氧气含量, 促进土壤有机质矿化, 合理施肥有利于有机质固持与蓄存。底层 20~50 cm 土壤有机质 T₅ 和 T₇ 分别与各处理差异极显著, 其他各处理之间差异不显著, 其中 T₅ 处理最低, T₇ 最高, 表明增施有机肥导致深层土壤有机质的消耗。

2.1.2 土壤碱解氮 马铃薯淀粉加工废水灌溉农田极显著地增加土壤碱解氮含量($P<0.01$)。灌溉后种植前土壤表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤碱解氮比废水灌溉前分别增加 95.47% 和 86.41%(表 3)。玉米在生长过程中氮的消耗较大, 各施肥处理下土壤碱解氮含量均有所下降, 与废水灌溉前相比, 收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理下表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤碱解氮显著下降, 分别下降 93.87%、96.10%、53.97%、56.66%、59.37%、70.39%、22.91%、51.15%、73.84%、86.21%、28.64%、2.91% 和 40.49%、61.59%。通过废水增加土壤碱解氮极不稳定, 在生长季内快速降低, 与废水灌溉后种植前相比, 收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤碱解氮也均极显著下降, 分别降低 96.86%、97.91%、76.45%、76.75%、79.22%、84.11%、60.56%、73.79%、86.62%、92.60%、63.49%、47.92% 和 69.56%、79.40%。表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤碱解氮各处理之间差异极显著。其中 T₁ 和 T₅ 处理最低, 表明不施肥处理碱解氮失衡, 而增施生物有机肥促进土壤氮矿化和吸收利用, T₆ 处理最高, 在优化施肥的基础上, 增施增氧剂和生物有机肥对氮素的稳定有影响。可知, 合理的施肥处理, 可将废水的肥力优势发挥出来, 维持氮的稳定和平衡, 同时降低氮的无效损失和对土壤环境的影响。

2.1.3 土壤有效磷 马铃薯淀粉加工废水灌溉农田极显著地增加土壤有效磷含量($P<0.01$)。灌溉后 60 d 种植前土壤表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土

表 3 马铃薯淀粉加工废水灌溉前后土壤养分特征变化
Table 3 Soil nutrient contents before and after potato starch processing wastewater irrigation

处理		土层(cm)	有机质(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
播种前	废水灌溉前	0~20	12.25 ± 0.92 C	75 ± 2.24 B	15.75 ± 0.58 D	167.5 ± 7.68 D
		20~50	9.36 ± 0.32 D	51.5 ± 1.54 B	3.8 ± 0.28 G	127 ± 4.21 G
收获后	废水灌溉后 60 d	0~20	20.66 ± 3.91 A	146.6 ± 8.71 A	84.2 ± 3.28 A	980 ± 34.12 A
		20~50	15.98 ± 1.68 A	96 ± 6.93 A	39.18 ± 2.43 CD	864 ± 20.88 A
	T ₁	0~20	14.35 ± 0.71 BC	4.6 ± 0.26 G	22.34 ± 0.19 CD	588.06 ± 8.68 C
		20~50	12.38 ± 0.83 BC	2.01 ± 0.13 G	15.68 ± 0.39 F	539.14 ± 7.67 F
	T ₂	0~20	12.69 ± 0.74 C	34.52 ± 1.48 E	66.32 ± 3.55 A	636.98 ± 29.52 C
		20~50	12.67 ± 0.91 C	22.32 ± 1.99 C	25.93 ± 2.75 E	576.43 ± 10.51 E
	T ₃	0~20	14.24 ± 0.91 BC	30.47 ± 2.19 E	55.13 ± 2.94 AB	783.75 ± 17.19 B
		20~50	14.75 ± 0.98 AB	15.25 ± 0.55 E	56.50 ± 2.30 B	685.91 ± 5.95 D
	T ₄	0~20	12.61 ± 1.27 C	57.82 ± 2.78 C	56.67 ± 2.22 AB	734.83 ± 9.90 B
		20~50	14.58 ± 0.57 AB	25.16 ± 1.54 C	41.13 ± 2.10 C	881.59 ± 10.49 A
	T ₅	0~20	13.90 ± 0.64 BC	19.62 ± 1.50 F	43.01 ± 2.38 B	636.98 ± 39.67 C
		20~50	8.58 ± 0.82 D	7.1 ± 0.82 F	14.91 ± 1.19 F	759.29 ± 27.49 C
	T ₆	0~20	14.33 ± 1.00 BC	53.52 ± 3.44 C	38.91 ± 2.01 BC	588.06 ± 19.72 C
		20~50	14.36 ± 0.72 ABC	50 ± 1.60 B	36.35 ± 3.70 D	734.83 ± 17.11 C
	T ₇	0~20	15.07 ± 1.16 B	44.63 ± 2.44 D	72.30 ± 4.69 A	808.21 ± 24.38 B
		20~50	15.04 ± 1.03 A	19.78 ± 1.47 D	63.16 ± 3.25 A	832.67 ± 16.90 B
DF		0~20	8	8	8	8
		20~50	8	8	8	8
SS		0~20	152.44	41 081.3	10 300	1 129 702
		20~50	178.97	20 671.0	9 322.09	1 284 732
MS		0~20	19.05	5 135.16	1 287.49	141 213
		20~50	22.37	2 583.87	1 165.26	160 591
F _{0.01}		0~20	20.73	1 120.68	18.23	177.9
		20~50	30.55	1 575.11	236.11	864.13
P		0~20	0.000	0.000	0.000	0.000
		20~50	0.000	0.000	0.000	0.000

注：表中大写字母不同表示同一土层不同处理间差异达 $P<0.01$ 显著水平，下表同。DF 为自由度，SS 为平均偏差平方和，MS 为均方， $F_{0.01}$ 为统计量， P 为显著性概率。

壤有效磷比灌溉前分别增加 434.60% 和 931.05%(表 3)。废水灌溉带入的养分成分造成的土壤有效磷增加，经过一季玉米生长，土壤有效磷仍然有所增加，与废水灌溉前相比，收获后表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤有效磷极显著增加， T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 分别增加 41.84%、312.63%，321.08%、582.37%，250.03%、1386.84%，259.81%、982.37%，173.08%、292.37%，147.05%、856.58% 和 359.05%、1562.11%。同样地，废水灌溉导致土壤有效磷的激增，但是很不稳定，与废水灌溉后种植前相比， T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 处理表层 0~20 cm 土壤有效磷均极显著下降，分别降低 73.47%、21.24%、34.52%、32.70%、48.92%、53.79%、14.13%。 T_3 、 T_4 、 T_7 底

层 20~50 cm 土壤有效磷分别增加 44.21%、4.98%、61.20%， T_1 、 T_3 、 T_5 、 T_6 处理分别下降 59.98%、33.82%、61.94%、7.22%。各处理表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤有效磷差异极显著。其中 T_7 最高、 T_1 最低。

2.1.4 土壤速效钾 马铃薯淀粉加工废水灌溉农田极显著地增加土壤速效钾含量($P<0.01$)。灌溉后 60 d 种植前土壤表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤速效钾比灌溉前分别增加 485.07% 和 580.31%(表 3)。废水灌溉带入的养分成分造成的土壤速效钾增加，经过一季玉米生长，各施肥处理土壤速效钾仍然极显著增加，与废水灌溉前相比，收获后 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 处理下表层 0~20 cm 和底层 20~50 cm 土壤分别增加 251.08%、324.52%，280.29%、

353.88%、367.91%、440.09%、338.70%、594.17%、280.29%、497.87%、251.08%、478.61% 和 382.51%、555.65%。废水灌溉导致土壤速效钾的激增，但是很不稳定，与废水灌溉后种植前相比，收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 各处理表层 0~20 cm 土壤速效钾极显著下降，分别降低 39.99%、35.00%、20.03%、25.02%、35.00%、39.99%、17.53%。底层 20~50 cm 土壤速效钾除 T₄ 处理有所增加外，T₁、T₂、T₃、T₅、T₆、T₇ 各处理均显著下降，分别降低 37.60%、33.28%、20.61%、12.12%、14.95%、3.63%。不同施肥处理之间差异显著，其中 T₇ 最高、T₁ 最低。

2.2 施肥对马铃薯加工废水灌溉农田土壤微生物区系及数量特征影响

由表 4 可知，马铃薯淀粉加工废水灌溉对土壤微生物区系及其数量特征具有极显著影响($P<0.01$)。与废水灌溉前相比，灌溉后种植前表层 0~20 cm 土壤真菌、细菌和放线菌分别增加 10 倍、50 倍和 1.5 倍，微生物总量增加 34 倍。与土壤养分相似，土壤微生物量亦呈现出灌溉之初激增的不稳定性和经过种植与和施肥管理后的初步平衡稳定的过程，不同施肥处理对土壤真菌、细菌、放线菌和微生物总量的影响极显著($P<0.01$)。与废水灌溉前相比，收获后 T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理表层 0~20 cm 土壤真菌、细菌、放线菌和微生物总量显著增加，其中真菌分别增加 800.61%、885.37%、1296.34%、1816.26%、1214.63%、1354.07%、1004.88%，细菌分别增加 467.55%、860.38%、1157.74%、897.36%、1218.49%、1449.43%、733.21%，放线菌增

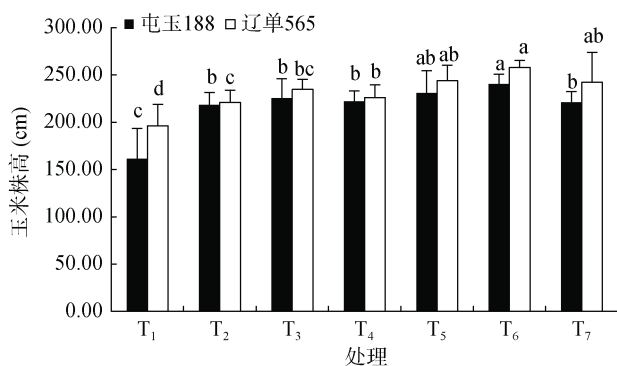
加 314.15%、60%、196.04%、249.81%、354.72%、406.23%、187.55%，微生物总量分别增加 447.37%、729.10%、1001.86%、804.95%、1076.47%、1276.47%、647.68%。与废水灌溉后种植前相比，收获后除 T₁ 处理土壤真菌有所下降外，T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 处理土壤真菌显著增加，分别增加 8.46%、53.69%、110.92%、44.65%、60.04%、21.26%；T₁、T₂、T₃、T₄、T₅、T₆、T₇ 土壤细菌显著降低，分别降低 85.27%、75.08%、67.36%、74.12%、65.79%、59.79%、78.38%；放线菌显著增加，分别增加 184.70%、9.99%、103.50%、140.47%、212.58%、247.99%、97.67%；微生物总量显著降低，分别下降 82.89%、74.09%、65.56%、71.71%、63.23%、56.98%、76.63%。其中 T₅、T₆ 处理细菌、放线菌和微生物总量最高，T₄ 处理真菌最高，表明增施生物有机肥和增氧剂处理能够有效改善土壤微生物的生存环境，提高土壤微生物数量，从而更加有利于发挥土壤对废水的消纳、利用作用。

2.3 施肥对马铃薯加工废水灌溉农田玉米生长的影响

废水灌溉农田后，不同施肥处理对玉米生长发育影响显著(图 1)。两种供试玉米品种屯玉 188 和辽单 565 均表现出 T₆ 处理株高最高，T₁ 处理株高最矮，两个品种各处理株高由高到低均为：T₆>T₅>T₇>T₃>T₄>T₂>T₁，T₁ 与其余各施肥处理之间差异显著。表明废水灌溉后仍然需要一定的肥料配施，且减化肥、增施生物有机肥和增氧剂对废水灌溉后的玉米生长影响效果最佳。

表 4 马铃薯淀粉加工废水灌溉前后表层 0~20 cm 土壤微生物区系及其数量特征变化
Table 4 Soil microbial flora and population in topsoil (0–20 cm) before and after potato starch processing wastewater irrigation

处理		真菌 (10 ³ cfu/g)	细菌 (10 ⁵ cfu/g)	放线菌 (10 ⁴ cfu/g)	微生物总量 (10 ⁵ cfu/g)
播种前	废水灌溉前	4.92 G	2.65 G	5.3 G	3.23 I
	废水灌溉后 60 d	44.70 F	102.12 A	7.71 F	103.34 A
收获后	T ₁	44.31 F	15.04 F	21.95 C	17.68 H
	T ₂	48.48 E	25.45 D	8.48 F	26.78 F
	T ₃	68.70 B	33.33 C	15.69 E	35.59 D
	T ₄	94.28 A	26.43 D	18.54 D	29.23 E
	T ₅	64.66 C	34.94 C	24.10 B	38.00 C
	T ₆	71.54 B	41.06 B	26.83 A	44.46 B
	T ₇	54.36 D	22.08 E	15.24 E	24.15 G
DF		8	8	8	8
SS		14 415.8	18 976.9	1 410.05	18 922.8
MS		1 801.98	2 372.11	176.26	2 365.35
F _{0.01}		876.94	1 528.46	129.15	1 492.04
P		0.000	0.000	0.000	0.000



(图中小写字母不同表示同一玉米品种不同处理间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下图同)

图 1 不同施肥处理对玉米株高的影响

Fig. 1 Corn heights under different fertilization

2.4 施肥对马铃薯加工废水灌溉农田玉米地上生物量的影响

废水灌溉农田后,不同施肥处理对玉米地上生物量影响显著(图 2),两种供试玉米品种屯玉 188 和辽单 565,不同施肥处理之间差异显著,其中 T₆ 处理生物量最高, T₁ 处理最低,生物量由高到低顺序为 T₆ > T₅ > T₇ > T₃ > T₄ > T₂ > T₁, 相对于 T₁, 各施肥处理分别增加 71.49%、50.34%、51.32%、33.57%、39.71%、25.58%、37.94%、19.95%、25.27%、18.60%和 20.08%、16.23%。表明废水灌溉后仍然需要一定的肥料配施,且减化肥、增施生物有机肥和增氧剂处理玉米生物量最高。

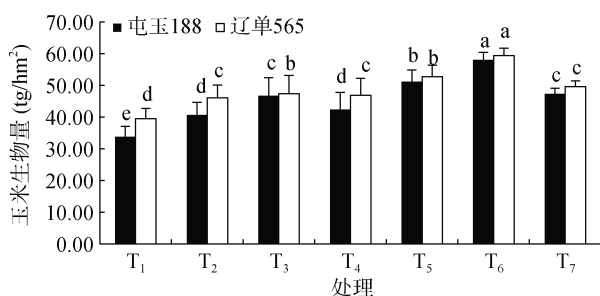


图 2 不同施肥处理对玉米地上生物量的影响

Fig. 2 Corn aboveground biomass under different fertilization

3 讨论与结论

最早开始废水处理的技术就是应用废水灌溉土地,究其原因主要是:①废水还田处理成本低,简单易行;②废水中含有丰富的营养元素,可当做“肥水”补充植物生长必需的养分,避免随意排放导致的环境污染和资源浪费问题;③利用废水灌溉解决水资源短缺的问题。废水灌溉能够提供植物生长必需的营养元素,提高土壤养分含量。Castro 等^[19]研究表明,城

市污水灌溉草坪草通过增加土壤有机质和改善土壤物理性质促进植物养分吸收和增加产量。Krause 等^[20]研究表明,废水灌溉提高土壤导电率,增加土壤养分和微生物活性。同样地,马铃薯淀粉废水灌溉携带大量有机无机营养物质进入土壤,必然导致土壤养分的变化,且马铃薯淀粉加工废水相较于其他工业废水,由于其生产过程中没有任何化学物品的添加,不存在人们普遍关注的重金属污染的问题。宰松梅等^[21]和黄爽等^[22]研究指出,基于土地净化和肥水灌溉理论进行的灌溉还田处理以土地净化和肥水灌溉理论为基础的废水“还田模式”不失为解决马铃薯废水处理问题的有效途径。Marzec^[23]研究认为马铃薯淀粉加工废水灌溉增加草地土壤养分,但是土壤养分不稳定,在灌溉 8 个月后出现显著下降。本试验也得出相似的结果,相比灌溉前,马铃薯淀粉加工废水灌溉农田极显著地增加土壤养分含量($P < 0.01$)。灌溉后 60 d 种植前土壤表层 0 ~ 20 cm 和底层 20 ~ 50 cm 土壤有机质、碱解氮、有效磷和速效钾激增,分别增加 68.65%、70.73%、95.47%、86.41%、434.60%、931.05%和 485.07%、580.31%。但是激增的土壤养分及其不稳定,不施肥或者常规施肥管理下,收获后仅以对照处理看,收获后与废水灌溉后种植前相比,收获后不施肥及常规施肥处理下表层 0 ~ 20 cm 和底层 20 ~ 50 cm 土壤有机质极显著下降,分别降低 30.54%、22.53% 和 38.58%、20.71%;播种前灌溉后比收获后不施肥处理下表层 0 ~ 20 cm 和底层 20 ~ 50 cm 土壤碱解氮也均极显著下降,分别降低 96.86%、97.91%;有效磷分别降低 73.47%、21.24%,速效钾分别降低 39.99%、35.00%。本研究鉴于以往研究过多重视肥效和环境效应研究,而对于配套的施肥管理措施研究不足的现状,通过开展不同施肥对废水灌溉土壤养分的影响研究,结果表明,从不同施肥处理差异来看,在优化施肥的基础上增施生物有机肥和增氧剂、施用缓释肥两种处理下土壤养分状况优于其他施肥处理,可有效调控大量有机物进入农田后营养物质的蓄存、转化、吸收过程,从而实现消除对土壤的不利影响,最大化发挥废水肥效作用的目的。由此可知,废水灌溉后的配套施肥管理措施,是保持土壤健康、废水养分高效利用的关键举措。今后尚需进一步加强废水灌溉后养分转化、吸收利用、迁移特征及其微生物过程、土壤物理性质等方面的研究。

废水灌溉农田带入大量的碳、氮有机物质,为促进微生物的迅速生长和繁殖提供了可利用的碳源、氮源,同时土壤微生物又是促进有机物质分解、养分循

环的主要源动力。郭晓明等^[24]提出污水中的营养物质输入土壤后引发微生物活性提高的“激发效应”;白璐等^[25]利用废水灌溉修复盐碱土研究表明,造纸废水灌溉增加土壤微生物量,尤其是增加了放线菌在微生物总量中所占的比重。商冉等^[26]人利用啤酒废水与清水的不同比例灌溉盆栽小麦和玉米发现:随着污水浓度的不断增大,细菌、放线菌、好气性纤维素分解菌、硝酸菌、亚硝酸菌、自生固氮菌等的数量均呈先增加后减少的变化规律。本试验结果表明,马铃薯淀粉加工废水灌溉对土壤微生物区系及其数量特征具有极显著影响。与废水灌溉前相比,灌溉后种植前表层0~20 cm土壤真菌、细菌和放线菌分别增加10倍、50倍和1.5倍,微生物总量增加34倍。但是这种废水灌溉导致的土壤微生物量激增极其不稳定,尚需配套的施肥技术对微生物量的平衡稳定进行调控。在经过一季作物种植后,不施肥处理下土壤真菌、细菌分别下降0.8%、85.27%,放线菌增加184.70%,微生物总量下降82.89%。收获后增施有机肥处理和增施有机肥+增氧剂两个处理细菌、放线菌和微生物总量最高,增施增氧剂处理真菌最高,表明增施生物有机肥和增氧剂处理能够有效补充废水耗土壤中的氧气,改善土壤微生物的生存环境,提高土壤微生物数量,从而更加有利于发挥土壤对废水有机物的消纳、利用。

废水灌溉通过增加土壤养分、微生物特征,从而对作物生长和产量具有明显的促进作用。Daneshvar等^[27]、夏伟立等^[28]和齐志明等^[29]通过城市废水灌溉玉米、草坪草研究发现,废水灌溉促进草坪草的生长。方海军等^[7]通过在固原市定位3 a马铃薯淀粉加工废水灌溉试验表明,废水灌溉农田后,促进作物生长,增加作物产量。本试验研究表明,两种供试玉米品种屯玉188和辽单565株高均在70%常规施肥+生物有机肥+增氧剂处理下最高,不施肥处理株高最矮,地上生物量分别比对照增产71.49%和50.34%。表明废水灌溉后仍然需要一定的肥料配施,且减化肥、增施生物有机肥和增氧剂对废水灌溉后的玉米生长影响效果最佳。

综上所述,马铃薯淀粉加工废水具有较高的营养成分,可以当作污水灌溉的一种资源进行农田利用。但是,单纯的废水灌溉带入的肥效不稳定,容易出现脱肥造成减产。因此,废水灌溉农田要有配套的合理施肥管理策略,从而保证废水灌溉农田的土壤养分平衡稳定,增加土壤微生物活性,促进作物生长发育。本试验结果表明,减施化肥、增施生物有机肥和配施

增氧剂对于玉米的生长发育和生物量均具有显著效果。为进一步摸清废水灌溉对土壤养分的影响机理与农田环境质量“预警”研究,尚需进一步开展不同施肥条件下土壤对不同浓度灌溉废水有机物质的消纳、转化能力及其分解途径的研究。

参考文献:

- [1] 潘华. 宁夏南部山区马铃薯淀粉加工废水处理与综合利用的措施与建议[J]. 宁夏党校学报, 2007, 9(5): 83-86.
- [2] 刘凌, 崔明学, 吴娜, 等. 马铃薯淀粉工业废水的环境影响与资源化利用[J]. 食品与发酵工业, 2011, 37(8): 131-135.
- [3] 潘华. 宁夏南部山区马铃薯淀粉加工废水处理与污染现状调研[J]. 宁夏党校学报, 2006, 8(5): 81-84.
- [4] 何进勤, 雷金银, 赵营, 等. 施肥对马铃薯淀粉废水灌溉农田的培肥效应[J]. 中国农学通报, 2018, 34(36): 18-24.
- [5] 李晓婷, 刘刚, 王天宁, 等. 马铃薯淀粉加工废水还田对土壤氮磷钾迁移转化的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(17): 91-96, 111.
- [6] 赵博超, 王雪婷, 窦广玉, 等. 马铃薯淀粉加工废水还田利用对土壤养分及重金属的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 666-671.
- [7] 方海军, 杨晓明, 刘秉义, 等. 宁夏南部山区马铃薯淀粉加工废水农业利用试验[J]. 农业科学研究, 2010, 31(1): 36-39, 43.
- [8] 邓冬梅, 邱玉龙, 王银杏, 等. 酸性矿石废水短期污染对水稻土的影响[J]. 土壤, 2016, 48(4): 754-761.
- [9] 裴亮. 污水灌溉对土壤质量的影响研究进展[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 61-64.
- [10] 冯绍元, 齐志明, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对冬小麦生长发育影响的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 11-14.
- [11] 卢再亮, 刘兆东, 李九玉, 等. 炭化生活污水污泥对酸化红壤的改良效果[J]. 土壤, 2015, 47(2): 408-413.
- [12] 胡慧蓉, 王海龙, Katie Beecroft, 等. 污水灌溉对林地土壤中磷的数量与形态影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 560-566.
- [13] 翟由涛, 杭小帅, 干方群. 改性高岭土对废水中磷的吸附性能及机理研究[J]. 土壤, 2012, 44(1): 55-61.
- [14] Lee S, Yang K, Hwang S. Use of response surface analysis in selective bioconversion of starch wastewater to acetic acid using a mixed culture of anaerobes[J]. Process Biochemistry, 2004, 39(9): 1131-1135.
- [15] 姜翠玲, 夏自强, 刘凌, 等. 污水灌溉土壤及地下水三氮的变化动态分析[J]. 水科学进展, 1997, 8(2): 183-188.
- [16] 张贝贝, 刘文洪, 李俊峰, 等. 山核桃加工废水的成分测定与分析[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 150-156.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [18] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2001: 80-83.

- [19] Castro E, Mañas M P, De Las Heras J. Effects of wastewater irrigation on soil properties and turfgrass growth[J]. *Water Science and Technology*, 2011, 63(8): 1678–1688.
- [20] Krause S M B, Dohrmann A B, Gillor O, et al. Soil properties and habitats determine the response of bacterial communities to agricultural wastewater irrigation[J]. *Pedosphere*, 2020, 30(1): 146–158.
- [21] 宰松梅, 王朝辉, 庞鸿宾. 污水灌溉的现状与展望[J]. *土壤*, 2006, 38(6): 805–813.
- [22] 黄爽, 张仁铎, 程晓如, 等. 石家庄污灌区污水灌溉技术的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(5): 29–34.
- [23] Marzec H. Changes in Chemical Composition of Soils as a Result of Irrigation with Potato Starch Waste Water Chemistry for the Protection of the Environment, 1991: 235–239.
- [24] 郭晓明, 马腾, 陈柳竹, 等. 污水灌溉区土壤肥力及酶活性特征研究[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 78–83.
- [25] 白璐, 于大洋, 张诗海, 等. 造纸废水灌溉对滨海盐碱退化湿地土壤中微生物的影响[J]. *环境工程*, 2015, 33(S1): 272–276, 318.
- [26] 商冉, 李光德, 曲衍波, 等. 啤酒废水灌溉对土壤微生物区系的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(27): 8586–8588, 8629.
- [27] Daneshvar M, Fattahi F, Rahmani H R, et al. Effect of municipal wastewater irrigation and well water on plant and soil characteristics[J]. *Notulae Scientia Biologicae*, 2020, 12(2): 409–419.
- [28] 夏伟立, 罗安程, 周焱, 等. 污水处理后灌溉对蔬菜产量、品质和养分吸收的影响[J]. *科技通报*, 2005, 21(1): 79–83.
- [29] 齐志明, 冯绍元, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对夏玉米生长影响的田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 36–38.