文章编号:1000-7601(2025)04-0091-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.04.10

不同浓度淀粉加工废水还田对土壤物理性状及马铃薯产量的影响

闫承宏,袁安明,杨建禄,张丽娟,史晓鹏,张小静,唐彩梅

(定西市农业科学研究院,甘肃 定西 743000)

摘 要:为解决甘肃省马铃薯产业淀粉加工废水排放难题,以马铃薯‘14W-5’为供试材料,于 2023—2024 年设置 7 个灌溉处理(CK:清水;T1~T6:马铃薯淀粉加工废水 150、300、600、900、1 200、1 500 $m^3 \cdot hm^{-2}$),研究淀粉加工废水还田对土壤物理性状及马铃薯产量的影响。结果表明:(1)淀粉加工废水还田明显影响土壤含水率。与 CK 相比,灌溉 1 a 淀粉加工废水还田整体增加了 0~20 cm 土层土壤含水率,增幅为 0.75%~3.76%;灌溉 2 a 均不同程度增加了 0~30 cm 土层土壤含水率,增幅为0.06%~4.17%。(2)淀粉加工废水还田可促进 0~30 cm 土层土壤中≥5 mm 及 2~5 mm 粒级机械稳定性大团聚体的形成,并降低<0.25 mm 粒级水稳性微团聚体含量占比。随灌溉年限增加,淀粉加工废水对改善土壤物理性状的积极影响由 0~20 cm 土层扩展至 0~30 cm 土层。(3)废水还田量低于 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 时可实现马铃薯增产且保持较高的商品薯率,还田量高于 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 时马铃薯块茎田间腐烂率明显升高。灌溉 1 a 和灌溉 2 a 条件下 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 淀粉加工废水还田量处理分别较对照显著增产 73.09%和 17.84%,商品薯率分别显著提高 39.65%和 19.37%。综上,淀粉加工废水还田对改善土壤性能和提升马铃薯产量具有积极作用,废水还田阈值不超过 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$,一定程度上可实现甘肃省马铃薯产业节本增效。

关键词:马铃薯;淀粉加工废水;废弃物资源化利用;土壤物理性状;产量

中图分类号:S532;S145.2 **文献标志码**:A

Effects of varying concentrations of starch processing wastewater returning on soil physical properties and potato yield

YAN Chenghong, YUAN Anming, YANG Jianlu, ZHANG Lijuan,
SHI Xiaopeng, ZHANG Xiaojing, TANG Caimei

(*Dingxi Academy of Agricultural Sciences*, *Dingxi*, *Gansu* 743000, *China*)

Abstract: To address the issue of starch processing wastewater discharge in the local potato industry of Gansu Province, the potato variety ‘14W-5’ was used as the experimental material. Seven irrigation treatments were applied in 2023-2024: CK (clear water), T1 (150 $m^3 \cdot hm^{-2}$ of potato starch processing wastewater), T2 (300 $m^3 \cdot hm^{-2}$), T3 (600 $m^3 \cdot hm^{-2}$), T4 (900 $m^3 \cdot hm^{-2}$), T5 (1 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$), and T6 (1 500 $m^3 \cdot hm^{-2}$). The study aimed to investigate the effects of returning starch processing wastewater to the field on soil physical properties and potato yield. The research results showed that: (1) Starch processing wastewater returning significantly affected soil water content. Compared with the control, the moisture content of 0~20 cm soil layer was increased by 0.75% to 3.76% after returning starch processing wastewater to the field in the first year of irrigation, and the moisture content of 0~30 cm soil layer was increased in different degrees in the second year of irrigation, with the increase rate of 0.06% to 4.17%. (2) Starch processing wastewater returning promoted the formation of ≥5 mm and 2~5 mm mechanically stable macroaggregates in 0~30 cm soil layer and reduced the proportion of <0.25 mm water-stable microaggregates. With the increase of irrigation years, the positive effect of starch processing wastewater on im-

收稿日期:2024-04-17 **修回日期**:2024-06-18

基金项目:甘肃省科技厅乡村振兴专项(25CXNJ019);定西市科技重点技术攻关专项(DX2023AZ17)

作者简介:闫承宏(1995-),女,甘肃通渭人,硕士研究生,研究方向为作物高产高效栽培。E-mail:3196336624@qq.com

通信作者:张小静(1981-),女,甘肃定西人,研究员,主要从事旱作农业栽培研究。E-mail:zhangxj_123@163.com

唐彩梅(1975-),女,甘肃漳县人,高级农艺师,主要从事旱作农业栽培研究。E-mail:996380410@qq.com

proving soil physical properties expanded from 0~20 cm soil layer to 0~30 cm soil layer. (3) When the amount of wastewater returning to the field was less than 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$, the yield-increasing effect was sustained and significant, and the commercial potato rate was maintained at a high level. When the amount of wastewater returning to the field was higher than 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$, the field rot rate of potato tubers was significantly increased. When the amount of starch processing wastewater returning to the field was 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$, the yield of irrigation for 1 year and 2 years was significantly increased by 73.09% and 17.84%, respectively, compared with the control, and the potato commodity rate was significantly increased by 39.65% and 19.37%, respectively. It is evident that the return of starch processing wastewater to the field has a positive effect on improving soil properties and crop yield. It is recommended that the application threshold for local potato starch processing wastewater should not exceed 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$, which can help achieve cost savings and enhance efficiency of potato industry in Gansu Province to a certain extent.

Keywords: potatoes; starch processing wastewater; waste resource utilization; soil physical property; yield

马铃薯具有适应性强、营养成分全、耐储藏等特点,是重要的宜粮、宜菜和宜做工业原料的作物。定西市位于甘肃省中部,其特殊的土壤和气候条件极适合性喜冷凉的马铃薯生长,是中国马铃薯最佳适种区之一[1]。作为定西市的战略性主导产品和支柱性产业,近年来该地区马铃薯种植面积长期稳定在20万 hm^2 以上,产量超过500万 t[2],全力培育打造的区域公用品牌“定西宽粉”,加工企业年产能达54.16万 t[3],马铃薯精深加工已成为定西市马铃薯产业发展的主要延链产业。与此同时,淀粉加工废水的污染及资源化利用问题也日益突出。因此,亟需一种经济可行且合理有效的方法处置马铃薯淀粉加工废水。

马铃薯淀粉加工废水的主要成分为马铃薯细胞液,是一种含有较高浓度蛋白质、糖类、纤维素和氮、磷、钾等营养元素的有机液体,富含土壤和农作物生长所需的营养成分[4-5],属于具有重要再利用价值的肥水资源。此外,淀粉加工废水中的有毒有害成分大都低于国家标准[6]。雷金银等[7]研究表明,淀粉加工废水还田并配套合理的施肥管理策略,可增加土壤养分并提高微生物活性,促进玉米生长发育,显著提高作物产量。张雪梅等[8]研究发现,将经过适当预处理的淀粉加工废水直接灌溉水稻,稻米品质较好且具有较高的营养价值。何进勤等[9]发现,在连续3 a灌溉淀粉加工废水的土壤上种植青贮玉米,不施任何肥料即能保证产量。贾渊超等[10]研究认为,300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 灌溉量可促进苜蓿氮、磷、钾积累量的增加并对提高土壤养分具有积极意义。可见,马铃薯淀粉加工废水还田不仅贴合各区域实际需求,更能激发肥料效应潜能。

肥力作为土壤的本质属性,是土壤物理学、化学和生物学性质的综合反映。现阶段针对淀粉加工废水还田的研究热点主要集中在其对氮、磷等土壤化学养分的影响,而在土壤基础物理特性方面鲜有研究。基于此,本研究拟通过分析连续2 a不同浓度淀粉加工废水还田对土壤含水率、容重、团聚体稳定性等物理性状及马铃薯产量相关性状的影响,明确淀粉加工废水的最佳还田量,以期为当地马铃薯产业绿色健康循环发展提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2023—2024年在甘肃省定西市农业科学院试验基地(35°42′N,104°50′E,海拔1 900 m)开展,该地区属温带半干旱气候,全年日照时数2 476.6 h,年均太阳辐射592.9 kJ·cm^{-2},年均气温6.4℃,≥0℃年积温2 933.5℃,年均降水量400 mm,主要集中在7—9月份,年潜在蒸发量约为降水量的4倍,气候干燥,无霜期平均140 d,属于典型的半干旱雨养农业区。试验地为开垦荒地,无前茬作物,较为平坦无大起伏,土壤类型为砂质黏土,其主要理化性质见表1。

1.2 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,设置7个处理(表2),各处理3次重复,共21个小区,小区面积为40 m^2(5 m×8 m)。供试马铃薯为乌克兰引进品种‘14W-5’,由定西市农业科学研究院旱地农业综合研究所提供。2023年和2024年马铃薯分别于4月19日和4月24日播种,于8月23日和9月16日收获,采用大垄双行种植模式,垄宽0.6 m,垄高0.3 m,株距25 cm,使用宽120 cm、厚0.012 mm的黑色地

表 1　供试土壤基础理化性质

Table 1　Basic physical and chemical properties of tested soil

深度 Depth/cm	pH	有机质 Organic matter /(g·kg^{-1})	碱解氮 Alkaline hydrolysis nitrogen /(mg·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus /(mg·kg^{-1})	速效钾 Rapidly available potassium /(mg·kg^{-1})
0~10	9.10	7.64	63.6	10.67	448.51
10~20	8.95	6.92	58.1	8.17	458.98
20~30	9.20	6.51	47.3	9.65	458.20

表 2　试验设计

Table 2　Experimental design

处理 Treatment	处理描述 Processing description
CK	播种前冬灌清水 1 500 m^3·hm^{-2} Irrigation water 1 500 m^3·hm^{-2} in winter before sowing
T1	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 150 m^3·hm^{-2}(清水 1 350 m^3·hm^{-2}补足) Winter irrigation of potato starch processing wastewater 150 m^3·hm^{-2}(water 1 350 m^3·hm^{-2}) before sowing
T2	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 300 m^3·hm^{-2}(清水 1 200 m^3·hm^{-2}补足) Winter irrigation of potato starch processing wastewater 300 m^3·hm^{-2}(water 1 200 m^3·hm^{-2}) before sowing
T3	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 600 m^3·hm^{-2}(清水 900 m^3·hm^{-2}补足) Winter irrigation of potato starch processing wastewater 600 m^3·hm^{-2}(water 900 m^3·hm^{-2}) before sowing
T4	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 900 m^3·hm^{-2}(清水 600 m^3·hm^{-2}补足) Winter irrigation of potato starch processing wastewater 900 m^3·hm^{-2}(water 600 m^3·hm^{-2}) before sowing
T5	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 1 200 m^3·hm^{-2}(清水 300 m^3·hm^{-2}补足) Winter irrigation of potato starch processing wastewater 1 200 m^3·hm^{-2}(water 300 m^3·hm^{-2}) before sowing
T6	播种前冬灌马铃薯淀粉加工废水 1 500 m^3·hm^{-2} Irrigation of potato starch processing wastewater 1 500 m^3·hm^{-2} before sowing in winter

膜覆盖于垄上。生育期施肥量为尿素(含 N 46%)198 kg·hm^{-2}、磷酸二铵(含 P_2O_5 12%)244.4 kg·hm^{-2}、硫酸钾镁(含 K_2O 24%)705 kg·hm^{-2},混合均匀后以基肥形式一次性施入。马铃薯全生育期内及时拔除杂草,不再灌水,其余管理措施同当地大田。

1.3　样品采集与指标测定

1.3.1　土壤物理性状测定　马铃薯收获后,用环刀自上而下分别采集 0~10、10~20、20~30 cm 土层土壤样品,采用烘干法测定土壤含水率,环刀法测定土壤容重,并计算孔隙度。同时在各小区采集 0~10、10~20、20~30 cm 土层原状土壤约 500 g,除去砾石、植物根系等杂物,沿裂隙掰成直径 1 cm 左右的小土块后自然风干。采用干筛法测定土壤机械稳定性团聚体含量,湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量[11]。

1.3.2　马铃薯不同生育时期干物质量测定　在马铃薯关键生育时期(块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期),各处理随机选取完整植株 5 株,用水果刀将根系、茎叶、块茎单独分离,冲洗干净后用滤纸吸干水分,分别装入档案袋中,105℃杀青 30 min,80℃烘干至恒重,称量各器官干物质量。

1.3.3　马铃薯产量指标测定　在马铃薯收获期,各小区随机取 15 株样品进行室内考种,分别调查大薯(>150 g)、中薯(75~150 g)、小薯(<75 g)的个数并称重,计算商品薯率。收获时取小区中段 9.6 m^2 样方测实产,取 3 次重复的平均值折算每公顷产量。

商品薯率=小区内 75 g 以上块茎质量/小区全部块茎质量×100%

1.4　数据处理

使用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 25.0 软件进行数据统计整理和分析,Origin 2018 软件进行绘图。采用 LSD 法进行差异显著性检验($\alpha=0.05$),试验数据以平均值±标准差形式表示。

2　结果与分析

2.1　不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤物理性状的影响

2.1.1　不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤含水率的影响　如图 1 所示,2023 年土壤含水率整体高于 2024 年,前者土壤含水率随废水还田量的增加呈先升后降再升的趋势,后者则表现为先升后降。与清水灌溉相比,2023 年淀粉加工废水还田对 0~20 cm 土层土壤含水率有提升作用,2024 年则显著增加 0~30 cm 土层土壤含水率。

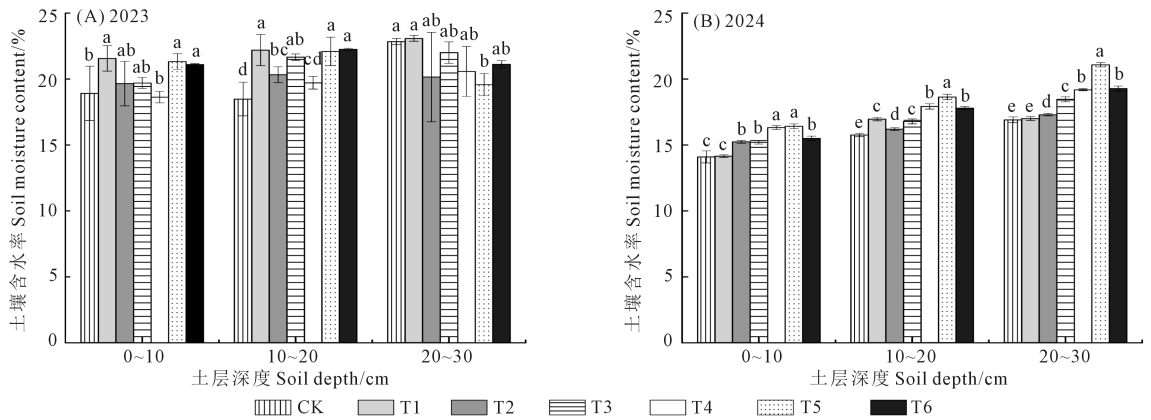
2023 年,0~10 cm 土层,相较于 CK,T1、T5、T6

处理土壤含水率明显增加,增幅分别为 2.65%、2.41%和 2.19%,T1 处理最高,3 个处理间无显著差异;10~20 cm 土层,T1、T5、T6 处理土壤含水率分别较 CK 显著提高 3.71%、3.61%和 3.76%,T6 处理最高,3 个处理间差异不显著;20~30 cm 土层,T5 处理较 CK 显著降低 14.27%,其他各处理间均无显著差异(图 1A)。

2024 年,0~10、10~20、20~30 cm 各土层的土壤含水率变化趋势基本一致,均随废水还田量的增加呈先升后降的趋势,不同土层均以 T5 处理土壤含水率增加最显著。由图 1B 可知,0~10 cm 土层,T1 与 CK、T2 与 T3、T4 与 T5 处理间差异不显著,T2、T3、T4、T5、T6 分别较 CK 显著增加 8.09%、7.80%、15.74%、16.45%、10.00%;10~20 cm 土层,T1 与 T3、T4 与 T6 处理间差异不显著,T1、T2、T3、T4、T5、T6 分别较 CK 显著增加 7.61%、2.86%、6.54%、13.71%、18.27%、12.94%;20~30 cm 土层,T1 与 CK、T4 与 T6 处理间差异不显著,T2、T3、T4、T5、T6 分别较 CK 显著增加 2.31%、9.23%、13.48%、24.66%、14.02%。

2.1.2 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤容重的影响 如图 2 所示,在不同浓度废水还田处理作用下,2023 年土壤容重略有波动,2024 年则基本无变化。由图 2A 可知,2023 年,与清水灌溉相比,淀粉加工废水还田 0~20 cm 土层土壤容重有不同程度变化,20~30 cm 土层则基本不受影响。0~10 cm 土层,T1 处理土壤容重较 CK 显著降低 13.35%;10~20 cm 土层,T2、T5、T6 处理土壤容重均较 CK 显著降低,其中 T5 处理降幅最大,降幅为 9.46%,3 个处理间差异不显著。由图 2B 可知,0~30 cm 不同土层处各处理间土壤容重均无显著差异。

2.1.3 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤孔隙度的影响 如图 3 所示,在不同浓度废水还田处理作用下,2023 年土壤孔隙度有一定波动,2024 年则基本无变化。2023 年,与清水灌溉相比,淀粉加工废水还田 0~20 cm 土层土壤孔隙度有不同程度



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments ($P<0.05$). The same below.

图 1 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤含水率的影响

Fig.1 Effects of different concentration gradients of starch processing wastwater returing on soil moisture content

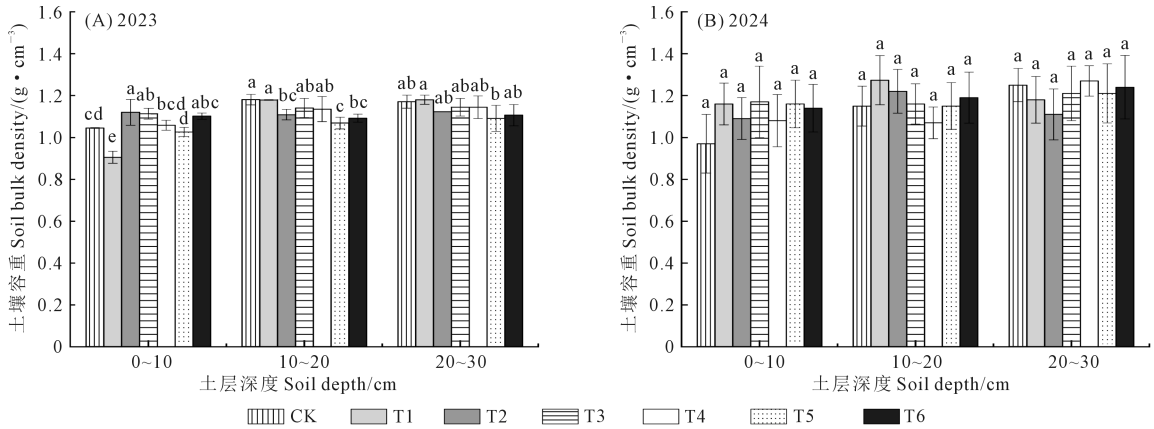


图 2 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤容重的影响

Fig.2 Effects of different concentration gradients of starch processing wastwater returning on soil bulk density

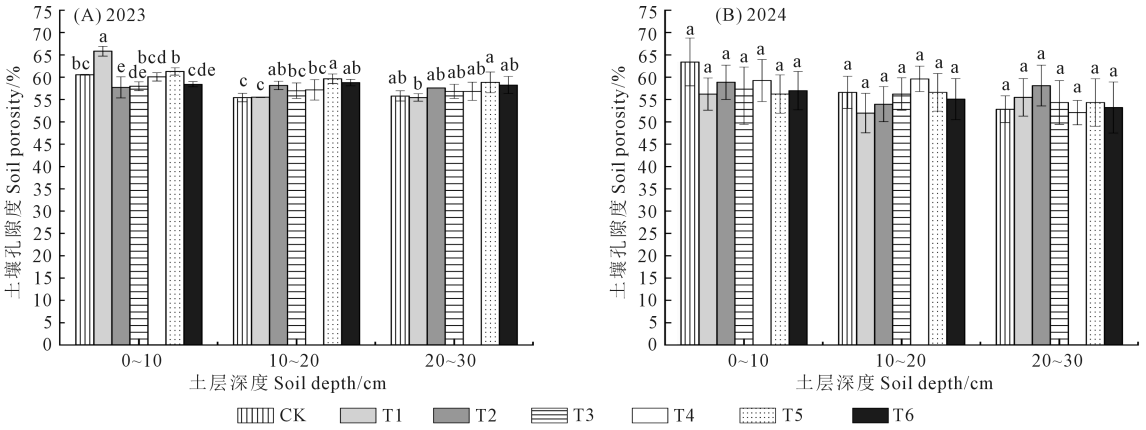


图 3　不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤孔隙度的影响

Fig.3　Effects of different concentration gradients of starch processing wastwater returning on soil porosity

变化,20~30 cm 土层基本不受影响。0~10 cm 土层,与 CK 相比,T1 处理土壤孔隙度显著增加 5.27%,其他各处理则表现为明显减小趋势或差异不显著;10~20 cm 土层,各淀粉加工废水还田处理土壤孔隙度均较 CK 有所增加,T2、T5、T6 处理增幅最大,分别为 2.70%、4.22%、3.35%,3 个处理间差异不显著(图 3A)。0~30 cm 不同土层各处理间土壤孔隙度均无显著差异(图 3B)。

2.1.4　不同梯度浓度淀粉加工废水还田对土壤机械稳定性团聚体粒径分布的影响　如图 4 所示,2023—2024 年,淀粉加工废水还田对 0~30 cm 土层土壤机械稳定性团聚体有显著影响,各处理整体上表现为以>5 mm 粒级团聚体含量最高,2~5 mm 粒级团聚体含量次之,0.25~0.5 mm 粒级团聚体含量占比最低。

由图 4A 可知,2023 年,≥5 mm 粒级团聚体含量随土层的加深整体上表现为增加趋势。0~20 cm 土层,相较于 CK,T1~T6 处理均不同程度增加了>0.25 mm 粒级团聚体含量占比,0~10 cm 土层以 T2 处理>0.25 mm 粒级团聚体含量占比最高,为 92.19%,其次分别为 T3(91.50%)和 T4(91.30%);10~20 cm 土层则以 T5 处理最高,为 90.69%,其次分别为 T6(90.60%)和 T4(89.92%)。20~30 cm 土层,各处理表现与 0~20 cm 土层相反,相较于 CK,T1~T6 处理均不同程度增加了<0.25 mm 粒级土壤团聚体含量,且该趋势随废水还田浓度增加而增加。

由图 4B 可知,2024 年,≥5 mm 和 2~5 mm 粒级团聚体含量随土层加深整体上表现为增加趋势,其他粒级含量均有所降低。0~10 cm 土层,相较于 CK,T1~T6 处理均增加了>0.25 mm 粒级团聚体含量占比,增幅分别为 1.26%、3.98%、2.70%、3.94%、3.27%、4.11%;10~20 cm 和 20~30 cm 土层,废水还田各处理变化趋势基本一致,与 CK 相比,除 T1 增加了<0.25 mm 粒级团聚体含量外,T2~T6 处理均增加≥5 mm 和 2~5 mm 粒级大团聚体含量,降低了<0.25 mm 粒级团聚体含量;T2~T6 处理 10~20 cm 和 20~30 cm 土层>0.25 mm 粒级团聚体含量分别增加 1.94%、4.50%、2.45%、3.69%、5.91%和1.13%、1.39%、1.74%、4.47%、4.77%。

2.1.5　不同梯度浓度淀粉加工废水还田对土壤水稳性团聚体粒径分布的影响　如图 5 所示,2023—2024 年,淀粉加工废水还田对 0~30 cm 土层土壤水稳性团聚体分布有显著影响,各处理整体均表现为<0.25 mm 粒级团聚体含量占比最高,>2 mm 粒级团聚体含量占比最低。<0.25 mm 粒级团聚体含量随土层的加深整体上表现出增加趋势,其他各粒级团聚体含量整体上表现为降低趋势。

由图 5A 可知,2023 年,相较于 CK,0~20 cm 土层 T1~T6 处理均不同程度降低了<0.25 mm 粒级团聚体含量,0~10 cm 土层各处理分别降低13.49%、8.16%、18.75%、25.20%、27.42%、14.92%;10~20 cm 土层,与 CK 相比,除 T3 处理<0.25 mm 粒级团聚体占比增加 5.70%外,T1、T2、T4、T5、T6 处理均降低,降幅分别为 13.61%、16.82%、25.71%、34.61%、31.22%。20~30 cm 土层,与 CK 相比,T1 和 T4 处理<0.25 mm 粒级团聚体占比分别降低2.02%和 21.83%。

由图 5B 可知,2024 年,T1~T6 处理均较 CK 降低了不同土层<0.25 mm 粒级团聚体含量占比。与 CK 相比,T1~T6 处理 0~10 cm 土层<0.25 mm 粒级团聚体占比分别降低 7.87%、14.39%、28.15%、28.07%、32.42%、30.05%,10~20 cm 土层分别降低 3.47%、20.19%、38.85%、26.28%、43.70%、46.97%,20~30 cm 土层分别降低10.66%、27.37%、40.74%、35.10%、55.41%、51.90%。

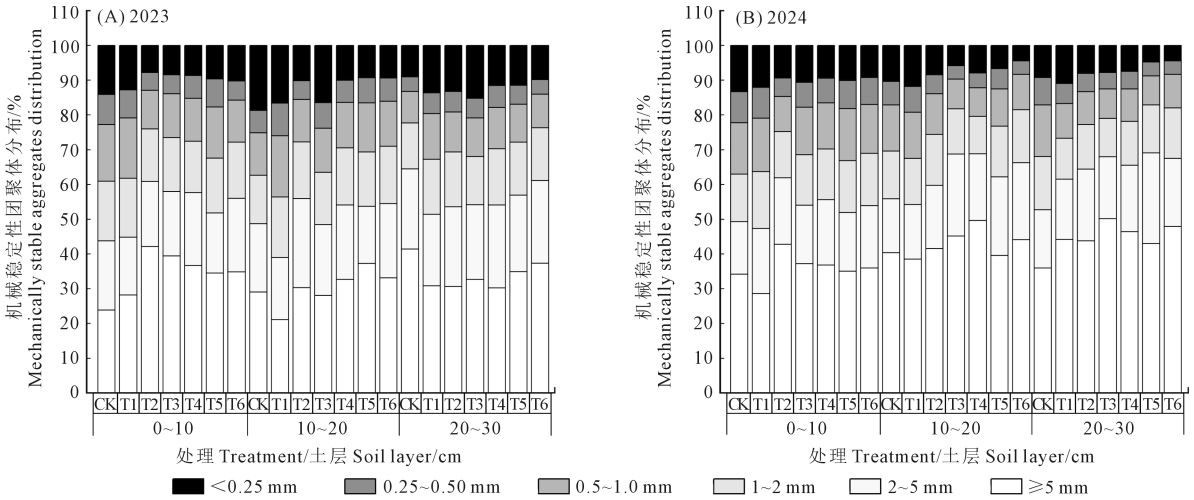


图 4 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤机械稳定性团聚体分布的影响

Fig.4 Effects of different concentrations gradient of starch processing wastwater returning on the distribution of soil mechanically stable aggregates

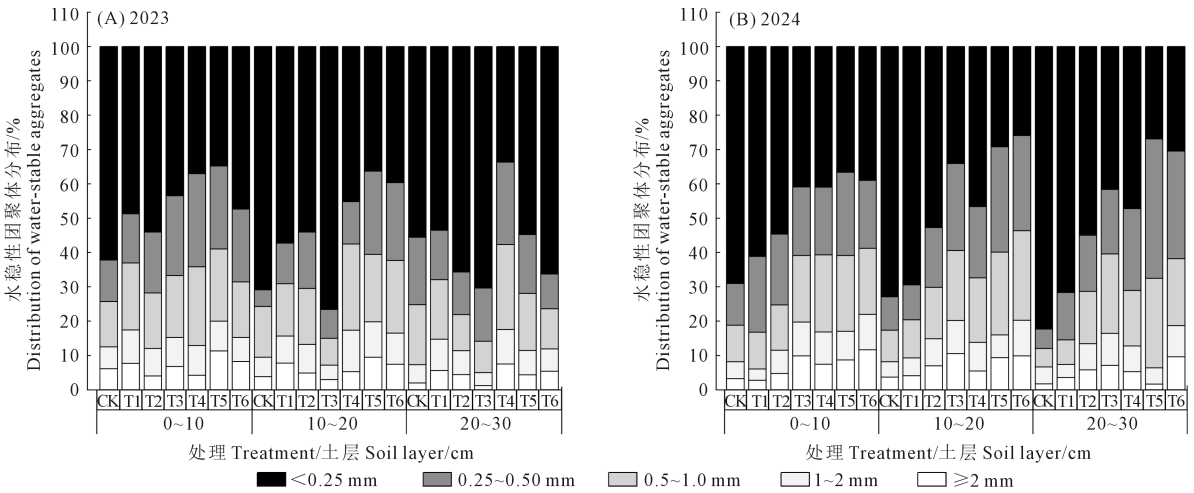


图 5 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对土壤水稳性团聚体分布的影响

Fig.5 Effects of different concentrations gradient of starch processing wastwater returning on the distribution of soil water-stable aggregates

2.2 不同浓度梯度淀粉加工废水还田对马铃薯干物质分配的影响

如图 6 所示,同一时期在不同浓度梯度淀粉加工废水还田处理下,2024 年马铃薯块茎干物质量占比高于 2023 年。随马铃薯生育时期的推进,各处理整体上表现为根系和茎叶干物质量占比逐渐降低,块茎占比逐渐增加;同一生育时期内,不同处理间马铃薯干物质分配有一定差异。

2023 年,在马铃薯块茎形成期,与 CK 相比,T2 处理根系干物质占比下降1.11%;处理间茎叶和块茎干物质占比均无显著差异(图 6A)。在块茎增长期,根系干物质占比未受淀粉加工废水还田的影响;T1、T3 处理茎叶干物质占比分别较 CK 显著降低 18.28%、14.73%,其他各处理与 CK 间均无显著差异;马铃薯块茎干物质分配比例表现有所不同,与 CK 相比,T5、T6 处理块茎干物质占比不显著降低,其他处理块茎干物质占比均升高,其中 T1 和 T3 处理分别显著升高 18.62%和 15.39%(图 6B)。在淀粉积累期,各处理间马铃薯根系、茎叶、块茎干物质占比均无显著差异(图 6C)。

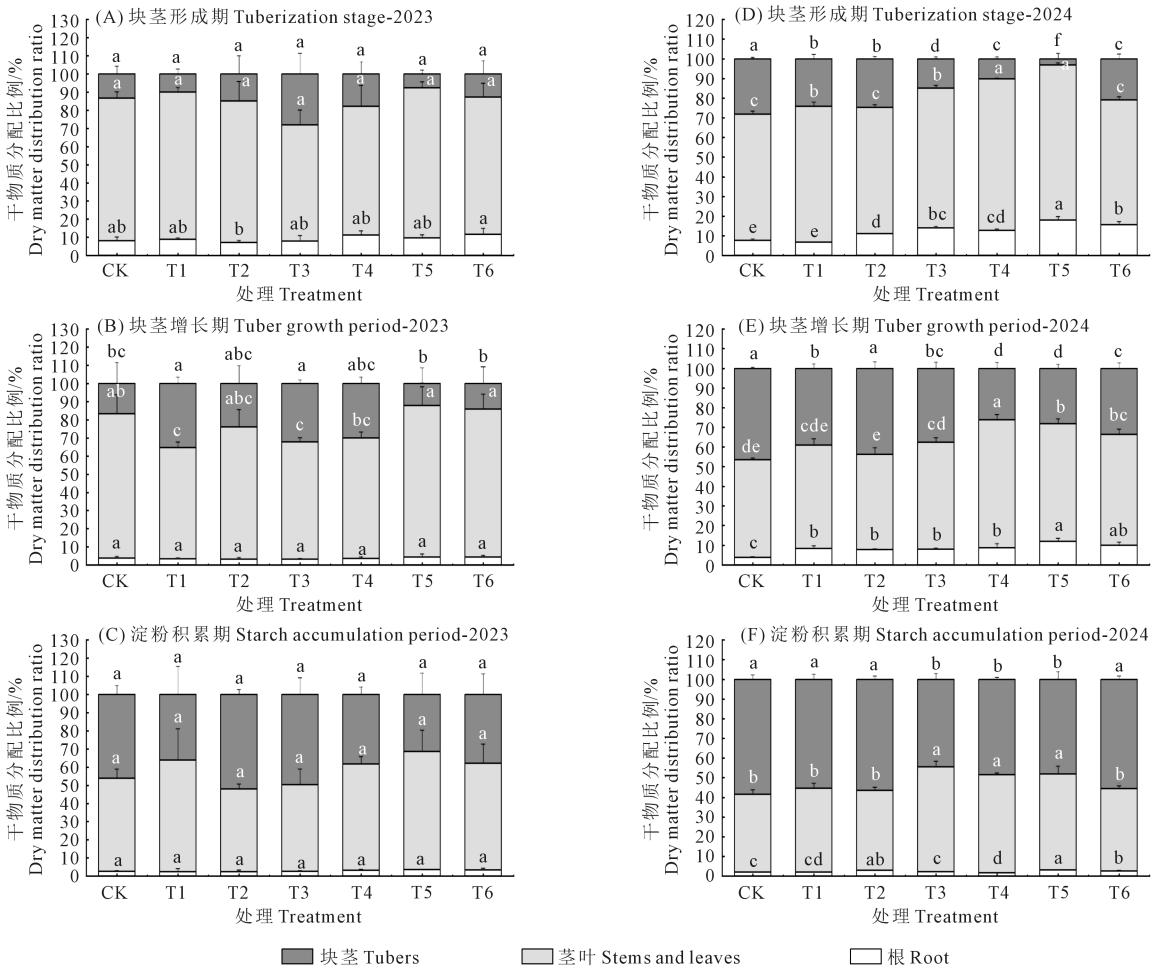
2024 年,在马铃薯块茎形成期,与 CK 相比,T2~T6 处理根系干物质占比分别显著增加 3.30%、6.23%、4.94%、10.33%、7.82%;T1、T3、T4、T5 处理茎叶干物质占比分别显著增加 4.98%、6.91%、12.94%、14.62%;T1~T6 处理块茎干物质占比则分别显著降低 4.01%、3.42%、13.12%、17.88%、24.94%、7.20%

(图 6D)。在块茎增长期,各处理根系和茎叶干物质占比变化规律基本与前期一致,T1~T6 处理根系、茎叶干物质占比整体高于 CK,但 T1、T3、T4、T5、T6 处理均较 CK 显著降低(图 6E)。在马铃薯淀粉积累期,与 CK 相比,T2、T5、T6 处理根系干物质占比分别显著增加 0.80%、0.93%、0.50%,T4 处理则显著降低0.36%;茎叶干物质占比方面,T1、T2、T6 处理与 CK 无显著差异,T3、T4、T5 处理分别显著增加 13.71%、10.18%、9.39%,T3、T4、T5 处理间差异不显著;与 CK 相比,T1、T2、T6 处理块茎干物质占比无显著变化,T3、T4、T5 处理分别显著降低 13.88%、9.82%、10.31%(图 6F)。

2.3　不同浓度梯度淀粉加工废水还田对马铃薯产量的影响

2023 年,随废水还田浓度的增加,马铃薯产量和商品薯率均呈现出先升高后降低趋势,烂薯率则先降低后升高(表 3)。相较于 CK,T1、T2 处理分别显著增产 40.71%、73.09%,其他各处理则表现为不同程度的减产。各废水还田处理下马铃薯商品薯率均高于 CK,其中 T1、T2、T3 处理分别显著提高 29.16%、39.65%、36.38%。与 CK 相比,T1、T2、T5 处理马铃薯烂薯率分别下降 0.14%、1.39%、0.67%,T3、T4、T6 处理分别提高 2.27%、1.32%、1.22%,但各处理间差异不显著。

2024 年,随废水还田浓度的增加,马铃薯产量和商品薯率均呈先升高后降低趋势,烂薯率则呈“M”型变化趋势(表 3)。与 CK 相比,T2 处理显著增产 17.84%,T4、T5 处理分别减产 24.55%、39.66%。各废水还田处理下马铃薯商品薯率均高于 CK,其中 T1、T2、T3 处理分别显著提高 18.50%、19.37%、19.54%。T1、T4、T5、T6 处理烂薯率分别较 CK 显著提高 2.01%、10.14%、9.95%、4.16%。



注:不同小写字母表示相同器官下不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same organ ($P<0.05$).

图 6　不同浓度淀粉加工废水还田对马铃薯干物质分配比例的影响

Fig.6　Effects of different concentrations of starch processing wastwater returning on the proportion of dry matter distribution of potato

表3 不同浓度淀粉加工废水还田对马铃薯产量及商品薯率的影响

Table 3 Effects of different concentrations of starch processing wastwater returning on potato yield and commodity rate

年份 Year	处理 Treatment	产量 Yield /(kg·hm^{-2})	商品薯率 Commodity rate/%	烂薯率 Rotten tuber percentage/%
2023	CK	22095.14±788.62b	41.55±5.54b	6.88±1.41a
	T1	31089.58±4814.96a	70.71±7.51a	6.74±3.57a
	T2	38245.14±6316.34a	81.20±4.09a	5.49±2.55a
	T3	20355.14±3312.75b	77.93±7.17a	9.15±4.75a
	T4	16184.72±327.12b	54.97±5.23ab	8.20±0.69a
	T5	17000.00±1116.89b	64.10±6.94ab	6.21±2.54a
	T6	19779.86±1891.98b	60.48±14.52ab	8.10±6.62a
2024	CK	35195.83±3713.08bc	56.92±2.83b	3.33±0.26de
	T1	39512.50±3292.33ab	75.42±9.65a	5.34±0.69c
	T2	41476.39±2389.05a	76.29±6.86a	2.93±0.55e
	T3	30341.67±3358.05cd	76.46±12.25a	4.09±0.42d
	T4	26556.94±1428.75de	66.16±6.26ab	13.47±0.16a
	T5	21237.50±3925.09e	59.84±9.16b	13.28±0.50a
	T6	34215.28±3456.11bc	64.50±5.73ab	7.49±0.64b

注:同列不同小写字母表示处理间差异达显著水平(P<0.05)

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between treatments (P<0.05).

3 讨 论

3.1 不同浓度淀粉加工废水还田对土壤物理性状的影响

土壤含水量不仅决定土壤的宜耕性,同时关系到作物的正常生长发育[12],容重与孔隙度常用来表征土壤透气性和传输土壤水能力[13];而团聚体在维持土壤结构、土壤肥力和稳定性及对土壤关键养分的保护方面起重要作用[14]。方海军等[15]在宁南山区的试验发现,冬灌马铃薯加工废水可改善0~30 cm土层土壤理化性质,提高土壤肥力水平。本研究表明,2023年淀粉加工废水还田影响0~20 cm土层土壤物理性状,2024年则影响0~30 cm土层土壤物理性状。这与前人结论略有不同,可能是因为淀粉加工废水属高浓度有机废水,质地相对粘稠且养分密集,故试验初始时(2023年)水分下渗缓慢,而2024年在降水、灌溉及人为耕作等多重因素作用下,淀粉加工废水携带有机胶结物质向土壤更深处淋溶,使得土质更为稳定且均一。

本研究发现,随土层的加深,土壤含水率及容重逐渐增大,孔隙度逐渐减小;以≥5 mm粒级团聚体为主的机械稳定性大团聚体含量占比逐渐增大,<0.25 mm粒级微团聚体含量占比逐渐降低,水稳性团聚体粒径分布与之相反。这与柴仲平等[16]、刘敏等[17]、马文军等[18]、王永栋等[19]的研究结果基本相一致。团聚体一般分为大团聚体(>0.25 mm)和微团聚体(<0.25 mm)两类[20]。有研究认为,>0.25 mm大团聚体的数量通常可用来表征土壤结构的优劣,其含量和质量越高,说明土壤结构稳定性越强[21]。在本研究中,随灌溉年限增加,土壤团聚体逐渐稳定;相对于清水灌溉,各淀粉加工废水还田处理均可促进0~30 cm土层土壤中≥5 mm及2~5 mm粒级机械稳定性大团聚体的形成,并降低<0.25 mm粒级水稳性微团聚体含量占比。这说明淀粉加工废水还田可充分发挥肥效功能改善土壤物理性状,同时提高土壤团聚体稳定性,且对土壤养分有较好的固存作用。

3.2 不同浓度淀粉加工废水还田对马铃薯生长发育的影响

有研究发现,马铃薯块茎的形成和膨大取决于生育期内同化物的积累和合理再分配[22]。本试验结果表明,2023年淀粉加工废水还田主要影响马铃薯块茎增长期的干物质分配,与清水灌溉相比,淀粉加工废水还田量低于1 200 m^3·hm^{-2}可明显提高块茎干物质占比,降低茎叶干物质占比;2024年,在马铃薯块茎形成期和块茎增长期,相较于清水灌溉,不同浓度淀粉加工废水还田处理下根系、茎叶干物质占比整体提高,而块茎干物质占比降低,T1、T2、T6处理淀粉积累期块茎占比基本与CK持平。这说明淀粉加工废水处理下,在马铃薯发育前期植株根系充分吸收土壤养分并健壮茎叶,可为后期即淀粉积累期时提高块茎干物质占比奠定基础。

适宜的水肥协同效应可实现马铃薯高产[23],过量的水肥投入易延迟马铃薯发育进程,造成薯块膨胀缓慢[24],从而难以实现高产稳产。因此在马铃薯种植过程中合理的肥水效应十分关键。有研究发现,将淀粉加工废水用于灌溉农田,对作物生长和产量有明显促进作用[7]。本研究中,各处理马铃薯产量均随淀粉加工废水还田年限的增加而增加,相较于清水灌溉,低浓度的废水还田处理增产效果明显,不高于300 m^3·hm^{-2}灌溉时增产显著并且可以保持较高的商品薯率,还田量继续提高则适得其反。这与雷晓婷等[25]和赵博超等[26]的研究结论相似。本研究还发现,淀粉加工废水还田主要影响土壤含水率,且含水率随还田量的增加有升高趋势,含水率过高导致土壤质地黏重,通气性变差,造成马铃薯块茎田间腐烂,进而影响产量。

4 结 论

(1)淀粉加工废水还田显著影响土壤含水率,与清水灌溉相比,灌溉1 a条件下150、1 200、1 500 m^3·hm^{-2}灌溉量处理0~10 cm和10~20 cm土层土壤含水率分别增加2.65%、2.41%、2.19%和3.71%、

3.61%、3.76%;灌溉 2 a 条件下 0~30 cm 土层各处理土壤含水率较对照增幅明显,随废水还田量的增加呈先升后降的趋势,不同土层处以 1 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 灌溉量处理增效最显著。

(2)淀粉加工废水还田对 0~30 cm 土层土壤中>0.25 mm 大团聚体含量提升效果明显。淀粉加工废水灌溉 1 a,各处理均较对照增加了 0~20 cm 土层中>0.25 mm 粒级机械稳定性团聚体含量占比(主要为≥5 mm 及 2~5 mm 粒级),同时降低<0.25 mm 粒级水稳性团聚体含量占比;灌溉 2 a 后此有利影响范围延伸至 0~30 cm 土层。

(3)随废水还田浓度的增加,马铃薯产量和商品薯率均呈先升高后降低趋势。与清水灌溉相比,废水还田量为 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 时增产效果显著且商品薯率较高,灌溉 1 a 和 2 a 产量分别显著增加 73.09%和 17.84%,商品薯率分别显著提高 39.65%和 19.37%。

综上,马铃薯淀粉加工废水还田阈值不超过 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 时可提升甘肃省马铃薯产量,改善土壤物理性状。

参 考 文 献:

[1] 魏进堂, 李旭华, 邹金秋. 甘肃定西马铃薯及其脱毒种薯产业发展现状、存在问题与思路建议[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(6): 16-21.
WEI J T, LI X H, ZOU J Q. Development status, problems and suggestions of potato industry of Dingxi potato and its virus-free seeds in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2021, 42(6): 16-21.

[2] 吕健菲, 孙一文, 王澳雪, 等. 马铃薯产业发展的农民增收带动效应分析——以甘肃省定西市为例[J]. 中国马铃薯, 2023, 37(6): 560-572.
LV J F, SUN Y W, WANG A X, et al. Analysis of the effect of increasing farmers' income on the development of potato industry: A case study of Dingxi City, Gansu Province[J]. Chinese Potato Journal, 2023, 37(6): 560-572.

[3] 张凤娇. 定西市安定区马铃薯产业现状分析及对策研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
ZHANG F J. Analysis and countermeasures of potato industry in Anding district of Dingxi city[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.

[4] 莫钫宇. 马铃薯淀粉加工废弃物的再利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
MO F Y. Study on the reuse of potato starch processing waste[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2023.

[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.
LI X T, LIU G, WANG T N, et al. Effects of returning potato starch processing wastewater to soil on nitrogen, phosphorus, and potassium migration in soil[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020, 48(17): 91-96, 111.

[6] 马双龙. 甘薯淀粉废水厌氧处理制备液态有机肥及其对蔬菜的促生作用[D]. 开封: 河南大学, 2014.
MA S L. Making liquid organic fertilizer by anaerobic treating starch wastewater and its growth-promoting effect on vegetables[D]. Kaifeng: Henan University, 2014.

[7] 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[J]. 土壤, 2022, 54(3): 473-480.
LEI J Y, LEI X T, HE J Q, et al. Soil fertility characteristics and its response to fertilization of potato starch processing wastewater irrigation[J]. Soils, 2022, 54(3): 473-480.

[8] 张雪梅, 张玲, 高飞虎, 等. 红薯淀粉加工废水水质及其灌溉对水稻品质的影响[J]. 南方农业, 2024, 18(15): 136-139.
ZHANG X M, ZHANG L, GAO F H, et al. The water quality of sweet potato starch processing wastewater and its irrigation effect on rice quality[J]. South China Agriculture, 2024, 18(15): 136-139.

[9] 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.
HE J Q, LEI J Y, ZHAO Y, et al. Soil fertility effect of fertilization on field irrigated by potato starch wastewater[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(36): 18-24.

[10] 贾渊超, 毕江涛, 曹学海, 等. 马铃薯淀粉加工汁水灌溉对土壤养分和苜蓿生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(5): 990-998.
JIA Y C, BI J T, CAO X H, et al. Effects of potato starch processing juice on soil nutrient contents and alfalfa growth[J]. Journal of Agro-environment Science, 2022, 41(5): 990-998.

[11] 董天富, 邓志豪, 杨静, 等. 喀斯特退耕地不同植被恢复阶段土壤团聚体稳定性特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 33-42.
DONG T F, DENG Z H, YANG J, et al. Characteristics of stability of soil aggregates at different vegetation restoration stages in karst reclaimed land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 33-42.

[12] 杨学振, 葛选良, 刘晶, 等. 玉米浅埋滴灌条件下秸秆还田年限对耕层土壤物理特性的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2022, 37(4): 295-300.
YANG X Z, GE X L, LIU J, et al. Effects of straw returning years on soil physical properties of topsoil under maize shallow buried and drip irrigation[J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2022, 37(4): 295-300.

[13] 张琛, 赫有有, 薛婷婷, 等. 松嫩平原北部未开垦黑土土壤物理性状垂直变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 231-240.
ZHANG C, HE Y Y, XUE T T, et al. Vertical variation of physical properties of uncultivated black soil in northern Songnen Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 231-240.

[14] 吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 1-10.
LV X X, DING X L, ZHANG B, et al. Effects of long-term fertilization and plastic-mulching on the stability and organic carbon contents of brown soil aggregates[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(1): 1-10.

[15] 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.
FANG H J, YANG X M, LIU B Y, et al. Experiment of using the waste water from processing potato starch for agriculture in southern Ningxia[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2010, 31(1): 36-39, 43.

(下转第 131 页)