农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

马铃薯淀粉加工汁水灌溉对土壤养分和苜蓿生长的影响

贾渊超, 毕江涛, 曹学海, 孙权, 毛瑞璠, 惠治兵, 刘鹏

2022,41(5):990-998
农 业 环 境 科 学 学 报
Journal of Agro-Environment Science
2022年5月

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.

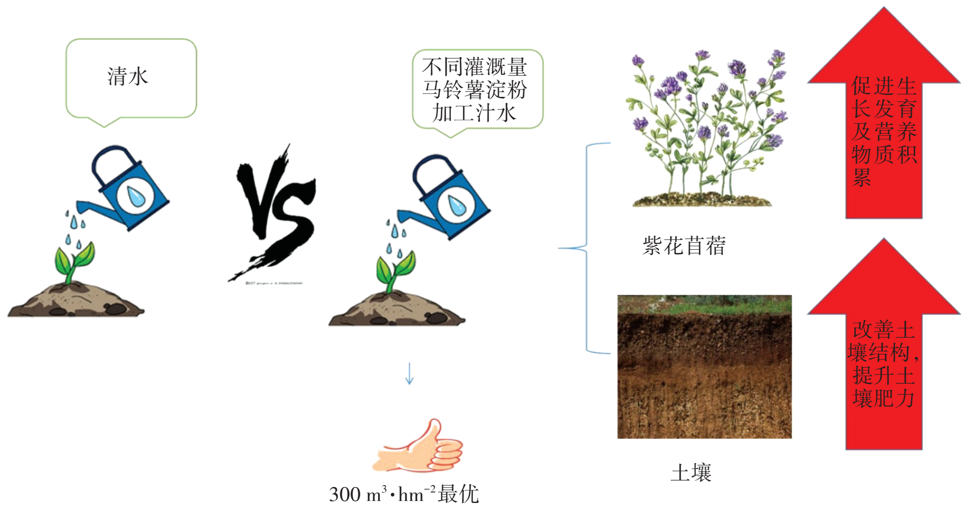
开放科学 OSID

马铃薯淀粉加工汁水灌溉对土壤养分和苜蓿生长的影响

贾渊超[1]，毕江涛[2*]，曹学海[3]，孙权[1]，毛瑞播[1]，惠治兵[1]，刘鹏[1]

(1.宁夏大学农学院，银川 750021；2.宁夏大学生态环境学院，银川 750021；3.宁夏彭阳县种子管理站，宁夏 彭阳 756599)

摘　要：为研究马铃薯淀粉加工汁水对土壤养分和苜蓿生长的影响，以紫花苜蓿为供试材料，设置5个灌溉处理，即CK：清水，T1：马铃薯淀粉加工汁水75 $m^3\cdot hm^{-2}$，T2：汁水150 $m^3\cdot hm^{-2}$，T3：汁水225 $m^3\cdot hm^{-2}$，T4：汁水300 $m^3\cdot hm^{-2}$。结果表明：不同灌溉量的马铃薯淀粉加工汁水均对提高土壤养分和苜蓿生长有促进作用。与CK处理相比，汁水灌溉量为300 $m^3\cdot hm^{-2}$时，提高土壤有机质22.25%、碱解氮46.90%、有效磷20.47%、速效钾10.01%，增加苜蓿鲜草产量160.29%、干草产量165.31%、叶绿素29.61%、粗蛋白6.97%；灌溉量为225 $m^3\cdot hm^{-2}$时，苜蓿株高增长38.06%，相对饲喂价值增加36.54%；灌溉量为75 $m^3\cdot hm^{-2}$时，粗灰分降低3.25%，粗脂肪增加0.68%。利用主成分分析并综合土壤养分与植物性状发现，300 $m^3\cdot hm^{-2}$为最优灌溉量。研究表明，马铃薯淀粉加工汁水能够提高土壤养分含量，促进苜蓿生长，是一种可以有效利用的废弃物资源。



关键词：马铃薯淀粉加工汁水；土壤养分；苜蓿；灌溉量；主成分分析

中图分类号：S541.9　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-2043(2022)05-0990-09　　doi:10.11654/jaes.2021-1124

Effects of potato starch processing juice on soil nutrient contents and alfalfa growth

JIA Yuanchao[1], BI Jiangtao[2*], CAO Xuehai[3], SUN Quan[1], MAO Ruifan[1], HUI Zhibing[1], LIU Peng[1]

(1.School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Pengyang County Seed Management Station, Pengyang 756599, China)

Abstract: This study aimed to elucidate the effects of potato starch processing juice on soil nutrient contents and alfalfa growth, and to provide a theoretical basis for the utilization of this juice as a renewable resource. In order to evaluate the effect of potato starch processing juice on soil fertility and plant growth and development, five different irrigation treatments were set up using alfalfa as test species: CK

收稿日期：2021-09-28　　**录用日期：**2021-11-30
作者简介：贾渊超(1996—)，男，内蒙古鄂尔多斯人，硕士研究生，从事环境微生物研究。E-mail:1721741064@qq.com
*__通信作者：__毕江涛　E-mail:bi_jt@nxu.edu.cn
基金项目：宁夏回族自治区重点研发项目(2019BBF02028)
Project supported: The Ningxia Hui Autonomous Region Key Research and Development Project(2019BBF02028)

(clean water), T1 (75 $m^3 \cdot hm^{-2}$), T2 (150 $m^3 \cdot hm^{-2}$), T3 (225 $m^3 \cdot hm^{-2}$), and T4 (300 $m^3 \cdot hm^{-2}$). The results showed that potato starch processed juice could promote soil nutrient accumulation and alfalfa growth in a concentration-dependent manner. Compared to the values of CK, under a juice irrigation amount of 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ the soil organic matter content, alkaline hydrolysis of nitrogen, available phosphorus content, quick-acting potassium content, fresh alfalfa yield, hay alfalfa yield, chlorophyll content, and crude protein content increased by 22.25%, 46.90%, 20.47%, 10.01%, 160.29%, 165.31%, 29.61%, and 6.97%, respectively. Moreover, at an irrigation amount of 225 $m^3 \cdot hm^{-2}$, the height of alfalfa plants increased by 38.06% and the relative feeding value by 36.54%. Finally, at an irrigation amount of 75 $m^3 \cdot hm^{-2}$, the crude ash content was reduced by 3.25% and the crude fat content was increased by 0.68%. By using principal component analysis and integrating data on soil nutrients and plant properties, an irrigation amount of 300 $m^3 \cdot hm^{-2}$ was deemed to be optimal. In conclusion, irrigation with potato starch processing juice can promote soil nutrient properties and alfalfa growth, allowing to make valuable and effective use of this waste resource.

Keywords: potato starch processing juice; soil nutrient; alfalfa; irrigation amount; principal component analysis

中国是世界上种植马铃薯面积最大的国家[1]。目前，我国已有2 000多家马铃薯淀粉生产企业，其年产量已超过1 000万t，与此同时也产生了大量的马铃薯淀粉加工汁水（每生产1 t淀粉产生9 t汁水），其主要包括马铃薯原料的清洗水、淀粉分离过程产生的细胞水、淀粉精制洗涤过程产生的洗涤水以及生产设备清洗和清洁用水[2-5]。马铃薯淀粉加工汁水COD浓度较高，含有大量蛋白质、糖类等有机物[6]，如未妥善处理而直接排入河流则会导致水面产生大量白色泡沫、水体发黑、散发恶臭，引发水体污染[7]；如直接排入土壤还会引发土壤板结等一系列问题[8]。我国马铃薯淀粉加工产业主要分布在西北、华北和东北等地区，淀粉生产集中在寒冷的冬季，生产周期不足3个月[9]，在短时间内实现大量马铃薯淀粉加工汁水的达标排放非常困难。因此，如何合理有效地处置马铃薯淀粉加工汁水成为目前的研究热点。

研究显示，马铃薯淀粉加工汁水中含有较高浓度的蛋白质、糖类、纤维素等有机物和氮、磷、钾等营养元素，其产生过程完全为物理过程，除了以马铃薯块茎和水为原料之外不添加任何有害物质，是一种具有重要利用价值的肥水资源[10-13]，如果用于农业灌溉则可以在很大程度上实现废弃物资源化利用。另有研究显示，马铃薯淀粉加工汁水灌溉农田可以明显提高土壤耕作层中有机质、全氮、有效磷和速效钾含量，土壤剖面中氮和磷元素有明显向下迁移并被矿化的趋势[14]，与未灌溉马铃薯淀粉加工汁水的农田土壤相比，重金属含量无显著差异[15]，表明马铃薯淀粉加工汁水不仅可以提高土壤肥力，而且对土壤的污染风险较小，可以进行资源化利用。

苜蓿（*Medicago sativa*）富含蛋白质、维生素等大量营养元素，被誉为“牧草之王”[16-18]。苜蓿生长过程中需要大量的氮、磷、钾养分。李天琦等[19]和许瑞轩等[20]的研究显示：连续多年种植苜蓿会大量消耗土壤中的养分，水肥结合可为苜蓿草地补充养分，并提高苜蓿蛋白质、粗纤维、粗脂肪等养分含量。宁夏马铃薯产业分布在水资源短缺的南部山区，水肥协同效率低等问题严重制约着农业生产的发展，利用马铃薯淀粉加工汁水灌溉农田不但能够实现水肥结合，有效补充土壤养分，满足植物对营养元素和水分的需求，而且可以实现废弃物资源化利用。本试验在宁南山区干旱条件下进行，通过大田试验开展马铃薯淀粉加工汁水苜蓿灌溉试验，分析不同灌溉量对土壤养分和苜蓿品质的影响，以期为马铃薯淀粉加工汁水资源化利用提供理论和实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试苜蓿品种：紫花苜蓿。

供试材料：马铃薯淀粉加工汁水由宁夏某淀粉加工企业提供，加工工艺为沉淀法。全氮0.89 $g \cdot L^{-1}$，全磷0.09 $g \cdot L^{-1}$，全钾1.24 $g \cdot L^{-1}$，氨氮0.20 $g \cdot L^{-1}$，pH 6.13，电导率2.12 $mS \cdot cm^{-1}$，多糖0.25 $mg \cdot L^{-1}$，可溶性固形物2.3%。

1.2 试验区概况

试验于2021年4月10日—8月1日在宁夏固原市彭阳县李家河（106°40′30″E、35°49′38″N）开展。试验地位于六盘山东麓黄土高原中部沟壑区，海拔1 766 m，年平均气温7.4~8.5 ℃，全年无霜期140~170 d，降水量350~550 mm，属温带大陆性气候，土壤为黄绵土，有机质14.11 $g \cdot kg^{-1}$，pH 8.56，电导率108.50 $\mu S \cdot cm^{-1}$，碱解氮119.14 $mg \cdot kg^{-1}$，有效磷90.08 $mg \cdot kg^{-1}$，速效钾172.96 $mg \cdot kg^{-1}$。

1.3 试验设计

依据文献[21],并考虑前期试验出现的烧苗现象和灌溉季节,试验设置5个灌溉处理,具体见表1。不同灌溉量的马铃薯淀粉加工汁水所含的营养成分和含水量不同,为避免因含水量不同而造成的系统误差,本试验采取等额灌溉方式,即每个处理的灌水总量为300 m^3,不足300 m^3的处理以清水进行补灌(马铃薯淀粉加工汁水+清水=300 $m^3 \cdot hm^{-2}$),以人工浇灌形式进行灌溉(下文中灌溉量均指汁水灌溉量)。每个处理设置3个重复,共15个小区,小区面积为40 m^2,小区间设置1 m保护行。分别于2021年5月20日、6月20日进行灌溉,7月21日苜蓿盛花期进行植物样品的生长和营养指标测定。各处理的田间管理(除杂草、防治病虫害等)同当地苜蓿田间管理保持一致。

1.4 测定指标及方法

土壤化学指标测定:土壤化学指标测定参照《土壤农化分析》[22]进行,其中有机质采用重铬酸钾容量法,pH采用电极法,碱解氮采用碱解扩散法,有效磷采用$NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用醋酸铵浸提火焰光度计法。

生长指标测定:苜蓿刈割前,各小区采用随机取样的方法测定苜蓿株高,测量每株从主茎距地面3 cm至主茎顶部的高度,每个小区随机测定10株,取其平均值;用SPAD 502叶绿素仪测定叶绿素含量。

产量及茎叶比测定:在苜蓿盛花期,每个小区随机选取长势均一,能代表该小区长势的1 m×1 m样方,留茬3 cm刈割,称其鲜质量,用牛皮纸袋封存带回,放置烘箱中,于105 ℃杀青30 min后,70 ℃烘干至质量恒定,称其干质量,根据干质量计算每公顷干草产量;然后将烘干草样进行茎叶分离,分别称取茎和叶的质量(花序质量计为叶片质量),计算其茎叶比。

营养成分测定[23]:将烘干草样粉碎,过0.25 mm筛,粗灰分(Crude ash)含量采用灼烧法,粗脂肪(Crude fat)含量采用索氏抽提法,粗蛋白(Crude protein)含量采用凯氏定氮法,酸性洗涤纤维(Acid detergent fiber)和中性洗涤纤维(Neutral detergent fiber)含量采用Van Soest洗涤法;相对饲喂价值(Relative feeding value)=(88.9-0.779×酸性洗涤纤维含量)×(120/中性洗涤纤维含量)/1.29

植株氮、磷、钾测定:采用H_2SO_4-H_2O_2消化-凯氏定氮法测定氮含量,采用H_2SO_4-H_2O_2消化-钼锑抗比色法测定磷含量,采用H_2SO_4-H_2O_2消化-火焰分光光度法测定钾含量。

1.5 数据处理

采用Excel 2010进行试验数据处理和计算,使用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析(LSD法)和主成分分析,使用Origin 2019做图。

2 结果与分析

2.1 马铃薯淀粉加工汁水水质评价

灌溉水水质是影响农业生产安全和环境的重要因素,《农业灌溉水质标准》(GB 5084—2021)是国家为防止土壤、地下水和农产品污染,维护生态平衡所制定的标准。在沉淀法工艺处理的马铃薯淀粉加工汁水理化性状中(表2),全盐、pH和砷、铅、汞、镉、六价铬的含量均低于《农业灌溉水质标准》,BOD和COD值均超过100 $mg \cdot L^{-1}$和200 $mg \cdot L^{-1}$的标准值,表明经沉淀法工艺处理后的马铃薯淀粉加工汁水除BOD和COD含量较高外,其余各指标均符合国家灌溉水质标准。

2.2 马铃薯淀粉加工汁水对土壤养分的影响

不同灌溉量的马铃薯淀粉加工汁水均对土壤养分产生显著影响(表3)。与CK相比,各处理土壤有机质含量均显著增加(P<0.05),增幅为12.02%~22.25%;灌溉量较高的T3和T4处理土壤pH显著降低(P<0.05),降幅为1.88%~2.71%,灌溉量较低的T1和T2处理pH虽有降低,但与CK差异不显著(P>

表1 马铃薯汁水灌溉苜蓿试验设计

Table 1 Experimental design of alfalfa irrigation with potato juice water

处理 Treatment	马铃薯淀粉加工汁水 Potato starch processing juice/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	清水 Clean water/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	折全氮用量 Total nitrogen consumption/($kg \cdot hm^{-2}$)	折全磷用量 Total phosphorus consumption/($kg \cdot hm^{-2}$)	折全钾用量 Total potassium dosage/($kg \cdot hm^{-2}$)
CK	0	300	0	0	0
T1	75	225	66.75	6.75	93
T2	150	150	133.50	13.50	186
T3	225	75	200.25	20.25	279
T4	300	0	267.00	27.00	372

表2 马铃薯淀粉加工汁水理化性状

Table 2 Physicochemical properties of potato starch processing juice

全盐 Full salt/(g·L^{-1})	pH	砷 As/(μg·L^{-1})	铅 Pb/(μg·L^{-1})	汞 Hg/(μg·L^{-1})	镉 Cd/(μg·L^{-1})	六价铬 Cr^{6+}/(μg·L^{-1})	BOD/(mg·L^{-1})	COD/(mg·L^{-1})
1.3	6.13	7.8	1.6	0.005	0.32	10.2	11 300	14 979

0.05)；土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量均随汁水灌溉量增加而增加，除T1外，各处理土壤碱解氮含量显著增加（P<0.05），增幅为9.60%~46.90%，各处理有效磷和速效钾含量均显著增加（P<0.05），分别增长11.93%~20.62%和2.78%~10.01%。由此表明，灌溉马铃薯淀粉加工汁水可有效增加土壤养分含量，提升土壤肥力。

2.3 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿株高及产量的影响

马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿株高及产量的影响显著（表4）。鲜草产量随着马铃薯淀粉加工汁水灌溉量的增加而增加，株高和干草产量表现出先增长后略有降低的趋势。与CK相比，各处理株高显著增长（P<0.05），增幅为12.86%~38.06%，其中T3增幅最大，T4次之，但二者差异不显著（P>0.05）；鲜草产量显著增加（P<0.05），增幅为33.82%~160.29%，其中灌溉量最高的T4处理增幅最大，T3次之，但二者差异不显著（P>0.05）；干草产量显著增加（P<0.05），增幅为27.03%~172.30%，其中T3增幅最大，T4次之，但二者差异不显著（P>0.05）。适量灌溉马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿株高、鲜草产量和干草产量均有促进作用，但灌溉量过多会对株高和干草产量产生抑制作用。

2.4 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿生长的影响

马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿生长的影响显著（表5）。与CK相比，T1处理苜蓿干鲜比降低，T2、T3和T4处理苜蓿增长，其中T3显著增长7.69%（P<0.05）；各处理茎叶比显著降低（P<0.05），其中T3最低，降低

表4 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿株高和产量的影响

Table 4 Effects of potato starch processing juice on alfalfa plant height and yield

试验组 Test group	株高 Plant height/cm	鲜草产量 Fresh grass yield/(kg·hm^{-2})	干草产量 Hay yield/(kg·hm^{-2})
CK	74.43±5.33c	20.35±0.92d	7.40±0.31d
T1	84.00±6.56b	27.25±2.05c	9.40±0.74c
T2	97.81±3.02a	46.70±0.1.48b	17.85±0.52b
T3	102.76±5.95a	51.85±1.90a	20.15±0.75a
T4	97.85±2.17a	53.05±3.18a	19.50±1.13a

26.42%；叶绿素含量随着马铃薯淀粉加工汁水灌溉量的增加而增长，其中T2、T3和T4处理增长显著（P<0.05），增幅为15.68%~29.61%。由此说明马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿生长起到了促进作用。

2.5 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿营养品质及相对饲喂价值的影响

从表6可以得知，马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿营养品质及相对饲喂价值具有显著影响。与CK相比，各处理粗灰分含量显著降低（P<0.05），降幅为0.75~3.25个百分点，T1降幅最大；粗脂肪含量显著增长（P<0.05），增幅为0.36~0.68个百分点，T1增幅最大；粗蛋白含量显著增长（P<0.05），增幅为3.69~6.97个百分点，T4增幅最大；各处理酸性洗涤纤维含量差异显著（P<0.05），T1最高；CK中性洗涤纤维含量最高，显著高于其他处理组（P<0.05）；各处理相对饲喂价值

表3 马铃薯淀粉加工汁水对土壤养分的影响

Table 3 Effects of potato starch processing juice on soil nutrients

试验组 Test group	有机质 Organic matter/(g·kg^{-1})	pH	电导率 Conductivity/(μS·cm^{-1})	碱解氮 Alkaline hydrolysis of nitrogen/(mg·kg^{-1})	有效磷 Available phosphorus/(mg·kg^{-1})	速效钾 Quick-acting potassium/(mg·kg^{-1})
CK	15.73±0.51d	8.50±0.05a	117.37±1.31c	118.52±1.81d	86.94±1.20d	171.59±1.74d
T1	17.62±0.31c	8.47±0.04a	107.23±0.93d	120.89±1.43d	97.31±0.84c	176.36±2.24c
T2	18.19±0.58bc	8.41±0.04ab	170.47±1.37a	129.90±4.41c	98.61±0.76c	186.03±0.66b
T3	18.69±0.29ab	8.34±0.05bc	124.70±1.15b	169.06±1.53b	102.92±0.59b	186.90±0.38ab
T4	19.23±0.54a	8.27±0.07c	104.97±0.90e	174.10±1.41a	104.87±0.44a	188.76±0.72a

注：同列数值后不同字母表示处理间差异显著（P<0.05）。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences among treatments（P<0.05）. The same below.

表5 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿生长的影响

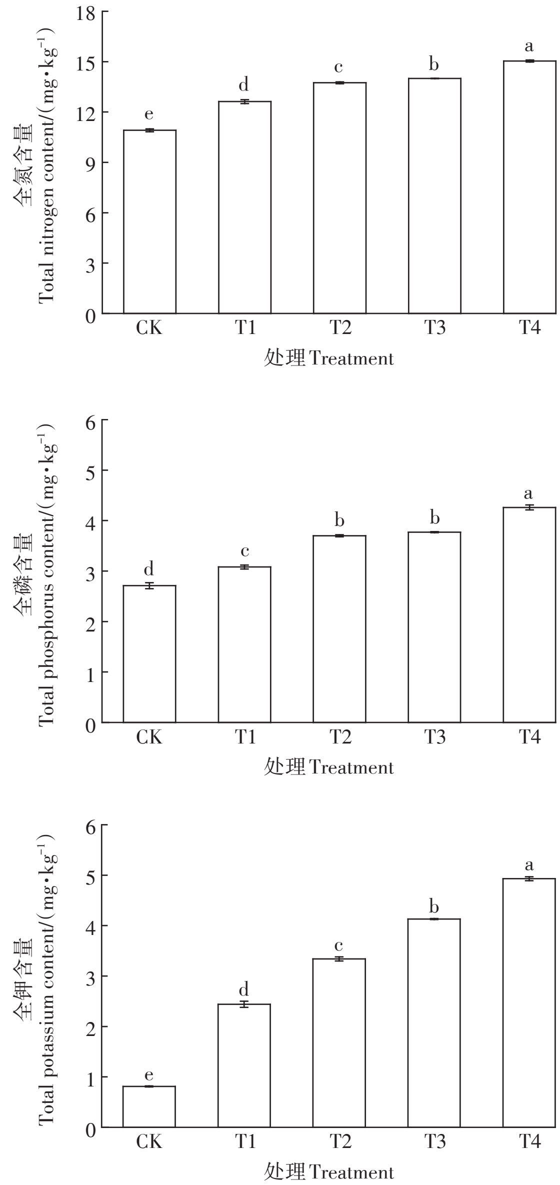
Table 5 Effects of potato starch processing juice on the growth performance of alfalfa

试验组 Test group	干鲜比 Dry to fresh ratio	茎叶比 Stem to leaf ratio	叶绿素 Chlorophyll
CK	0.36±0.02bc	2.46±0.06a	53.56±7.52c
T1	0.35±<0.01c	1.85±0.08c	58.70±6.16bc
T2	0.38±0.01ab	1.83±0.03c	61.96±0.77b
T3	0.39±0.01a	1.81±0.17c	65.04±3.76ab
T4	0.37±0.01abc	2.14±0.89b	69.42±2.40a

显著增长（P<0.05），增幅为5.41~36.54个百分点，T3增幅最大。由此说明马铃薯淀粉加工汁水可以改善苜蓿的营养品质，提升牧草相对饲喂价值。

2.6 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿养分积累的影响

图1显示，苜蓿的全氮、全磷、全钾含量变化趋势基本相同，大小顺序均为T4>T3>T2>T1>CK，均随马铃薯淀粉加工汁水灌溉量的增加而显著增加。与CK相比，各处理全氮含量显著增长（P<0.05），T4最大，为15.04 mg·kg^{-1}，T1、T2和T3分别为12.62、13.74 mg·kg^{-1}和14.00 mg·kg^{-1}，T1~T4分别增长15.67%、25.93%、28.32%和37.86%；全磷含量显著增长（P<0.05），T4最大，为4.26 mg·kg^{-1}，T1、T2和T3分别为3.08、3.70 mg·kg^{-1}和3.77 mg·kg^{-1}，T1~T4分别增长13.65%、36.53%、39.11%和57.20%；全钾含量显著增长（P<0.05），T4最大，为4.93 mg·kg^{-1}，T1、T2和T3分别为2.44、3.34 mg·kg^{-1}和4.13 mg·kg^{-1}，T1~T4分别增长201.23%、312.35%、409.88%和508.64%。由此表明马铃薯淀粉加工汁水可显著提升苜蓿全氮、全磷、全钾的积累量。



不同字母表示处理间差异显著（P<0.05）

Different letters indicate significant differences among treatments（P<0.05）

图1 不同马铃薯淀粉加工汁水处理下苜蓿氮、磷、钾积累量

Figure 1 Nitrogen, phosphorus and potassium accumulation of alfalfa under different potato starch processing juice treatments

2.7 马铃薯淀粉加工汁水效果综合评价

选取有机质、pH、碱解氮、有效磷、速效钾、株高、鲜草产量、叶绿素、粗脂肪、粗蛋白和相对饲喂价值11项主要指标，采用极差标准化方法将原始数据标

表6 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿营养品质及相对饲喂价值的影响（%）

Table 6 Effects of potato starch processing juice on the nutritional quality and relative feeding value of alfalfa（%）

试验组 Test group	粗灰分 Crude ash	粗脂肪 Crude fat	粗蛋白 Crude protein	酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	相对饲喂价值 Relative feeding value
CK	11.36±0.14a	1.38±0.03d	11.00±0.36c	41.90±0.20b	50.79±0.21a	103.04±0.36e
T1	8.11±0.07e	2.06±0.09a	14.69±0.31b	43.41±0.25a	47.26±0.88b	108.45±2.17d
T2	10.10±0.08d	1.86±0.01b	15.02±0.32b	40.66±0.63c	46.53±0.66b	114.41±0.82c
T3	10.37±0.04c	1.92±0.03b	17.66±0.10a	32.63±0.47e	42.31±0.28d	139.58±1.70a
T4	10.61±0.15b	1.74±0.03c	17.97±0.22a	37.34±0.43d	45.07±0.77c	123.46±1.41b

准化处理，处理后的数据均位于[0，1]区间，然后利用SPSS软件进行主成分分析，获得两个主成分的相关分析数据，主成分系数等于各变量因子载荷向量除以各自主成分特征根的算术平方根。由表7可知，前两个主成分的累积贡献率为94.03%，高于90%，因此，可以选取前两个主成分建立综合评价模型。

Y_1=0.323×粗蛋白+0.320×有机质+0.320×有效磷+0.319×叶绿素+0.317×鲜草产量+0.316×速效钾+0.313×株高−0.308×pH+0.295×碱解氮+0.284×相对饲喂价值+0.169×粗脂肪

Y_2=0.098×粗蛋白+0.152×有机质+0.174×有效磷−0.091×叶绿素−0.108×鲜草产量−0.047×速效钾+0.074×株高+0.287×pH−0.350×碱解氮−0.099×相对饲喂价值+0.831×粗脂肪

根据主成分得分计算综合得分，综合得分越高表明汁水灌溉效果越好，综合得分以主成分的贡献率对主成分得分进行加权平均，即主成分综合得分=（主成分1得分×84.512+主成分2得分×9.518）/94.030，根据综合得分排序为T4>T3>T2>T1>CK（表8）。

3 讨论

3.1 马铃薯淀粉加工汁水对土壤养分的影响

马铃薯淀粉加工汁水各项重金属指标均符合《农业灌溉水质标准》，但BOD和COD含量较高，因此，马铃薯淀粉加工汁水需要通过一定的工程或工艺措施进行处理。何进勤等[24]的试验结果表明，静置24 h后马铃薯淀粉加工汁水的BOD和COD含量均有所减少，且在植被收获后土壤中COD基本被降解。在本试验研究中，马铃薯淀粉加工汁水采取了好氧发酵，并在灌溉时进行了稀释处理。

表7 各指标主成分矩阵表

Table 7 Principal component matrix of each index

指标 Index	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2
有机质 Organic matter	0.976	0.155
pH	−0.939	0.294
碱解氮 Alkaline hydrolysis of nitrogen	0.899	−0.363
有效磷 Available phosphorus	0.975	0.178
速效钾 Quick-acting potassium	0.964	−0.480
株高 Plant height	0.953	0.760
鲜草产量 Fresh grass yield	0.968	−0.110
叶绿素 Chlorophyll	0.974	−0.093
粗脂肪 Crude fat	0.516	0.850
粗蛋白 Crude protein	0.984	0.100
相对饲喂价值 Relative feeding value	0.866	−0.101
总计（特征根）Total	9.296	1.047
方差贡献率 Variance contribution rate/%	84.512	9.518
累积贡献率 Cumulative contribution rate/%	84.512	94.030

表8 主成分分析综合得分

Table 8 Comprehensive score of principal component analysis

试验组 Test group	主成分1 Principal component 1	主成分2 Principal component 2	综合得分 Overall score	排序 Sort
CK	−4.40	−1.06	−3.82	5
T1	−1.50	1.48	−1.13	4
T2	0.36	0.44	0.35	3
T3	2.62	−0.06	2.21	2
T4	2.92	−0.81	2.39	1

土壤是农业发展的基础，土壤养分是农业发展的重中之重，施肥和灌水条件可显著影响土壤养分状况[25-26]。马铃薯淀粉加工汁水灌溉农田与清水灌溉相比，可显著提高土壤养分含量，尤其是速效钾含量在玉米收获后提升7倍以上，并且没有对土壤造成重金属污染[24]。张彤[27]的研究表明，马铃薯淀粉加工汁水制成的液体肥料，可减少960 t的COD排放，并且可以循环利用废水蛋白质和水资源，切实改良土壤，提高土壤养分。赵磊[28]从马铃薯淀粉汁水中筛选出固氮菌属的裸色球形固氮菌（*A.chrococcum*），该菌施入土壤后可以将外界的氮源转化为土壤系统内的氮源，从而提高了土壤氮含量；马骏等[29]的研究显示，经马铃薯淀粉加工汁水灌溉后，土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶活性增加，土壤肥力提高。在本研究中，随着马铃薯淀粉加工汁水灌溉量增加，土壤中有机质、碱解氮、有效磷和速效钾含量均显著增加：一方面可能由于马铃薯淀粉加工汁水本身含有淀粉、蛋白质等有机物质和氮、磷、钾营养元素，其进入土壤后经历物理、化学、生物等一系列迁移转化过程，对土壤有机质和氮、磷、钾含量进行补充，从而提高了农田土壤的养分；另一方面可能是进入土壤的汁水改善了土壤的水分和营养条件，有利于土壤微生物的繁殖，增强了固氮和解磷、解钾等功能微生物的活性，从而促进了土壤养分的转化。

于秀丽[30]研究认为，在偏碱性土壤中降低灌溉水pH可以有效提升土壤肥力；在本研究中，土壤pH

随着马铃薯淀粉加工汁水灌溉量的增加而降低，可能是马铃薯淀粉加工汁水本身pH为6.13，对当地偏碱性土壤起到了调和作用，在一定程度上有利于土壤养分的活化和转化，从而促进了植物对养分的有效利用。

3.2 马铃薯淀粉加工汁水对苜蓿生长发育的影响

氮素是紫花苜蓿生长发育过程所必需的营养元素，也是合成蛋白质的重要组成部分[31]。王丹等[32]的研究显示，苜蓿主要是通过与根瘤菌共生固氮来获取氮素，苜蓿每年的固氮量为100~300 $m^3 \cdot hm^{-2}$，根瘤每日固定的氮素有94%供给植株，只有6%留在根瘤中；韩可等[33]认为高效的苜蓿根瘤菌可以有效提升紫花苜蓿的生产力；XU等[34]的研究显示红薯淀粉废水是培育*P. polymyxa*菌良好的原料，将两者结合生产的微生物肥料可以有效提升茶树产量和茶叶品质；关晓欢[35]用马铃薯淀粉废水培养解淀粉芽孢杆菌24 h后，微生物活菌数为2.2×10^9 $cfu \cdot mL^{-1}$，说明马铃薯淀粉加工汁水可以为微生物提供良好的生长环境和充足的氮源、碳源。马铃薯淀粉加工汁水中含有的大量淀粉、蛋白质和纤维素等有机物质，可为微生物活动提供充足养分。本研究结果显示，马铃薯淀粉加工汁水灌溉苜蓿对苜蓿产量和品质产生了显著影响，鲜草和干草产量显著增长，粗蛋白和粗脂肪等营养成分含量显著增加，相对饲喂价值显著提升，其原因是马铃薯淀粉加工汁水灌溉给土壤带来的大量有机物质，对苜蓿根瘤菌等固氮微生物的生长及活性起到了促进作用，从而为苜蓿生长提供了充足的氮素等营养，从而使苜蓿产量增加和品质改善。

有研究表明，施氮可以显著提升植株的氮素积累量及干物质含量[36]。FIXEN等[37]研究发现，在播种期施磷可以提升植株体内磷元素的积累量；孙国峰等[38]的研究发现，施用等氮量沼液可以使氮肥利用率高达40.9%~44.3%，从而促进了水稻氮素积累。在本研究中，随着马铃薯淀粉加工汁水施用量的增加，苜蓿氮、磷、钾积累量也增加，这可能是由于马铃薯淀粉加工汁水中含有的氮、磷、钾元素，被苜蓿生长所吸收利用，从而促进了苜蓿氮、磷、钾的积累量；另外可能是灌溉的汁水降低了土壤pH，改善了土壤水分状况，提高了土壤微生物活性，促进了苜蓿对养分的吸收，客观上增加了苜蓿氮、磷、钾的积累量。

4 结论

（1）灌溉马铃薯淀粉加工汁水增加了土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾等养分含量，对提高土壤养分具有积极意义。

（2）灌溉马铃薯淀粉加工汁水增加了植株高度、叶绿素含量、苜蓿产量和氮、磷、钾元素积累量，提高了粗脂肪和粗蛋白含量，降低了粗灰分和粗纤维含量，对苜蓿生长起到了积极作用。

（3）通过主成分分析法计算综合得分，确定300 $m^3 \cdot hm^{-2}$为马铃薯淀粉加工汁水最优灌溉量。

（4）马铃薯淀粉加工汁水是一种无毒无害的废弃物资源，通过科学处理可作为有益再生资源加以利用。

参考文献：

[1] 刘鹏凌, 周云, 张文娟. 主粮化背景下中国马铃薯主产区生产效率及其影响因素研究[J]. 延边大学农学学报, 2021, 43(3)：93-100. LIU P L, ZHOU Y, ZHANG W J. Study on production efficiency and its influencing factor of potato production areas in China under the background of main grain production[J]. *Agricultural Science Journal of Yanbian University*, 2021, 43(3)：93-100.

[2] 杨雯雯, 郭志芳. 薯类贮藏加工与农产品全产业链开发初探[J]. 广东蚕业, 2021, 55(3)：24-25. YANG W W, GUO Z F. Preliminary exploration on the storage and processing of potato and the development of the whole industrial chain of agricultural products[J]. *Guangdong Sericulture*, 2021, 55(3)：24-25.

[3] 孙红娟, 员建民, 颜东方, 等. 气浮-絮凝-厌氧好氧处理马铃薯淀粉废水工艺探索[J]. 农产品加工(学刊), 2012(12)：20-23, 28. SUN H J, YUN J M, YAN D F, et al. Potato starch wastewater treatment technology of gas floatation-flocculation-anoxia-oxidation combination[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(12)：20-23, 28.

[4] 王姗镒, 朱海峰, 陈金发. 马铃薯淀粉废水处理技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(8)：4845-4847, 4870. WANG S Y, ZHU H F, CHEN J F. Research progress of treatment methods of potato starch wastewater[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(8)：4845-4847, 4870.

[5] 瑞红. 马铃薯淀粉加工废水利用新进展[J]. 农产品加工(学刊), 2012(1)：61. RUI H. New progress in the utilization of potato starch processing wastewater[J]. *Academic Periodical of Farm Products Processing*, 2012(1)：61.

[6] HUANG L P, JIN B, LANT P, et al. Direct fermentation of potato starch in wastewater to lactic acid by *Rhizopus oryzae*[J]. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, 2004, 9(4)：245-251.

[7] GABRIELA L P, MARTA W, ANDRZEJ L. Poplar growth and wood production on a grassland irrigated for decades with potato starch wastewater[J]. *Agroforestry Systems*, 2017, 91(2)：307-324.

[8] LI M, ZHU X, YANG H, et al. Treatment of potato starch wastewater by dual natural flocculants of chitosan and poly-glutamic acid[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 264：121641.

[9] 李雅豪, 李长青, 贾梦杨, 等. 马铃薯淀粉废水、废渣处理及农田利用途径[J]. 农业科技通讯, 2021(7)：268-270. LI Y H, LI C Q, JIA

M Y, et al. Potato starch wastewater and waste residue treatment and farmland utilization methods[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2021(7):268-270.

[10] RAHMAN M A, SAHA B K, CHOWDHURY M A H, et al. Public perception and health implication of loom-dye effluent irrigation on growth of rice(*Oryza sativa* L.) and red amaranth(*Amaranthus tricolor* L.) seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(6):19410-19427.

[11] 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. LIU L, CUI M X, WU N, et al. The environmental impact and utilization of wastewater from potato starch industry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2011, 37(8):131-135.

[12] 王秀蘅，郭晓琳，白舜文．马铃薯淀粉废水资源化利用案例的成本收益分析[J]. 中国给水排水，2017, 33(22):29-32. WANG X H, GUO X L, BAI S W. Cost-benefit analysis of potato starch processing wastewater reuse and nutrient recovery: A case study of hanan green food industrial park[J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(22):29-32.

[13] 张昊，王三反，李广，等．马铃薯淀粉废水处理及资源化利用研究进展[J]. 工业用水与废水，2014, 45(6):4-7. ZHANG H, WANG S F, LI G, et al. Research progress on potato starch wastewater treatment and resource utilization[J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2014, 45(6):4-7.

[14] 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. LI X T, LIU G, WANG T N, et al. Effect 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.

[15] 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. ZHAO B C, WANG X T, DOU G Y, et al. Effects of returning potato starch processing wastewater on nutrients and heavy metals in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5):666-671.

[16] BHATTARAI S, LIU N, KARUNAKARAN C, et al. Tissue specific changes in elements and organic compounds of alfalfa(*Medicago sativa* L.) cultivars differing in salt tolerance under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2021, 264:55-57.

[17] SHAO Z Q, ZHENG C C, POSTMA J A, et al. Nitrogen acquisition, fixation and transfer in maize/alfalfa intercrops are increased through root contact and morphological responses to interspecies competition [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(8):2240-2254.

[18] MCDONALD I, BARAL R, MIN D. Effects of alfalfa and alfalfa-grass mixtures with nitrogen fertilization on dry matter yield and forage nutritive value[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2021, 63(2):305-318.

[19] 李天琦，林志玲，卢轩，等．灌溉量对科尔沁沙地紫花苜蓿土壤速效养分分布及淋失的影响[J]. 草地学报，2021, 29(7):1454-1461. LI T Q, LIN Z L, LU X, et al. Effects of irrigation amount on soil available nutrient distribution and leaching loss of alfalfa in Horqin sandy land[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7):1454-1461.

[20] 许瑞轩，李东宁，杨东海，等．近红外光谱法田间快速估测新鲜紫花苜蓿品质[J]. 光谱学与光谱分析，2013, 33(11):3010-3013. XU R X, LI D N, YANG D H, et al. Alfalfa quality evaluation in the field by near-infrared reflectance spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(11):3010-3013.

[21] 雷晓婷，何进勤，雷金银，等．马铃薯淀粉加工废水灌溉对土壤质量及玉米生长的影响[J]. 中国农学通报，2021, 37(19):106-111. LEI X T, HE J Q, LEI J Y, et al. Irrigation with potato starch processing wastewater: Effects on soil quality and corn growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(19):106-111.

[22] 鲍士旦．土壤农化分析[M]. 北京：中国农业出版社，2000. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.

[23] 张丽英．饲草分析及饲料质量检测技术[M]. 北京：中国农业大学出版社，2007. ZHANG L Y. Forage analysis and feed quality detection technology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.

[24] 何进勤，金建新，胡元峰，等．马铃薯淀粉加工汁水灌溉对土壤养分及重金属含量的影响[J]. 宁夏农林科技，2018, 59(12):4-6, 10. HE J Q, JIN J X, HU Y F, et al. Effect of different potato-starch processing juice irrigation on soil nutrients and heavy metal content[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2018, 59(12):4-6, 10.

[25] 明广增，徐建国，刘向国．有机肥施用量对'映霜红'桃果品质及土壤养分的影响[J]. 北方果树，2021(5):9-12. MING G Z, XU J G, LIU X G. Effects of organic fertilizer application on fruit quality and soil nutrients of 'Yingshuanghong' peach[J]. *Northern Fruits*, 2021(5):9-12.

[26] 滕飞，李传友，张莉，等．北京市尾菜肥料化利用技术集成与示范推广研究[J]. 蔬菜，2020(8):31-35. TENG F, LI C Y, ZHANG L, et al. Study on integrated demonstration and popularization of fertilizer utilization technology of rotten vegetables in Beijing[J]. *Vegetables*, 2020(8):31-35.

[27] 张彤．淀粉废水处理及其资源化回用研究[J]. 能源与环保，2021, 43(4):173-177, 182. ZHANG T. Research on starch wastewater treatment and resource reuse[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(4):173-177, 182.

[28] 赵磊．自生固氮菌的分离及对薯渣和汁水发酵产粗蛋白的影响[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011. ZHAO L. Isolation of azotobacteria and effects of the inoculants on crude protein content in products of potato processing waste fermentation[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.

[29] 马骏，王天宁，雷金银，等．马铃薯淀粉加工汁水灌溉对土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶的影响[J]. 宁夏农林科技，2020, 61(8):40-41. MA J, WANG T N, LEI J Y, et al. Potato starch processing juice water irrigation on soil catalase, urease and phosphatase[J]. *Ningxia Journal of Agriculture and Forestry Science and Technology*, 2020, 61(8):40-41.

[30] 于秀丽．内陆盐碱湿地土壤pH对土壤有机碳含量的影响[J]. 中国

农机化学报, 2019, 40(11):203-208. YU X L. Effects of pH on the concentration of organic carbon in soils of inland saline-alkali wetland[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(11):203-208.

[31] 苏亚丽, 张力君, 孙启忠, 等. 水肥耦合对敖汉苜蓿营养成分的影响[J]. 草地学报, 2011, 19(5):821-824. SU Y L, ZHANG L J, SUN Q Z, et al. Effects of variable water and nutrient regimes on nutrients of alfalfa[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(5):821-824.

[32] 王丹, 谢开云, 何峰, 等. 紫花苜蓿施氮研究进展[J]. 中国草地学报, 2013, 35(6):98-103. WANG D, XIE K Y, HE F, et al. Progress in study on nitrogen fertilizer application to alfalfa[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2013, 35(6):98-103.

[33] 韩可, 孙彦, 张昆, 等. 接种不同根瘤菌对紫花苜蓿生产力的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(3):639-644. HAN K, SUN Y, ZHANG K, et al. Effect of different rhizobium on productivity of *Medicago sativa* L.[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(3):639-644.

[34] XU S J, BAI Z H, JIN B, et al. Bioconversion of wastewater from sweet potato starch production to *Paenibacillus polymyxa* biofertilizer for tea plants[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1):55-60.

[35] 关晓欢. 柠檬酸废水和马铃薯淀粉废水资源化培养解淀粉芽孢杆菌及其应用[D]. 大连:辽宁师范大学, 2013. GUAN X H. Production of *Bacillus amyloliquefaciens* using citric acid and potato starch wastewater for improving vegetables growth and inhibiting *Cyanobacteria*[D]. Dalian:Liaoning Normal University, 2013.

[36] 马孝慧, 阿不来提·阿不都热依木, 孙宗玖, 等. 氮、磷、钾、硫肥对苜蓿产量和品质影响[J]. 新疆农业大学学报, 2005(1):18-21. MA X H, ABUILITI A, SUN Z J, et al. Influence of nitrogen, phosphorus, potassium and sulphur fertilizer on alfalfas yield and quality[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2005(1):18-21.

[37] FIXEN P E, LUDWICK A E. Phosphorus and potassium fertilization of irrigated alfalfa on calcareous soils:I. Soil test maintenance requirements[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1983, 47(1):107-112.

[38] 孙国峰, 王鑫, 盛婧, 等. 长期粪肥还田条件下稻米品质及氮肥利用率[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(11):2521-2527. SUN G F, WANG X, SHENG J, et al. Rice quality and nitrogen use efficiency under long-term application of pig manure or biogas slurry[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2521-2527.

(责任编辑:李丹)