

马铃薯淀粉加工废水还田对土壤氮磷钾迁移转化的影响

李晓婷¹, 刘刚^{1*}, 王天宁², 窦广玉³ (1. 中国科学院兰州化学物理研究所环境材料与生态化学研究发展中心, 甘肃兰州 730000; 2. 宁夏农林科学院农业资源与环境研究所, 宁夏银川 750002; 3. 中国环境科学研究院清洁生产中心, 北京 100012)

摘要 选取固原市某淀粉厂试验基地, 对其有机废水还田种植作物后, 连续 2 年采取土样分析土壤耕作层 (0~30 cm) 肥力变化和土壤剖面 (30~60、60~90 cm) 氮磷钾迁移规律。结果表明, 施用马铃薯淀粉有机废水还田, 还田量在 600~900 m³/hm² 时, 能明显提高土壤耕作层中有机质、全氮、有效磷、速效钾含量, 使土壤耕作层中全氮、有效磷、速效钾养分等级从Ⅲ级提高到Ⅰ级, 有机质提高到Ⅲ级。有机废水还田量为 600 m³/hm² 时, 30~60 和 60~90 cm 剖面中氮元素无明显迁移趋势。超过 900 m³/hm² 时, 在 30~60 和 60~90 cm 2 个剖面氮元素有明显迁移变化。随着还田量、还田和耕作次数的增加, 氮元素向下迁移量增加。施用 600 m³/hm² 有机废水还田, 土壤中磷和钾元素已经开始向下迁移。且随着还田量、还田和耕作次数的增加, 磷和钾元素向下迁移越明显。在向下迁移过程中, 有效磷和速效钾有逐渐转化为矿化磷和矿物质钾的固化趋势。

关键词 马铃薯淀粉加工废水; 氮磷钾; 迁移转化; 还田利用

中图分类号 X 703 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2020)17-0091-06

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.17.024



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Returning Potato Starch Processing Wastewater to Soil on Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Migration in Soil

LI Xiao-ting¹, LIU Gang¹, WANG Tian-ning² et al (1. Research & Development Center for Eco-material and Eco-chemistry, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan, Ningxia 750002)

Abstract In this experiment, a starch plant test base in Guyuan was selected. After the organic wastewater was returned to the field, soil samples were taken to analyze the fertility changes of the soil tillage layer (0–30 cm) and the nitrogen, phosphorus, and potassium migration in the soil profile (30–60, 60–90 cm). The results showed that when the potato starch organic wastewater was returned to the field and the return amount was in the range of 600–900 m³/hm², the content of organic matter, total nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the soil tillage layer could be significantly increased. The levels of available phosphorus, available phosphorus, and available potassium nutrients were increased from Ⅲ to Ⅰ, and organic matter was improved to Ⅲ. When the amount of organic wastewater returned to the field was 600 m³/hm², the nitrogen element in the 30–60 and 60–90 cm had no obvious migration trend. When it exceeded 900 m³/hm², the nitrogen elements in the 30–60 and 60–90 cm sections had obvious migration changes. With the increase in the amount of returning fields, the number of returning fields and the number of tillages, the downward migration of nitrogen increased. When 600 m³/hm² of organic wastewater was returned to the field, the phosphorus and potassium elements in the soil began to migrate downward. And with the increase of the amount of returning fields, the number of returning fields and the number of tillages, the downward migration of phosphorus and potassium elements became more obvious. In the downward migration process, available phosphorus and available potassium had a tendency to solidify into mineralized phosphorus and mineral potassium.

Key words Potato starch processing wastewater; Nitrogen, phosphorus and potassium; Migration and conversion; Returning field

随着农业经济的快速发展, 农业产出逐年增加, 但也造成了严重的农业面源污染问题。而化肥被认为是农业面源污染的主要原因, 主要是由于农户不合理的施肥方式造成土壤污染以及大量施肥所带来的剩余养分经过雨水冲刷、灌溉进入水体造成水环境污染给农业生态环境造成极大压力^[1-3]。目前农业面源污染已逐步成为我国严重的环境问题, 其不仅对农业生态环境造成影响, 还对我国农产品安全、生态文明建设带来威胁。因此, 加强农业面源污染防控对推进现代农业建设、实现农业绿色发展、改善农村生态环境意义重大^[2]。

研发既能解决农业生产废弃物的资源化利用、又能适宜农作物安全高效生产并易于推广应用的有机肥, 充分发挥有机肥在提高土壤供肥能力、提高作物肥料利用率、增加作物产量、改善农产品品质方面的优势, 提升有机废弃物的资源化再利用能力, 促进土壤良性生态循环, 改善农业生态环境,

已成为旱地农业面源污染源头控制的关键环节和技术难点^[4-6]。马铃薯原料清洗过程、马铃薯淀粉与细胞汁水分离和清洗过程产生的马铃薯淀粉加工废水, 是一种富含磷、钾、小颗粒淀粉、多糖、蛋白、氨基酸的高浓度有机肥水^[7-10], 多年来已经在我国西北、东北、华北地区被作为肥料大量还田施用。多年实践证明马铃薯淀粉加工废水仅靠末端治理无法实现达标排放, 还田利用是解决马铃薯淀粉加工废水处理问题的最佳途径。马铃薯淀粉加工废水主要包括马铃薯清洗废水、马铃薯汁水(马铃薯细胞液等)和淀粉洗涤精制废水。笔者以固原市某淀粉企业流转的农田土壤为对象, 研究长期大量施用马铃薯淀粉加工废水对土壤中氮、磷、钾迁移转化的影响, 以期为马铃薯淀粉加工废水科学利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与时间 试验自 2017 年 11 月开始实施, 在固原市某淀粉厂试验地开展, 2017 年 11 月进行了第一次废水汁水还田试验, 分别在 2018 年 6 月(作物种植初期)、2018 年 9 月(作物收获期)对土壤中营养元素含量等进行了检测; 2018 年 11 月继续实施废水汁水还田利用, 2019 年 6 月(播种

作者简介 李晓婷(1988—), 女, 甘肃民勤人, 助理研究员, 博士, 从事土壤与水环境检测研究。* 通信作者, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事食品与农业加工研究。

收稿日期 2020-02-14

前期)、2019 年 10 月(作物收获期)对土壤中营养元素含量等进行了检测,种植作物为玉米和马铃薯。

1.2 试验材料采集与处理 试验材料采自马铃薯淀粉加工废水还田后种植玉米和马铃薯农田的土壤。分别采集还田后作物种植初期(2018 年 6 月)、作物收获期(2018 年 9 月)、再还田后作物种植初期(2019 年 6 月)、作物收获期(2019 年 10 月)4 个阶段土样,土样分别从 0~30 cm(土壤耕作层)、30~60 和 60~90 cm(土壤剖面)3 个深度采取,每个深度选取 3 个位点进行取样混合后分装进自封袋中,注明采样深度、地点、经纬度、种植作物、时间等。

采集好的土样置于样品盘中摊成薄层(厚约 2 cm),放在室内阴凉通风处自行干燥。风干后的样品挑出植物根、叶、虫体、沙石等,使全部样品用研钵研磨通过 2 mm 孔径筛。将过 2 mm 孔径筛的土样采用四分法分样直至剩余约 50 g 样品,取出其中约 25 g 样品继续碾磨研磨使之全部通过 0.25 mm 孔径筛,用于检测分析,另外约 25 g 样品做好标签用自封袋封存。

1.3 试验设计 共设置 5 个处理,还田量分别为混合有机废水 0(清水 3 000 m³/hm² 补足)为对照、600 m³/hm²(清水 2 400 m³/hm² 补足)、900 m³/hm²(清水 2 100 m³/hm² 补足)、1 200 m³/hm²(清水 1 800 m³/hm² 补足)、3 000 m³/hm²(清水为 0)。3 次重复试验;大区展示 4 个。小区面积为 4 m×12 m;大区试验分别为 22 m×15 m 和 26 m×15 m。小区畦埂底宽 50 cm,顶宽 40 cm,高 40 cm。玉米点播采取拉线等距精量播种株行距 27 cm×50 cm。种植密度 74 100 株/hm²,玉米

品种屯玉 99;马铃薯播种株行距为 45 cm×50 cm。种植密度 44 460 株/hm²,马铃薯品种青薯 9 号。分别对不同还田量的试验地块连续 2 年(4 个阶段)的同步试验地采取土样带回实验室测试分析。

1.4 测试指标与方法 土壤养分指标:有机质、全氮、有效磷(P₂O₅)、速效钾(K₂O)(表 1)。

表 1 测试指标与方法
Table 1 Indicators and methods of test

检测指标 Detection index	计量单位 Unit of measurement	检测方法 Detection method
全氮 Total nitrogen	g/kg	元素分析仪
有效磷(P ₂ O ₅)	mg/kg	pH 8.5 碳酸氢钠法
速效钾(K ₂ O)	mg/kg	pH 7 醋酸氨法
有机质 Organic matter	g/kg	高锰酸钾外加热法

2 结果与分析

2.1 马铃薯淀粉加工废水水质特征 从表 2 可以看出,综合废水 COD 为 7 000~35 000 mg/L,总氮 500~1 500 mg/L,总磷 30~160 mg/L,总钾 800~3 000 mg/L。废水重金属含量均较低,可以达到《农田灌溉水质标准》(GB5084—2005),废水汁水存在的主要问题为全盐量较高,主要有 2 个原因:一是生产用水的盐分本底值较高,二是马铃薯本身含钾盐较高,导致全盐量中钾盐浓度偏高,而钾是对农业生产活动有益的元素,废水汁水的还田利用起到施用钾肥的作用。因此马铃薯加工废水富含土壤和农作物生长所需的营养成分,是“好水”,是“肥水”。

表 2 固原市部分企业马铃薯淀粉加工废水水质特征

Table 2 Water quality characteristics of potato starch processing wastewater in some enterprises in Guyuan City

企业 Enterprise	pH	汞 Hg mg/L	砷 As mg/L	铅 Pb mg/L	镉 Cd mg/L	总铬 Total Cr mg/L	全盐量 Total salt content mg/L	化学需氧量 COD mg/L	总氮 Total N mg/L	总磷 Total P mg/L	钾 K mg/L
企业 1 工艺汁水 Enterprise 1 process juice	4.91	ND	ND	0.16	ND	ND	11 000	34 810	1 490	71.7	2 920
企业 1 脱氮废水 Enterprise 1 denitrification wastewater	5.33	ND	ND	ND	ND	ND	8 200	17 900	918	52.8	2 340
企业 1 洗薯废水 Enterprise 1 washing potato waste water	5.46	ND	0.008	ND	ND	ND	1 600	未测	未测	未测	未测
企业 2 工艺汁水 Enterprise 2 process juice	5.07	ND	ND	ND	ND	ND	9 200	35 200	1 500	84	3 200
企业 2 脱氮废水 Enterprise 2 denitrification wastewater	4.89	ND	ND	ND	ND	ND	8 800	18 900	133	59.8	3 180
企业 2 洗薯废水 Enterprise 2 washing potato waste water	4.52	ND	0.007 6	ND	ND	ND	1 100	未测	未测	未测	未测
企业 3 综合废水 Enterprise 3 comprehensive wastewater	6.25	ND	ND	0.16	ND	ND	2 300	6 820	502	38.6	877

2.2 有机废水还田对土壤耕作层肥力的影响 不同作物不同还田量土壤耕作层(0~30 cm)全氮、有效磷、速效钾、有机质含量见表 3。土壤养分分级标准见表 4。施用汁水与冲洗混合废水(有机废水)能够明显提高土壤中全氮、有效磷、速效钾的含量,对于土壤有机质影响较小。从表 3 可以看出,万里试验地土壤在未施用有机废水时,种植玉米的土地土壤

耕作层的全氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别为 1.117 g/kg、17.64 mg/kg、142.62 mg/kg、12.28 g/kg;种植马铃薯的土地土壤耕作层的全氮、有效磷、速效钾和有机质含量分别为 1.114 g/kg、18.88 mg/kg、168.73 mg/kg、11.78 g/kg。相当于Ⅲ级土壤,有机质是Ⅳ级水平^[11-13]。

表 3 不同有机废水还田量时土壤耕作层(0~30 cm)全氮、有效磷、速效钾和有机质含量

Table 3 Contents of total nitrogen,available phosphorus,available potassium and organic matter in soil cultivation layer(0~30 cm) under different amount of organic wastewater returning field amount

采样时间 Sampling time	还田量 Returning amount m ³ /hm ²	全氮 Total nitrogen//g/kg		有效磷 Effective phosphorus//mg/kg		速效钾 Available potassium//mg/kg		有机质 Organic matter//g/kg	
		玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato
2018-06	0	1.117	1.114	17.64	18.88	142.62	168.73	12.28	11.78
	600	1.433	1.416	35.73	37.71	176.61	237.82	15.69	16.75
	900	1.605	1.652	54.35	59.93	316.80	621.30	19.83	20.67
	1 200	1.971	1.714	61.33	62.64	762.01	977.53	25.66	26.80
	3 000	2.309	2.275	95.64	92.50	1 083.2	1 063.4	31.37	30.79
2018-09	0	1.116	1.121	18.93	19.93	210.23	170.60	11.12	11.34
	600	1.329	1.342	33.16	35.62	335.45	400.32	15.70	15.19
	900	1.546	1.486	54.55	53.71	680.31	710.43	19.22	20.66
	1 200	1.824	1.712	74.54	72.54	860.60	1 150.42	25.67	26.48
	3 000	2.059	2.133	90.06	93.98	1 880.11	1 250.04	30.35	29.93
2019-06	0	1.102	1.107	10.77	17.44	460.03	280.62	11.67	11.59
	600	1.933	1.944	43.00	53.32	520.48	540.52	21.25	20.15
	900	2.186	2.027	98.12	76.32	750.30	980.43	29.23	26.97
	1 200	2.430	2.465	131.14	88.56	1 560.50	1 350.47	32.49	32.89
	3 000	3.412	3.258	162.65	135.60	2 060.20	2 240.14	42.69	42.53
2019-10	0	1.107	1.019	17.35	16.87	380.14	170.84	11.37	11.35
	600	1.618	1.668	37.35	19.99	580.51	450.24	20.95	20.63
	900	2.012	2.078	62.44	59.00	710.09	800.56	29.02	29.28
	1 200	2.270	2.377	81.68	70.69	1 450.42	1 250.28	31.68	32.57
	3 000	2.764	2.988	146.87	124.07	1 550.04	1 560.14	42.27	42.44

表 4 土壤养分分级标准

Table 4 Soil nutrient grading standards

等级 Level	有机质 Organic matter g/kg	全氮 Total nitrogen g/kg	水解氮 Hydrolysis nitrogen mg/kg	速效钾 Available potassium mg/kg	有效磷 Effective phosphorus mg/kg
I	>40	>2.0	>150	>200	>40
II	30~40	1.5~2.0	120~150	150~200	20~40
III	20~<30	1.0~<1.5	90~<120	100~<150	10~<20
IV	10~<20	0.7~<1.0	60~<90	50~<100	5~<10
V	6~<10	0.5~<0.7	30~<60	30~<50	3~<5
VI	<6	<0.5	<30	<30	<3

有机废水施用量为 600 m³/hm² 时,在 2017 年 11 月第一次施用有机废水后,2018 年 6 月开始播种玉米和马铃薯,种植玉米的土地土壤耕作层中全氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别为 1.433 g/kg、35.73 mg/kg、176.61 mg/kg、15.69 g/kg;种植马铃薯的土地土壤耕作层的全氮、有效磷、速效钾、有机质含量分别为 1.416 g/kg、37.71 mg/kg、237.82 mg/kg、16.75 g/kg。全氮基本仍属于Ⅲ级土壤,磷和钾含量已经提高到Ⅱ级和Ⅰ级,有机质还是Ⅳ级水平;2018 年 11 月施用第二次有机废水还田后,2019 年 6 月测得种植玉米的土地土壤含氮量继续提高到 1.933 g/kg,有效磷含量 43.00 mg/kg,速效钾含量 520.48 mg/kg,有机质含量 21.25 g/kg;种植马铃薯的土地土壤含氮量继续提高到 1.944 g/kg,有效磷含量 53.32 mg/kg,速效钾含量 540.52 mg/kg,有机质含量 20.15 g/kg。氮达到Ⅱ级土壤标准,磷、钾超过Ⅰ级土壤标准,有机质是Ⅲ级土壤水平。种植玉米和马铃薯后,2019 年 10

月测得全氮含量略有降低,仍保持Ⅱ级土壤。种植玉米的土地有效磷含量 37.35 mg/kg,速效钾含量 580.51 mg/kg,有机质含量 20.95 g/kg;种植马铃薯的土地有效磷含量 19.99 mg/kg,速效钾含量 450.24 mg/kg,有机质含量 20.63 g/kg。有机质还在Ⅳ级水平,磷保持Ⅱ级水平,但钾仍在Ⅰ级标准以上。

有机废水施用量分别为 900、1200、3 000 m³/hm² 时,第一次还田后 2018 年 6 月测得全氮含量 1.605~2.309 g/kg,有效磷含量 54.35~95.64 mg/kg,速效钾含量 316.80~1 083.2 mg/kg,有机质含量 19.83~31.37 g/kg,全氮达到Ⅱ级标准。且在还田量 3 000 m³/hm² 时全氮含量为Ⅰ级,有效磷达到Ⅰ级,速效钾远超Ⅰ级,有机质达到Ⅲ级;种植玉米和马铃薯后,全氮、有效磷、速效钾、有机质含量略有下降,第二次还田后至作物收获前 2019 年 10 月测得全氮含量 2.012~2.988 g/kg,有效磷 59.00~146.87 mg/kg,速效钾含量 710.09~1 560.14 mg/kg,有机质含量 29.02~42.44 g/kg。全氮、有效磷、速效钾整体仍在Ⅰ级以上。

土壤有机质是土壤生态系统中一个重要的成分,有机质含量是衡量土壤肥力的重要因素,直接影响土壤的保肥性、保水性、缓冲性、耕性和通气状况等。土壤有机质的缺乏能够引起团聚体性状不好,土壤持水量下降,土壤侵蚀加剧,提供营养的能力下降,减少土壤生物和酶的活性。这些因素综合到一起就会引起土壤的生产力下降。因此维持和提高农业土壤中有机质含量对于农业可持续发展非常关键。马铃薯加工废水还田不仅提高了土壤有机质含量,改善了土壤的理化性质,为微生物的生长繁殖提供了良好的环境和丰富的

碳源、氮源,同时,微生物可以利用废水中的碳源物质大量进行自身繁殖,将废水中的碳同化为微生物体碳。认为土壤中净增的氮素除部分来自还田外,更主要是由于还田促进微生物固氮作用所作的间接贡献。废水还田能促进真菌和细菌的大量繁殖,提高土壤中微生物的数量。

2.3 有机废水还田利用对土壤剖面氮磷钾迁移变化的影响

2.3.1 氮元素。氮是所有活有机体所需要的最重要营养元

素之一,也是限制作物生长的最重要因素之一。结合表 5 和图 1 可知,在 2017 年 11 月和 2018 年 11 月 2 次不同施用量的有机废水还田和 2 次种植玉米和马铃薯后,30~60 和 60~90 cm 2 个断面的氮含量都有不同程度的增加。还田量为 600 m³/hm² 时,30~60 cm 剖面中氮含量逐步提高,在剖面 60~90 cm 氮的含量基本没有明显变化,与清水对照的同等断面基本一致^[14-16]。

表 5 不同有机废水还田量下土壤剖面氮含量

Table 5 The nitrogen content in the soil profile under the amount of organic wastewater returning field

g/kg

还田量 Returning amount m ³ /hm ²	土壤剖面 Soil profile cm	2018-06		2018-09		2019-06		2019-10	
		玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato
0	30~60	0.992	0.962	1.016	1.098	1.012	1.025	1.018	1.065
	60~90	0.906	0.906	0.910	1.023	0.909	0.926	0.982	0.996
600	30~60	1.115	1.045	1.170	1.167	1.249	1.263	1.179	1.277
	60~90	1.092	0.985	0.968	1.071	0.962	1.028	1.032	1.025
900	30~60	1.205	1.172	1.265	1.297	1.235	1.462	1.336	1.505
	60~90	1.179	1.122	1.171	1.147	1.093	1.129	1.178	1.126
1 200	30~60	1.462	1.296	1.388	1.368	1.526	1.608	1.706	1.612
	60~90	1.285	1.198	1.217	1.187	1.185	1.211	1.224	1.399
3 000	30~60	1.629	1.473	1.695	1.519	2.018	1.989	2.091	2.042
	60~90	1.314	1.224	1.384	1.251	1.436	1.533	1.450	1.582

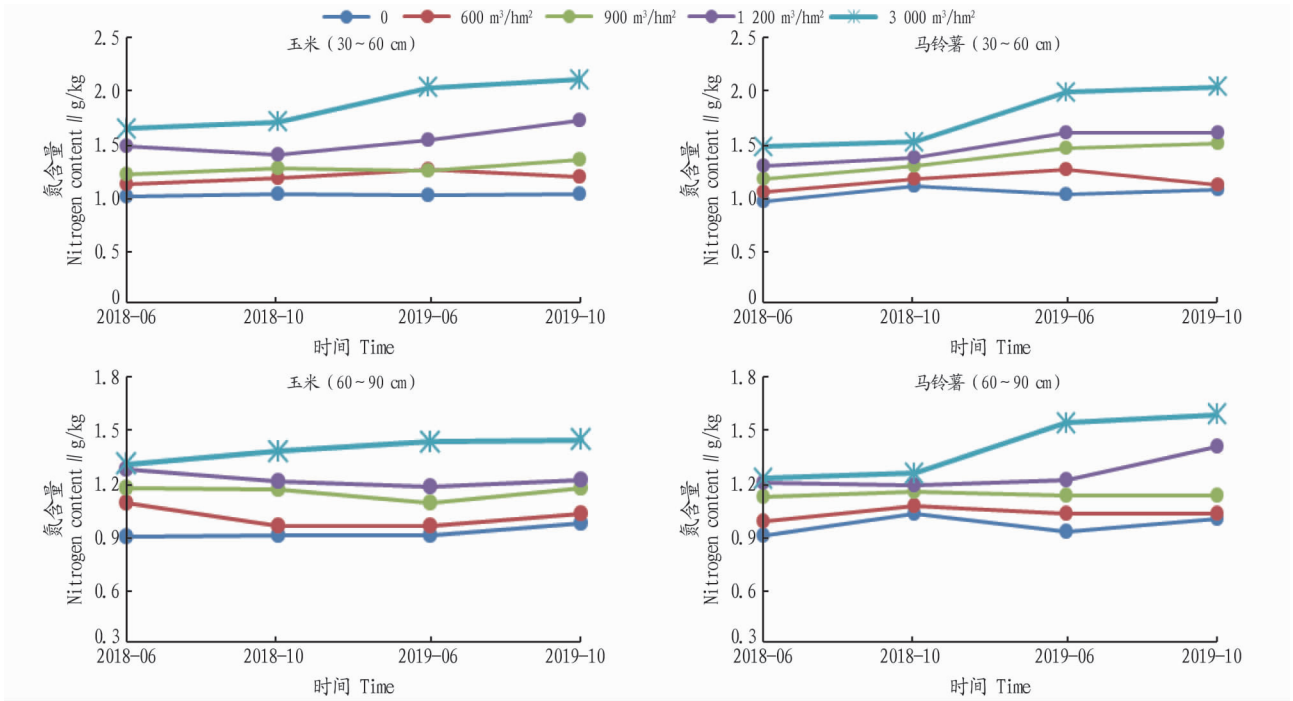


图 1 多次施用有机废水还田时土壤剖面氮含量随有机废水还田量的变化

Fig. 1 Changes of soil nitrogen content with the amount of organic wastewater returning field during repeated application

还田量 900 m³/hm² 与清水还田对照相比,2 个断面的氮含量均稍有提高。当还田量达 1 200 m³/hm² 时,30~60 cm 剖面的氮含量:1.462~1.296、1.388~1.368、1.526~1.608 和 1.706~1.612 g/kg。60~90 cm 剖面的氮含量:1.285~1.198、1.217~1.187、1.185~1.211 和 1.224~1.399 g/kg。与清水还田对照相比,2 个断面的氮含量都有很大的提高。当还田量达 3 000 m³/hm² 时,2 个断面的氮含量与清水还田对照相

比整体提高 2 倍。

2.3.2 磷元素。从表 6 可以看出,施用清水还田的土壤,30~60 和 60~90 cm 剖面中磷含量为 10.01~11.80、8.93~10.28 mg/kg。连续 2 年施用有机废水还田 2 个断面的磷含量都有不同程度的增加。连续 2 次同样的还田量 600 m³/hm²,30~60 cm 剖面中磷含量从 11.74~17.50 mg/kg 逐步提高,每灌一次地和种植一次作物的耕作过程都提高此

剖面的磷含量。在剖面 60~90 cm 磷含量与清水对照相比基本无明显变化。

表 6 不同有机废水还田量下土壤剖面磷含量

Table 6 Phosphorus content in soil profile under different organic wastewater returning field

mg/kg

还田量 Returning amount m ³ /hm ²	土壤剖面 Soil profile cm	2018-06		2018-09		2019-06		2019-10	
		玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato
0	30~60	11.13	10.12	11.34	11.80	11.77	11.27	10.81	10.01
	60~90	8.93	9.91	10.28	10.09	9.10	9.96	9.16	9.47
600	30~60	13.51	11.74	14.62	14.34	16.78	15.96	16.24	17.50
	60~90	11.33	10.92	11.08	11.50	11.90	10.58	10.72	11.87
900	30~60	15.12	19.03	20.08	21.22	25.12	22.19	26.30	26.99
	60~90	13.56	14.53	13.79	14.42	15.38	16.99	15.70	16.87
1 200	30~60	19.86	21.24	26.52	29.84	31.97	29.87	32.49	30.51
	60~90	14.24	16.73	17.91	16.91	19.91	19.76	20.60	21.42
3 000	30~60	23.12	33.41	53.33	55.30	85.12	87.23	87.22	89.05
	60~90	16.83	20.73	19.65	21.93	26.28	26.99	29.39	36.42

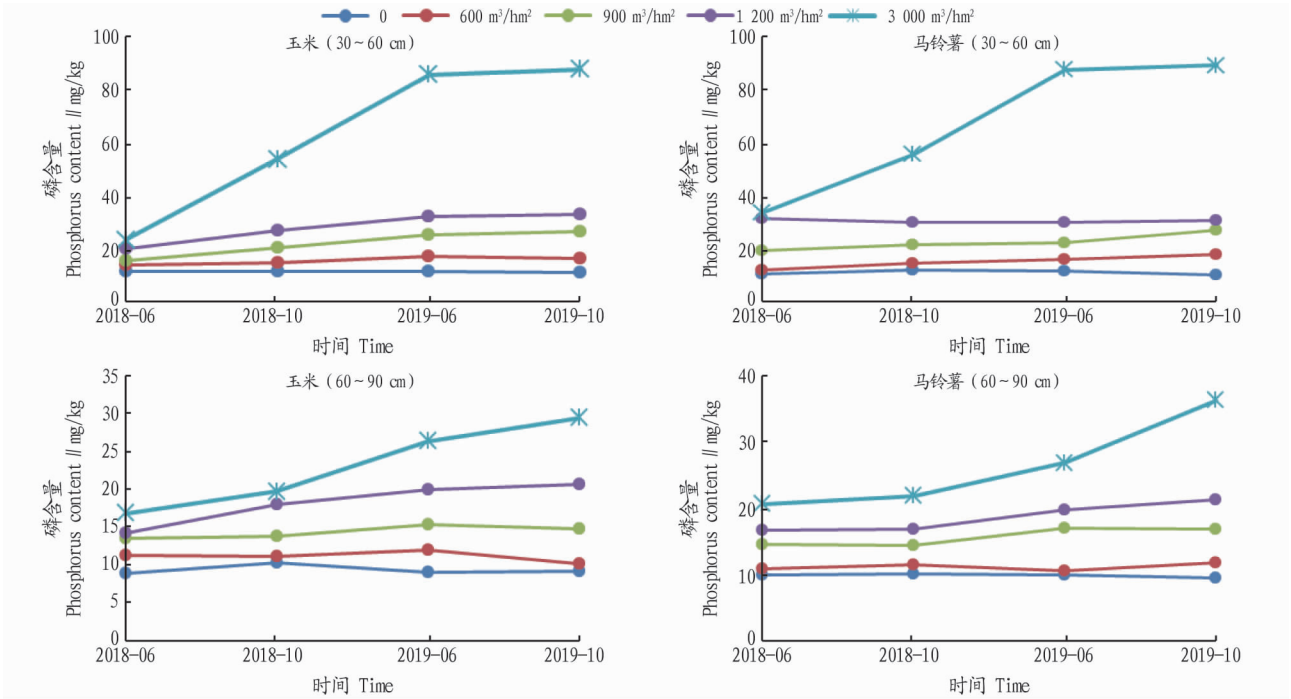


图 2 多次施用有机废水还田量下土壤剖面磷含量随有机废水还田量的变化

Fig. 2 Changes of soil phosphorus content with the amount of organic wastewater returning field during repeated application

当还田量达 900 m³/hm² 时,30~60 和 60~90 cm 剖面的磷含量分别为 15.12~26.99、13.56~16.99 mg/kg,与清水还田对照相比,2 个断面的磷含量都有较大幅度的提高。还田量 1 200 m³/hm² 时,30~60 cm 剖面的磷含量从 19.86 mg/kg 增加到 32.49 mg/kg,60~90 cm 剖面的磷含量从 14.24 mg/kg 增加到 21.42 mg/kg,与清水还田对照相比,2 个断面磷含量都提高 2~3 倍。当还田量达 3 000 m³/hm² 时,2 个断面磷含量整体提高了 3~6 倍(图 2)。

磷在土壤中的迁移转化过程,即是磷在土壤中的物理、化学、生物转化过程。其中主要形式是和土壤中的铁、铝、钙结合形成无机磷。而由于不同的溶解度,对植物的效用也不同,且会发生变化,如施肥、培养时间等会影响相互之间的关系及相互之间的迁移转化,最终导致磷的特性发生改变。鉴

于富含磷马铃薯加工废水的大量施用,造成各种环境下土壤磷素形态发生迁移转化,磷有效性提高。

2.3.3 钾元素。从表 7 可以看出,一直施用清水灌地的土壤在 30~60 和 60~90 cm 2 个不同剖面中钾含量在 95.87~190.51、81.35~130.11 mg/kg。同样还田量 600 m³/hm²,第一次还田和种植耕作过程中 30~60 cm 剖面钾含量为 110.30~160.89 mg/kg,基本在对照清水范围内。第二次还田和种植耕作过程 30~60 cm 剖面钾含量略有提高。60~90 cm 剖面钾含量变化不明显且在清水对照范围内。

当还田量达 900 m³/hm² 时,30~60 和 60~90 cm 2 个剖面的钾含量:172.44~299.44、93.63~196.47 mg/kg。与清水还田对照相比,2 个断面钾含量都有较大幅度的提高。还田量为 1 200 m³/hm² 时,30~60 cm 剖面的钾含量:248.34~

269.00 mg/kg(2018 年 6 月)、300.37~310.05 mg/kg(2018 年 10 月)、350.05~360.32 mg/kg(2019 年 6 月)和 390.19~500.41 mg/kg(2019 年 10 月);60~90 cm 剖面的磷含量:126.88~170.70 mg/kg(2018 年 6 月)、185.87~200.02 mg/kg(2018 年 10 月)、220.38~310.31 mg/kg(2019 年 6 月)和

220.27~310.09 mg/kg(2019 年 10 月)。与清水还田对照相比,2 个断面的钾含量都提高 2~3 倍。当还田量达到 3 000 m³/hm² 时,2 个断面的钾含量整体提高了 3~6 倍(图 3)。

表 7 不同有机废水还田量下土壤剖面钾含量

Table 7 Potassium content of soil profile under different organic wastewater returning field										mg/kg
还田量 Returning amount m ³ /hm ²	土壤剖面 Soil profile cm	2018-06		2018-09		2019-06		2019-10		
		玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	玉米 Corn	马铃薯 Potato	
0	30~60	95.87	99.83	135.37	130.32	190.51	180.16	180.14	160.20	
	60~90	81.35	87.63	120.21	130.11	130.24	130.01	120.21	130.11	
600	30~60	110.30	136.81	160.89	150.21	210.32	200.26	250.30	200.10	
	60~90	88.67	106.94	135.65	140.30	160.77	150.81	170.57	140.22	
900	30~60	172.44	243.32	245.37	240.25	299.44	260.63	290.89	280.52	
	60~90	93.63	153.30	154.27	160.62	190.48	180.18	196.47	180.43	
1 200	30~60	248.34	269.00	300.37	310.05	360.32	350.05	500.41	390.19	
	60~90	126.88	170.70	185.87	200.02	310.31	220.38	310.09	220.27	
3 000	30~60	559.73	598.00	640.78	620.02	760.45	780.36	941.28	830.24	
	60~90	175.71	208.70	295.32	300.01	347.61	356.41	384.16	370.41	

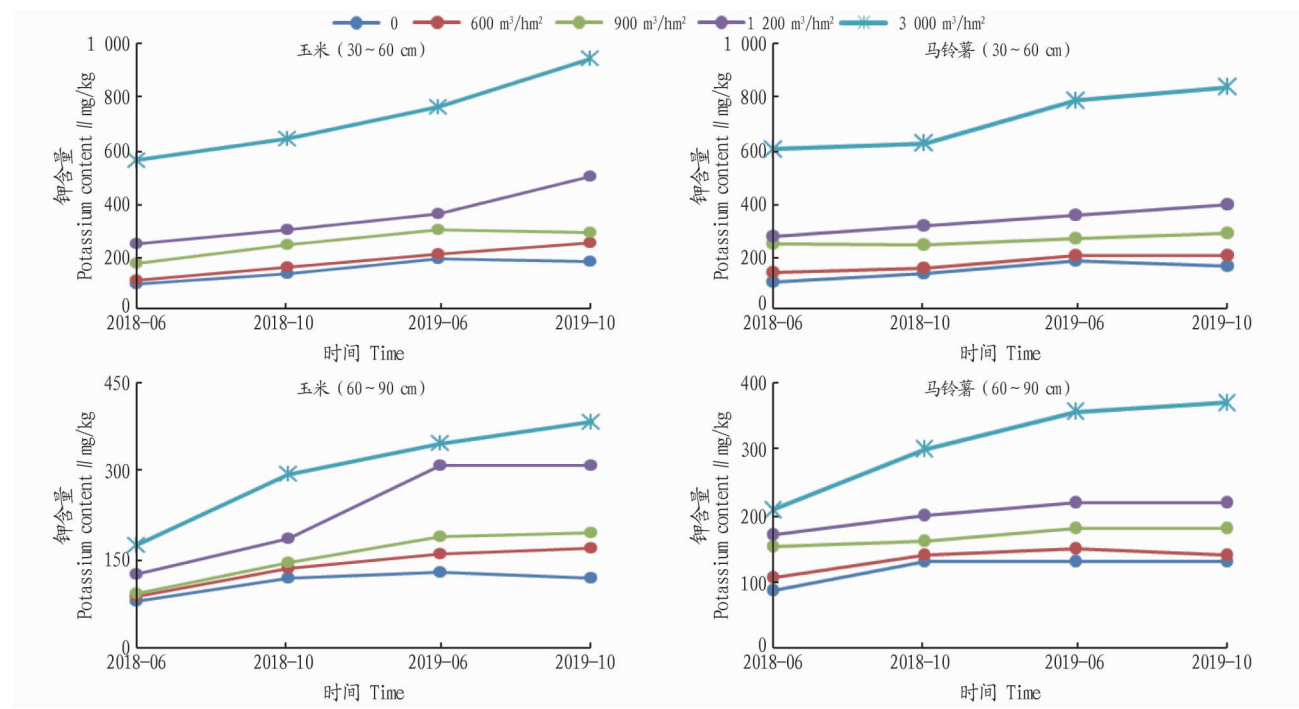


图 3 多次施用有机废水还田量下土壤剖面钾含量的变化

Fig. 3 Changes of potassium content in soil profile with the amount of organic wastewater returning field during repeated application

3 结论

(1)在试验基地Ⅲ级土壤上施用马铃薯淀粉原汁水与冲洗水混合水还田时,还田量 600~900 m³/hm² 时,能明显提高土壤中有机质、全氮、有效磷、速效钾的含量,使土壤全氮、有效磷、速效钾养分等级从Ⅲ级提高到Ⅰ级,有机质提高到Ⅲ级。因此,还田量 600~900 m³/hm² 能明显提高土壤养分等级,增加土壤肥力。还田量超过 900 m³/hm² 时,在 0~30 cm 耕作层中明显出现氮磷钾的富集,尤其是第二次重复还田施用,氮富集量增加较快,过量磷钾通常容易

被土壤固化。

(2)试验基地相比清水对照还田的土壤,有机废水还田量为 600 m³/hm² 时,30~60 和 60~90 cm 剖面中氮元素无明显迁移趋势。有机废水还田量超过 900 m³/hm² 时,在 30~60、60~90 cm 2 个剖面氮元素有明显迁移变化,随着还田量、还田和耕作次数的增加,氮向下迁移的量越大。

(3)当有机废水还田量达 600 m³/hm² 时,磷和钾元素已经开始向下迁移,随着还田量、还田和耕作次数的增加,磷和

(下转第 111 页)

600~1 000、400~600、250~350、150 mm^[1],基本表现为海拔越高,降水越多。牧草初水分和绝对含水量呈现从高海拔高寒草甸到低海拔山地荒漠草原逐渐降低的趋势,反映了草甸和草原区植物含水量较高(干鲜比较低),而干旱区(山地荒漠草原)植物含水量低(干鲜比较高)的植被构成特点。

3.2 植物种类是影响山地草地牧草风干后含水量的重要因素 牧草风干后仍含有部分水分,即吸附于蛋白质、淀粉等的吸附水^[7]。试验分析表明,山地草地牧草样品干重实际上比真实的干重高出5%~32%。不同山地草地因光照、热量、土壤等不同生境条件形成不同植被类群是影响牧草风干后含水量的主要因素,同时受到气候变化、冰川退缩、土地开垦、畜牧超载以及退耕还草(林)、围栏禁牧、生态补水等诸多自然和人为干扰影响^[8-9]。

3.3 平原低地草甸与山地草地的牧草含水量的成因不同 该研究表明,平原低地草甸牧草含水量仅次于高寒草甸和山地草甸,是伊犁河谷的四季放牧场和主要割草地之一。平原低地草甸分布在伊犁河谷平原扇缘低洼地,牧草除依靠天然降水生长外,主要依靠地下水发育而成。

3.4 同一草地类型不同种属或同一种属不同种类的牧草,其含水量都有差异 山地草甸是伊犁河谷植被种类最丰富、优良牧草品种最多的草地类型。该研究表明,山地草甸上豆科牧草与禾本科牧草的含水量不同,2种豆科牧草初水分的平均值(68.6%)高于3种禾本科牧草初水分平均值(63.9%),不同种类的牧草含水量有较大差异。这与来强等^[10]的研究结果(不同牧草由于其化学成分不同,含水量存

在一定差异)相一致。同类型草地上由于群落构成不同,其牧草含水量也存在明显差异。

4 小结

该试验分析了不同山地草地牧草含水量的差异,结果表明,海拔、降水量、植物种类都是影响山地草地含水量的主要因子。不同的山地草地在畜牧业生产中利用方式不同,利用干鲜比、风干干鲜比与烘干干鲜比的比例系数,可以简单、快速、准确地估算不同山地草地的饲草供给量,为天然草地草畜平衡优化、草场分区轮牧、确定家庭牧场放牧牲畜数量等方面提供理论依据。

参考文献

- [1] 许鹏.新疆草地资源及其利用[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1993.
- [2] 闫俊杰,乔木,周宏飞,等.基于MODIS/NDVI的新疆伊犁河谷植被变化[J].干旱区地理,2013,36(3):512-519.
- [3] 刘芳,张红旗,董光龙.伊犁河谷草地植被NDVI变化及其降水敏感性特征[J].资源科学,2014,36(8):1724-1731.
- [4] BARNES R F, NELSON C J, COLLINS M, et al. Forages: An introduction to grassland agriculture[M]. Ames: Iowa State University Press, 2003.
- [5] 马文红,方精云,杨元合,等.中国北方草地生物量动态及其与气候因子的关系[J].中国科学:生命科学,2010,40(7):632-641.
- [6] 范天文,张琳,王健.伊犁河谷畜牧业现状及可持续发展对策[J].草学,2018(1):80-82,86.
- [7] 杨胜.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:北京农业大学出版社,1999:34-45.
- [8] 王智,师庆三,王涛,等.1982—2006年新疆山地—绿洲—荒漠系统植被覆盖变化时空特征[J].自然资源学报,2011,26(4):609-618.
- [9] 罗敏,古丽·加帕尔,郭浩,等.2000—2013年塔里木河流域生长季NDVI时空变化特征及其影响因素分析[J].自然资源学报,2017,32(1):50-63.
- [10] 来强,李青丰,莫日根敖其尔,等.影响牧草含水量测定以及牧草干鲜比的主要因素[J].中国草地学报,2008,30(4):73-77.

(上接第96页)

钾元素向下迁移量越明显。而且在向下迁移过程中,有效磷和速效钾有逐渐转化为矿化磷和矿物质钾的固化趋势。

(4)马铃薯淀粉加工废水施用到耕地中可有效降低化肥施用量,并且可以提升农产品品质,有助于实现有机农业生产,是“好水”,是“肥水”。

参考文献

- [1] 周凤霞,姚运先,曹卫华,等.人工湿地处理污水的效率与研究展望[J].环境科学与管理,2007,32(6):106-110,113.
- [2] 徐刘凯.农业非点源的迁移规律及非点源污染负荷:以赣江下游为例[D].南昌:华东交通大学,2012.
- [3] 王沛芳,王超,胡颖.氮在不同生态特征沟渠系统中的衰减规律研究[J].水利学报,2007,38(9):1135-1139.
- [4] 李强坤,胡亚伟,孙娟.农业非点源污染物在排水沟渠中的迁移转化研究进展[J].中国生态农业学报,2010,18(1):210-214.
- [5] 郎晓峰,徐阳春,沈其荣.不同有机无机复混肥对土壤供氮和玉米生长的影响[J].生态与农村环境学报,2008,24(3):33-38.
- [6] 黄蕾,翟建平,王传瑜,等.4种水生植物在冬季脱氮除磷效果的试验研究[J].农业环境科学学报,2005,24(2):366-370.
- [7] 王婷婷,王俊,赵牧秋,等.有机肥对设施菜地土壤磷素累积及有效性

的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(1):95-100.

- [8] 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.
- [9] FENNESSY M S, CRONK J K, MITSCH W J. Macrophyte productivity and community development in created freshwater wetlands under experimental hydrological conditions[J]. Ecological engineering, 1994, 3(4): 469-484.
- [10] LANTZKE I R, MITCHELL D S, HERITAGE A D, et al. A model of factors controlling orthophosphate removal in planted vertical flow wetlands[J]. Ecological engineering, 1999, 12(1/2): 93-105.
- [11] SEPASKHAH A R, TAFTEH A. Yield and nitrogen leaching in rapeseed field under different nitrogen rates and water saving irrigation[J]. Agricultural water management, 2012, 112(9): 55-62.
- [12] SAHRAWAT K L. Organic matter accumulation in submerged soils[J]. Advances in agronomy, 2004, 81(3): 169-201.
- [13] 张维理,武淑霞,冀宏杰.中国农业面源污染形势估计及控制对策I.21世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.
- [14] 张田,许浩,茹淑华,等.不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异[J].环境科学,2017,38(12):5247-5255.
- [15] 张经纬,曹文超,严正娟,等.种植年限对设施菜田土壤剖面磷素累积特征的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(5):977-983.
- [16] 叶玉适,梁新强,李亮,等.不同水肥管理对太湖流域稻田磷素径流和渗漏损失的影响[J].环境科学学报,2015,35(4):1125-1135.