

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.20288

养殖污水灌溉对不同土层磷素形态含量的影响

杨焕焕¹, 杜君^{1*}, 刘红恩^{2*}, 杨占平¹, 和爱玲¹

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所 / 河南省农业生态与环境重点实验室, 河南 郑州 450002; 2. 河南农业大学资源与环境学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 通过采集养殖污水灌溉和常规清水灌溉农田不同土层深度土壤, 采用连续提取法进行土壤磷素的形态分级, 分析比较了污水灌溉和清水灌溉条件下不同土层中各磷素形态含量及其分布差异, 探明养殖污水灌溉后土壤磷素形态转化规律。结果表明, 与清水灌溉处理相比, 养殖污水灌溉后各土层水溶性 $-Pi$ 和 $NaHCO_3-Pi$ 的含量显著增加, 0 ~ 20 cm 土层两者之和 (为活性磷) 占该土层总磷比例提高了 15.03 个百分点。污水灌溉还能显著增加 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层中 $NaOH-Pi$ 含量, 但各土层活性磷含量的增幅显著高于 $NaOH-Pi$ 含量, 表明污水灌溉对活性磷形态的影响最大。同时, 各土层中 $HCl-Pi$ 、有机磷、残渣态 $-P$ 占总磷比例均相应减少, 从而降低了磷的固定, 结果均表明污水灌溉后土壤有效形态磷含量增加, 这对小麦的生长发育具有重要意义。

关键词: 养殖污水; 灌溉; 土层; 磷素形态; 磷分级

随着我国经济的持续快速发展, 规模化、集约化畜禽养殖业发展迅猛, 其生产过程中产生大量的粪便和有机污水^[1-2]。养殖污水中含有大量的养分, 特别是氮、磷养分较为丰富^[3-7]。据统计^[8], 养猪场鲜猪粪中含磷量为 0.4%, 而鲜猪尿中含磷量为 0.12%, 按照每头猪每天产鲜猪粪 3.0 kg、鲜猪尿 3.5 L 计算, 一个 20000 头的大型养猪场每天通过养殖废弃物向环境中排放的磷可达 324 kg。科学合理地利用养殖污水进行农田灌溉能显著增加土壤养分含量, 从而可以减少农田化肥用量、节约肥料资源。但不合理的灌溉量及灌溉方式都会引起土壤磷素的累积, 造成水体富营养化, 同时加速土壤磷素的垂直迁移^[9]。

河南新郑市薛店镇分布着雏鹰农牧等多家大规模养猪场, 每天产生大量的养殖废水, 当地农民习惯将好氧发酵的养殖废水直接进行农田灌溉利用。而该区域广泛分布着风沙土, 土壤质地砂性, 有机

质含量较低, 养分贫瘠, 土壤对养殖污水中的磷素吸持性较差, 磷素容易产生剖面垂直迁移。因此, 该区域由于养殖污水灌溉导致土壤磷素迁移、地下水污染的环境风险不容忽视。本文采用田间实地采样与室内分析相结合的方法, 采集养殖污水灌溉和清水灌溉农田不同深度的土壤, 探明养殖污水灌溉对农田土壤磷素形态的分布与转化的影响, 为进一步研究养殖污水合理灌溉、降低养殖污水中的磷素在土壤中垂直迁移风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于新郑市薛店镇菜园马村, 土壤类型为风沙土, 0 ~ 20 cm 土壤全磷含量为 0.72 g/kg、有效磷含量为 13.1 mg/kg、容重为 1.24 g/cm³; 20 ~ 40 cm 土壤全磷含量为 0.74 g/kg、有效磷含量为 12.7 mg/kg、容重为 1.53 g/cm³; 20 ~ 40 cm 土壤全磷含量为 0.70 g/kg、有效磷含量为 10.4 mg/kg、容重为 1.42 g/cm³。常年采用小麦-玉米轮作种植模式, 每季施用作物专用复合肥 750 kg/hm²。雏鹰农牧第一生猪出口基地位于该村, 养殖规模 1 万头, 每天产生约 200 t 的养殖废水, 当地居民有直接将好氧发酵的养殖污水进行农田灌溉的习惯。新郑市薛店镇菜园马村紧邻京港澳高速公路, 地处豫西伏牛山系箕山余脉向豫东平原过渡地带, 属于暖温带

收稿日期: 2020-05-16; 录用日期: 2020-06-18

基金项目: 国家重点研发计划“黄淮海夏玉米化肥农药减施技术集成研究与示范”项目(2018YFD0200600); 国家重点研发计划“黄淮海冬小麦化肥农药减施技术集成研究与示范”项目(2017YFD0201700)。

作者简介: 杨焕焕(1988-), 女, 河南南阳人, 助理研究员, 硕士, 主要从事植物营养与作物施肥方面研究。E-mail: 13253375996@163.com。

通讯作者: 杜君, E-mail: dujun0520@163.com; 刘红恩, E-mail: liuhongen7178@126.com。

季风气候, 年均日照时数 2175.1 h, 日照率 49.0%。年平均气温 14.3 ℃, 年均无霜期 218 d, 结冰期 52 d。年均降水量 780 mm, 气候温和, 四季分明, 光能充裕, 热量丰富, 无霜期长。

1.2 试验设计

选取常年进行养殖污水灌溉的农田和未进行污水灌溉(常规清水灌溉)的典型农田为 2 个试验处理, 通过农户调查的方式, 选取研究区域各处理农田代表面积 50 hm², 调查样本数 10 个。采用 S 形多点取样法, 利用土钻采集 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土壤样品, 每个田块(样本区)多点取样混合为一个样品。样品采集后, 风干, 磨碎, 过 1 mm 筛, 进行土壤磷素形态分级, 分析比较污水灌溉和清水灌溉条件下不同土层中各种磷素形态的分布差异。采样时间为 2018 年 3 月。污水灌溉的农田每次灌溉 60 m³/hm², 每年灌 4 次, 已连续灌溉两年, 灌溉采用的养殖污水水质为: pH 6.92、COD 2817 mg/L、总氮 670 mg/L、总磷 76.07 mg/L。

1.3 测试项目和方法

针对土壤不同磷形态的定量分析, 目前 Bowman-Cole^[10-11] 的有机磷分级体系和 Hedley 等^[12] 磷分级体系仍被国内外学者广泛应用, 本研究采用了 Hedley 等^[12] 和薛艳凌等^[13] 提出的连续浸提法土壤磷素形态分级体系, 并稍做了修正。磷素分级提取的步骤: (1) 水溶态 -Pi, 蒸馏水提取后用钼蓝比色法测定; (2) NaHCO₃-Pi 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取后直接用钼蓝比色法测定, NaHCO₃-Po 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 提取后再用硫酸高温消煮后用钼蓝比色法测定, 然后减去 NaHCO₃-Pi; (3) NaOH-Pi 用 0.1 mol/L NaOH 提取, 直接用钼蓝比色法测定, NaOH-Po 用 NaOH 提取后再用硫酸高温消煮后用钼蓝比色法测定, 然后减去 NaOH-Pi; (4) HCl-Pi, 用 1.0 mol/L HCl 提取钼蓝比色法测定; (5) 残渣态 -P, 用浓硫酸、双氧水消煮提取剩余的残渣态磷, 钼蓝比色法测定。

其中, Pi 为无机磷, Po 为有机磷。与原分级方法不同之处是 NaOH-Po 的测定采用的是氢氧化钠提取后硫酸消煮测定与氢氧化钠提取后直接测定的差值。

1.4 统计分析

所有数据采用 Excel 2013 和 DPS 软件进行分析处理, 各处理平均值的多重比较采用新复极差法 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 养殖污水灌溉对不同土层水溶态磷含量的影响

由表 1 可知, 不论是污水灌溉还是清水灌溉, 随着土层深度的增加水溶态 -Pi 均显著降低。与清水灌溉处理相比, 污水灌溉处理各土层之间水溶态 -Pi 差异更加显著, 0 ~ 20 cm 土层水溶态 -Pi 含量大约是 20 ~ 40 cm 土层的 4 倍, 是 40 ~ 60 cm 土层的 12 倍, 均达到极显著差异。而清水灌溉处理 0 ~ 20 与 20 ~ 40 cm 土层之间水溶性 -Pi 含量无显著差异, 0 ~ 20 与 40 ~ 60 cm 土层之间水溶性 -Pi 含量则差异显著。

表 1 不同灌溉条件下不同土层水溶态 -Pi 的分布特征

灌溉条件	土层 (cm)	水溶态 -Pi (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	28.50a	356.66	7.99
	20 ~ 40	7.07b	275.66	2.56
	40 ~ 60	2.47c	227.29	1.09
清水	0 ~ 20	4.39d	301.32	1.46
	20 ~ 40	3.33d	242.11	1.38
	40 ~ 60	0.93e	196.43	0.47

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

与清水灌溉相比, 污水灌溉能够显著增加各土层水溶态 -Pi 的含量, 尤其是 0 ~ 20 cm 表层土壤表现更加明显, 水溶态 -Pi 占该土层总磷比例由 1.46% 增加到 7.99%, 提高了 6.53 个百分点。污水灌溉处理 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中水溶态 -Pi 含量分别是清水灌溉处理同土层的 6.5、2.12 和 2.66 倍。这说明污水灌溉主要提高了土壤表层水溶性 -Pi 的含量, 磷素向下迁移不明显。

2.2 养殖污水灌溉对不同土层中 NaHCO₃-Pi 含量的影响

表 2 结果显示, 不论是污水灌溉还是清水灌溉, 随着土层深度的增加 NaHCO₃-Pi 含量均显著减少。污水灌溉与清水灌溉各处理土层之间 NaHCO₃-Pi 含量差异均达到显著水平。污水灌溉能显著增加 NaHCO₃-Pi 含量, 污水灌溉处理 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中 NaHCO₃-Pi 含量分别是同土层中清水灌溉处理的 2.8、2.1 和 2.0 倍。

0 ~ 20 cm 表层 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量占该土层总磷的比例由 6.08% 增加到 14.58%，提高了 8.5 个百分点。

表 2 不同灌溉条件下不同土层 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 的分布差异

灌溉条件	土层 (cm)	$\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	51.99a	356.66	14.58
	20 ~ 40	23.87b	275.66	8.66
	40 ~ 60	5.04e	227.29	2.22
清水	0 ~ 20	18.33c	301.32	6.08
	20 ~ 40	11.20d	242.11	4.63
	40 ~ 60	2.43e	196.43	1.24

结合表 1 和表 2，与清水灌溉处理相比，污水灌溉后各土层水溶态 -Pi 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 的含量均显著增加，0 ~ 20 cm 土层中两者之和占该土层总磷比例达到了 22.57%，而清水灌溉处理该土层两者之和占总磷的比例只有 7.54%，提高了 15.03 个百分点，表明污水灌溉后提高了表层土壤中活性磷的比例。

2.3 养殖污水灌溉对不同土层中 NaOH-Pi 含量的影响

由表 3 可知，不论污水灌溉还是清水灌溉， NaOH-Pi 含量均随着土层深度的增加显著减少。两处理各个土层之间差异均达到极显著水平。污水灌溉能显著增加 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 中 NaOH-Pi 含量，污水灌溉处理 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层中 NaOH-Pi 的含量分别达清水灌溉处理的 1.97、1.53 倍，均达到显著差异水平，但对 40 ~ 60 cm 土层几乎没有影响。总的来说，污水灌溉后各土层 (0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm) 的 NaOH-Pi 含量

表 3 不同灌溉条件下不同土层 NaOH-Pi 的分布差异

灌溉条件	土层 (cm)	NaOH-Pi (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	18.21a	356.66	5.11
	20 ~ 40	10.73b	275.66	3.89
	40 ~ 60	3.52d	227.29	1.55
清水	0 ~ 20	9.24b	301.32	3.07
	20 ~ 40	7.02c	242.11	2.90
	40 ~ 60	3.53d	196.43	1.80

没有水溶态 -Pi 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 的增加幅度大，这表明污水灌溉后对磷素形态中活性磷 (水溶态 -Pi 和 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 之和) 的影响最大。

2.4 养殖污水灌溉对不同土层中 HCl-Pi 含量的影响

表 4 结果显示，不论污水灌溉处理还是清水灌溉处理，随土层深度的增加 HCl-Pi 均随之减少，但减少不明显。污水灌溉处理 0 ~ 20 cm 与 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层均差异显著，但 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 之间差异不显著，而清水灌溉处理各土层 HCl-Pi 含量变化与污水灌溉处理相同。污水灌溉后 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 中 HCl-Pi 含量都有所增加，但是污水灌溉处理与清水灌溉处理相比 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm HCl-Pi 占该层总磷的比例都有所下降，这说明污水灌溉能降低 HCl-Pi 在总磷中的比例。

表 4 不同灌溉条件下不同土层 HCl-Pi 的分布差异

灌溉条件	土层 (cm)	HCl-Pi (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	149.36a	356.66	41.88
	20 ~ 40	131.90bc	275.66	47.85
	40 ~ 60	120.18cd	227.29	52.88
清水	0 ~ 20	142.85ab	301.32	47.41
	20 ~ 40	123.56cd	242.11	51.03
	40 ~ 60	112.01d	196.43	57.02

2.5 养殖污水灌溉对不同土层中有机磷含量的影响

土壤 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和 NaOH-Po 之和，构成土壤中的有机磷。表 5 结果显示，总体上，这部分磷占总磷的比例不高。无论污水灌溉处理还是清水灌溉处理，随着土层深度的增加有机磷的含量随之减少。与清水灌溉处理相比，污水灌溉处理 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 有机磷含量均降低，降低幅度分别达 48.29% 和 9.75%，而 40 ~ 60 cm 土层的有机磷含量则表现为升高，升高幅度达 40.0%，但其 3 个土层有机磷总和仍表现为降低，降低幅度达 23.0%，有机磷有向下迁移的趋势。清水灌溉处理各土层之间有机磷含量均差异显著，而污水灌溉处理各层之间有机磷含量则无显著差异，即污水灌溉后有机磷分布趋于平均化。

表 5 不同灌溉条件下不同土层 NaHCO₃-Po 和 NaOH-Po 的分布差异

灌溉条件	土层 (cm)	有机磷 (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	17.04bc	356.66	4.78
	20 ~ 40	18.06bc	275.66	6.55
	40 ~ 60	12.65cd	227.29	5.57
清水	0 ~ 20	32.95a	301.32	10.94
	20 ~ 40	20.01b	242.11	8.26
	40 ~ 60	9.04d	196.43	4.60

2.6 养殖污水灌溉对不同土层中残渣态 -P 含量的影响

残渣态 -P 不能被植物吸收利用, 占土壤中全磷的大部分, 各土层中残渣态 -P 均为总磷的 30% 左右。由表 6 可看出, 无论是污水灌溉还是清水灌溉, 随着土层深度的增加, 残渣态 -P 含量都随之减少。与清水灌溉处理同土层相比, 污水灌溉各土层残渣态 -P 都有增加, 但其占总磷的比例中, 40 ~ 60 cm 土层呈现为增加, 而 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层残渣态 -P 占总磷比例均呈现为降低, 分别降低了 5.83 和 1.32 个百分点。结果表明, 污水灌溉后降低了磷的固定比例, 一定程度上也提高了磷的生物有效性。

表 6 不同灌溉条件下不同土层残渣态 -P 的分布特征

灌溉条件	土层 (cm)	残渣态 -P (mg/kg)	土层总磷 (mg/kg)	占总磷比例 (%)
养殖污水	0 ~ 20	95.56ab	356.66	26.79
	20 ~ 40	84.03bc	275.66	30.48
	40 ~ 60	83.43bc	227.29	36.71
清水	0 ~ 20	93.56a	301.32	31.05
	20 ~ 40	76.99cd	242.11	31.80
	40 ~ 60	68.49d	196.43	34.87

2.7 养殖污水灌溉后土壤磷素形态转化趋势分析

由表 7 可知, 与清水灌溉处理相比, 污水灌溉后活性磷、NaOH-Pi 在总磷中的比例都增加了, 其中活性磷的比例增加最明显。0 ~ 20 cm 土层活性磷占比由 7.54% 提高到 22.57%, 提高了 15.03 个百分点, 20 ~ 40 cm 土层活性磷占比由 6.00% 提

高到 11.22%, 提高了 5.22 个百分点, 40 ~ 60 cm 土层活性磷占比由 1.71% 提高到 3.30%, 提高了 1.59 个百分点, 随着土层深度的增加活性磷的增幅逐渐降低。NaOH-Pi 占总磷的比例中, 0 ~ 20 cm 土层由 3.07% 提高到 5.11%, 提高了 2.04 个百分点, 20 ~ 40 cm 土层由 2.90% 提高到 3.89%, 提高了 0.99 个百分点, 而 40 ~ 60 cm 土层则变化不大。总体上, 活性磷、NaOH-Pi 占总磷比例 0 ~ 20 cm 土层中增加幅度最大。

表 7 不同灌溉条件下不同土层各形态磷占总磷的比例分析

灌溉条件	土层 (cm)	活性磷 (%)	NaOH-Pi (%)	HCl-Pi (%)	残渣态 -P (%)	有机磷 (%)
养殖污水	0 ~ 20	22.57	5.11	41.88	25.67	4.78
	20 ~ 40	11.22	3.89	47.85	30.48	6.55
	40 ~ 60	3.30	1.55	52.88	36.71	5.57
清水	0 ~ 20	7.54	3.07	47.41	31.05	10.94
	20 ~ 40	6.00	2.90	51.03	31.80	8.26
	40 ~ 60	1.71	1.80	57.02	34.87	4.60

与清水灌溉处理相比, 污水灌溉处理 0 ~ 20、20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层 HCl-Pi 占总磷比例均降低, 分别降低了 5.53、3.18 和 4.14 个百分点。有机磷、残渣态 -P 占总磷比例在 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层降低, 而 40 ~ 60 cm 土层中增加, 但增加幅度较小。总体上, 活性磷占总磷比例明显提高, NaOH-Pi 占总磷比例也有所提高, 而 HCl-Pi、有机磷、残渣态 -P 占总磷比例则均降低。这也说明, 污水灌溉后土壤有效形态磷含量增加。其中, 活性磷是植物可以直接吸收利用的形式, 因此利用养殖污水灌溉对小麦的生长发育具有重要意义。

3 讨论

3.1 养殖污水灌溉对不同土层水溶态 -Pi 和 NaHCO₃-Pi 含量的影响

土壤中可直接供植物吸收利用的磷素形态是水溶性磷, 其中水溶态 -Pi 构成了活性磷的大部分。本研究中, 污水灌溉能显著提高各土层水溶态 -Pi 含量, 尤其是表层土壤增幅最大, 表明污水灌溉主要提高了表层土壤水溶态 -Pi 含量, 其原因是猪粪中水溶性磷含量高, 据研究测定^[14], 猪粪中水溶态 -Pi 占总无机磷的 24.04%。猪粪中的高水溶

态 $-Pi$ 是导致猪场污水高磷的主要原因,灌溉后会显著增加土壤水溶态 $-Pi$ 。本研究结果也与谢林花等^[15]、慕韩锋等^[16]、熊俊芬等^[17]得出的长期施磷肥能明显增加土壤速效磷(即活性磷)的结论相一致。 $NaHCO_3$ 提取态磷包括无机磷和有机磷,无机态部分主要吸附在土壤表面,有机态部分主要是可溶性有机磷,它易于矿化^[18]。水溶态 $-Pi$ 和 $NaHCO_3-Pi$ 是植物可利用的有效磷的主要形式,两者之和称为活性磷。本研究中,与清水灌溉相比,污水灌溉后各土层水溶态 $-Pi$ 和 $NaHCO_3-Pi$ 含量均显著增加,表层中两者之和占该土层总磷比例达到 22.57%,提高了 15.03 个百分点。这说明污水灌溉能提高表层土壤中活性磷的比例,这对小麦的生长发育具有重要意义。

3.2 养殖污水灌溉对不同土层 $NaOH-Pi$ 和 $HCl-Pi$ 含量的影响

$NaOH-Pi$ 是与铁、铝结合的无机磷化合物,在石灰性土壤中铁、铝结合的磷含量并不多。本研究也表明,污水灌溉处理和清水灌溉处理 20 ~ 40 和 40 ~ 60 cm 土层中 $NaOH-Pi$ 含量占该土层总磷的比例均不足 5%,其原因主要是与北方土壤矿物成分及气候特点有关。新郑市属暖温带大陆性季风气候,在弱淋溶作用下,碳酸钙向下淀积,磷大部分都被钙固定,土壤中 $NaOH-Pi$ 含量较少。 $HCl-Pi$ 是与钙结合的无机磷化合物,石灰性土壤中钙含量较丰富, $HCl-Pi$ 含量也较高。在石灰性土壤中这部分磷含量最高^[19],无论是污水灌溉还是清水灌溉各土层中 $HCl-Pi$ 含量都占该土层中总磷 40% 以上,这也与穆晓慧等^[20]研究黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征得出的结论一致。

3.3 养殖污水灌溉对不同土层中有机磷含量的影响

土壤总有机磷是 $NaHCO_3-Po$ 和 $NaOH-Po$ 之和,在土壤有机磷对植物的有效性上,一般都认为土壤有机磷较为稳定,作物难于吸收利用,而研究表明^[21],土壤有机磷在植物磷素营养中发挥着重要作用,被土壤无机矿物固定程度低,可直接被植物以有机态吸收利用,还可以通过有机磷的矿化变为无机磷被作物吸收。Bowman 等^[22]研究也发现,用 $NaHCO_3$ 提取的有机磷和无机磷之和与植物吸磷量呈现较好的正相关性。本研究中,污水灌溉后有机磷略微减少,而有研究表明多年施用有机肥可明显增加土壤有机磷含量^[23],其原因就是污水灌溉后

土壤微生物活动旺盛,加速了有机磷的矿化释放。

养殖污水灌溉不合理不但会造成养分流失,还会污染水体^[24-25],为减少农田土壤中畜禽粪肥返田造成的氮、磷流失,畜禽场饲养规模必须与周围农田消纳粪便的能力相适应。本研究没有考虑污水灌溉的定量化问题,科学合理利用养殖污水农田灌溉,降低养殖污水中的磷素在土壤中的垂直迁移风险,需要根据作物不同生育期来考虑不同灌溉量等而做进一步探究。

4 结论

土壤中水溶态 $-Pi$ 和 $NaHCO_3-Pi$ 是有效磷的主要形式,两者之和为活性磷。与清水灌溉处理相比,污水灌溉能够显著增加各土层水溶态 $-Pi$ 和 $NaHCO_3-Pi$ 含量,尤其是 0 ~ 20 cm 土层土壤表现更加明显,该土层中两者之和占同土层总磷比例提高了 15.03 个百分点,结果表明污水灌溉能提高表层土壤活性磷的比例。污水灌溉还能显著增加 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层 $NaOH-Pi$ 的含量,但对 40 ~ 60 cm 土层的 $NaOH-Pi$ 影响较小。

同时,与清水灌溉处理相比,各土层 $HCl-Pi$ 、有机磷和残渣态 $-P$ 占总磷比例均降低,结果均表明污水灌溉后土壤有效形态磷含量增加,这对小麦的生长发育具有重要意义,特别是在越冬期小麦根系吸收效率低,土壤中有足够的有效态磷是小麦正常生长发育的保障。

参考文献:

- [1] 何冠华,杨素勤,刘世亮,等. 养殖污水和清水混灌对小麦苗期生长及土壤速效养分含量的影响[J]. 江西农业学报, 2011, 23(12): 113-115, 120.
- [2] 章明奎,刘丽君,黄超,等. 养殖污水灌溉对蔬菜地土壤质量和蔬菜品质的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 87-91.
- [3] 蔡旺炜,举健,廖林仙,等. 几种方法评价养殖污水灌溉辣椒的品质[J]. 节水灌溉, 2013(8): 32-34.
- [4] 刘红恩,聂兆君,刘世亮,等. 养殖污水灌溉对土壤养分和重金属含量的影响[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(S1): 47-51.
- [5] 戴婷,章明奎. 长期畜禽养殖污水灌溉对土壤养分和重金属积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 36-39.
- [6] 陈晓锋,常志州,黄红英,等. 养殖污水回用对水稻产量及土壤肥力的影响研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(2): 39-42, 70.
- [7] Cordovil C M S, Cabral F, Coutinho J. Potential mineralization of nitrogen from organic wastes to ryegrass and wheat crops[J].

- Bioresource Technology, 2007, 98 (17): 3265-3268.
- [8] 曾悦, 洪华生, 陈伟琪, 等. 畜禽养殖区磷流失对水环境的影响及其防治措施 [J]. 农村生态环境, 2004, 20 (3): 77-80.
- [9] 章明奎, Ahmed E, 鲍陈燕. 养殖污水直灌对稻田土壤氮、磷积累与垂直迁移的影响 [J]. 应用生态学报, 2014, 25 (12): 3600-3608.
- [10] 范业宽, 李世俊, 谭胜昔, 等. Bowman-Cole 法土壤稳定性有机磷分级方法存在问题的探讨 [J]. 土壤通报, 1999, 30 (1): 21-22.
- [11] 范业宽, 李世俊. Bowman-Cole 石灰性土壤有机磷分组法的改进 [J]. 土壤通报, 2004, 35 (6): 743-749.
- [12] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46 (5): 974-976.
- [13] 薛艳凌, 陈新平, 张伟. 振荡方式对土壤磷素分级的影响 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (33): 80-86.
- [14] 米玮洁, 周易勇, 朱端卫, 等. 养殖污染水体-沉积物中磷的化学行为 [J]. 湖泊科学, 2008, 20 (3): 271-276.
- [15] 谢林花, 吕家珑, 张一平, 等. 长期施肥对石灰性土壤磷素肥力的影响 II. 无机磷和有机磷 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (5): 790-794.
- [16] 慕韩锋, 王俊, 刘康, 等. 黄土旱塬长期施磷对土壤磷素空间分布及有效性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (3): 424-430.
- [17] 熊俊芬, 石孝均, 毛知耘. 定位施磷对土壤无机磷形态土层分布的影响 [J]. 西南农业大学学报, 2000, 22 (2): 123-125.
- [18] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展 [J]. 中国土壤与肥料, 2011 (2): 1-9.
- [19] 化党领, 余长坤, 刘世亮, 等. 石灰性土壤不同土层磷形态研究 [J]. 中国农学通报, 2008, 24 (9): 277-282.
- [20] 穆晓慧, 李世清, 党蕊娟. 黄土高原石灰性土壤不同形态磷组分分布特征 [J]. 中国生态农业学报, 2008, 16 (6): 1341-1347.
- [21] 王静, 王磊, 张爱君, 等. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36 (9): 1161-1168.
- [22] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils [J]. Soil Science, 1978, 125 (2): 95-101.
- [23] 黄启为, 彭辉辉, 扬志辉, 等. 旱地土壤无机磷分级方法的比较 [J]. 湖南农业大学学报 (自然科学版), 2001, 27 (6): 457-459.
- [24] 胡慧蓉, 王海龙, Katie B, 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.
- [25] 尹爱经, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水灌溉对稻田土壤磷形态和吸附特征的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36 (7): 1434-1442.

Effects of livestock wastewater irrigation on phosphorus forms content in different soil layers

YANG Huan-huan¹, DU Jun^{1*}, LIU Hong-en^{2*}, YANG Zhan-ping¹, HE Ai-ling¹ (1. Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences/ Henan Provincial Key Laboratory of Soil Pollution Control and Remediation, Zhengzhou Henan 450002; 2. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou Henan 450002)

Abstract: In this study, the soil phosphorus fractions were classified by continuous extraction method for soils collected from the livestock farm wastewater irrigation and conventional fresh water irrigation farmlands in different soil depths. The content of each phosphorus form in different soil layers under livestock wastewater and fresh water irrigation was analyzed and compared. The distribution and transformation characteristics of soil phosphorus form were analyzed. Results showed that the contents of water-soluble-Pi and NaHCO₃-Pi in each soil layer after irrigation with livestock wastewater significantly increased compared with those with fresh water, and the proportion of the sum of water-soluble-Pi and NaHCO₃-Pi (active phosphorus) in the soil layer of 0 ~ 20 cm increased by 15.03 percentage points. Livestock wastewater irrigation also significantly increased the content of NaOH-Pi in 0 ~ 20 and 20 ~ 40 cm soil layers, but the increase of the active phosphorus content in each soil layer was significantly higher than that of NaOH-Pi, indicating that livestock wastewater irrigation significantly impacted the active phosphorus. At the same time, the proportion of HCl-Pi, organic phosphorus, and residual-P in total phosphorus in each soil layer decreased, thus reducing the fixation of phosphorus. Results all showed that the content of soil available phosphorus form increased after livestock wastewater irrigation, which was of great significance for the growth and development of wheat.

Key words: livestock wastewater; irrigation; soil layer; phosphorus forms; phosphorus fractionation