

生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响

马如龙, 段婧婧, 于建光, 薛利红, 索全义, 杨林章

引用本文:

马如龙, 段婧婧, 于建光, 薛利红, 索全义, 杨林章. 生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 216–226.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0366>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

氮肥减量配施有机肥对苹果产量品质及土壤生物学特性的影响

杨莉莉, 王永合, 韩稳社, 马林英, 杨乖成, 韩艳云, 同延安

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 631–639 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1160>

外源Cd胁迫对红壤性水稻土微生物量碳氮及酶活性的影响

郭碧林, 陈效民, 景峰, 张晓玲, 杨之江, 刘巍, 刘文心

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1850–1855 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0344>

不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响

王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 李勇, 于建光

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 125–133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0956>

大气CO₂和O₃升高对菜地土壤酶活性和微生物量的影响

施翠娥, 艾弗逊, 汪承润, 颜守保, 车运城

农业环境科学学报. 2016, 35(6): 1103–1109 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.06.012>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马如龙, 段婧婧, 于建光, 等. 生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1): 216–226.

MA R L, DUAN J J, YU J G, et al. Effects of domestic sewage tail water reuse on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and soil enzyme activities in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1): 216–226.



开放科学 OSID

生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响

马如龙^{1,2}, 段婧婧^{2*}, 于建光², 薛利红², 索全义^{1*}, 杨林章²

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古自治区土壤质量与养分资源重点实验室, 农业生态安全与绿色发展自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010018; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014)

摘 要:为探讨农村生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和酶活性的影响,通过田间试验,以池塘水灌溉下不施肥和常规施肥为对照,探讨尾水耦合氮肥施加方式对稻田土壤微生物量碳氮、土壤酶(脲酶、磷酸酶、硝酸还原酶、过氧化氢酶、蔗糖酶)活性以及土壤养分等的影响。结果表明,2019年和2021年收获期尾水仅施氮肥、尾水常规施肥、尾水减氮施肥土壤微生物量碳较常规施肥处理分别增加了28.75%~34.75%和14.43%~23.63%,土壤微生物量氮分别增加了7.10%~16.04%和15.9%~46.88%。尾水灌溉处理脲酶活性两年间分别增加了34.92%~51.61%和0.98%~2.94%,有机质分别增加了1.11%~11.10%和6.38%~11.40%,年际间比较发现无论池塘水灌溉还是尾水灌溉土壤有机质含量均有上升趋势,而尾水灌溉处理土壤有机质增幅更大。综上所述,尾水灌溉提高了稻田土壤有机质、微生物量碳氮的含量和脲酶活性,说明尾水回用在一定程度上会增加土壤肥力,具有一定的土壤改良作用,但长期回用下的环境安全性还需要通过进一步试验确定。

关键词:生活污水尾水;灌溉;土壤微生物量碳;土壤微生物量氮;土壤酶活性

中图分类号:X799.3;S154 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)01-0216-11 doi:10.11654/jaes.2022-0366

Effects of domestic sewage tail water reuse on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents and soil enzyme activities in paddy fields

MA Rulong^{1,2}, DUAN Jingjing^{2*}, YU Jianguang², XUE Lihong², SUO Quanyi^{1*}, YANG Linzhang²

(1. College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Inner Mongolia Key Laboratory of Soil Quality and Nutrient Resources, Key Laboratory of Agricultural Ecological Security and Green Development at Universities of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot 010018, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Field experiments were conducted to explore the changes in the microbial biomass carbon and nitrogen contents and enzyme activities in paddy field soil after the reuse of rural domestic sewage tail water. The effects of combined applications of tail water and nitrogen fertilizer on the soil microbial biomass carbon and nitrogen contents, soil enzyme (urease, phosphatase, nitrate reductase, catalase,

收稿日期:2022-04-15 录用日期:2022-06-09

作者简介:马如龙(1997—),男,内蒙古乌兰察布人,硕士研究生,主要从事农村生活尾水回用对稻田土壤养分及安全性的研究。

E-mail: mrl3003@163.com

*通信作者:段婧婧 E-mail: duanjingjing_23@163.com; 索全义 E-mail: paul98@sina.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3201503-03, 2021YFD1700803-03)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2021YFC3201503-03, 2021YFD1700803-03)

and sucrose) activities, and soil nutrients in paddy fields were investigated, with no fertilization and conventional fertilization under pond water irrigation used as the control. The results showed that the application of tillering fertilizer, conventional fertilization, or nitrogen reduction fertilization under tail water reclamation increased the soil microbial biomass carbon content by 28.75%–34.75% and 14.43%–23.63%, and the nitrogen content by 7.10%–16.04% and 15.9%–46.88%, in 2019 and 2021, respectively, relative to the contents in the soil. During these two years, the urease activity increased by 34.92%–51.61% and 0.98%–2.94%, respectively, and the organic matter by 1.11%–11.10% and 6.38%–11.40%, respectively, under tail water irrigation treatment. Although the organic matter content in the water-irrigated soils generally presented an upward trend, the increase was greater in soils irrigated with tail water. In summary, the contents of soil organic matter and microbial biomass carbon and nitrogen and the urease activity in the paddy fields were increased by tail water irrigation, indicating that the reuse of tail water could increase soil fertility to a certain extent and plays a role in soil improvement. However, the environmental safety of the long-term reuse of tail water in the paddy field needs to be determined with further experiments.

Keywords: domestic sewage tail water; irrigation; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; soil enzyme activity

水资源短缺已经成为一个严重的问题^[1],随着经济的快速发展,目前未经处理的生活污水任意排放对环境的影响越来越受到关注^[2],利用处理过的生活污水灌溉农田不仅可以达到污水处理的目的,还可满足作物对水分与养分的需求^[3]。

土壤是作物生存的基础,土壤质量的好坏直接关系到人类的生存。土壤养分是由土壤提供的植物生长所必需的营养元素。在自然土壤中,土壤养分主要来源于土壤矿物质和土壤有机质,其次是大气降水、地表径流和地下水;在耕作土壤中,还来源于施肥和灌溉。土壤养分和理化性质能够表征土壤的健康状况^[4],而土壤质量的改善和保护对稻田可持续发展具有重要意义。

本研究主要对农村生活污水尾水不同回用方式下稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性等的变化进行了研究,试图揭示农村生活污水尾水灌溉稻田土壤的理化性质以及土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的初步变化规律,为生活污水尾水稻田回用提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于江苏省南京市高淳区东坝镇新中村(118°52′55.34″E,31°16′27.92″N),试验场地为农村生活污水尾水回用示范基地,从2017年开始运行。该区域属于亚热带季风气候,四季分明,降水主要集中在6—10月,降水量年际变化大。该地区土体结构

稳定,持水性和植被状况良好。农业生产主要以水稻种植为主。本试验选取两种灌溉水源,分别为经东坝镇生活污水处理厂处理的农村生活污水尾水和池塘水,本试验供试水稻品种为武运粳31,试验区土壤基本理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

本试验采用大田试验,处理组设置如下:池塘水灌溉不施肥(CN0)和池塘水灌溉常规施肥(CN)为对照;池塘水灌溉、有机肥(基肥)+化肥(蘖肥和穗肥)(CON);尾水灌溉仅施蘖肥(STN);尾水灌溉常规施肥(SN);尾水灌溉减量施肥(SRN)。每个处理3个重复,各小区间用20 cm宽、10 cm高的田埂隔开,以防止尾水灌溉期间出现灌溉水径流流失的情况。小区面积约为7 m×8 m,水稻移栽密度约22 cm×22 cm。各小区独立灌排,施肥1周内不排水,大雨前3 d不灌溉污水。每次灌水田面水水层保持在3~5 cm。常规施肥组施氮量(TN)为210 kg·hm⁻²,施磷量(P₂O₅)为70 kg·hm⁻²,施钾量(K₂O)为70 kg·hm⁻²。试验所用氮肥为尿素,基肥、蘖肥、穗肥比例为3:3:4;磷肥为过磷酸钙(12%),钾肥为氯化钾(60%),磷、钾肥仅基肥施加,均表施。2019—2021年供试生活污水尾水理化性质见表2。

为了探究生活污水尾水回用对稻田土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的影响,2019年和2021年在水稻穗肥期和收获期分别采集土壤样品进行了分析。两年的种植管理制度如下:2019年试验于6月10日

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soils

pH	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium/(g·kg ⁻¹)	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%
5.98	1.52	0.776	39.8	30	34	36

表2 供试生活污水尾水及池塘水水质

Table 2 Quality of the tested domestic sewage tail water and pond water

项目 Item	pH	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^{-}\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
尾水 Domestic sewage tail water	8.1±0.68a	1 339.04±54.07a	29.18±6.27a	0.16±0.01a	8.39±0.24a	0.46±0.15a	9.11±0.48a
池塘水 Pond water	7.54±0.38a	274.63±42.01b	14.73±2.09b	0.15±0.01a	3.59±0.16b	0.29±0.15a	3.82±0.79b

注:不同小写字母表示同一指标不同水质存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences in water quality for the same index ($P<0.05$).

开始翻耕,6月12日CN、CON、SN、SRN施基肥,13日移栽水稻,6月26日施加分蘖肥,在7月底进行烤田,烤田结束后8月5日施加穗肥,于10月14日收获水稻;2021年试验于6月6日开始翻田,6月8日CN、CON、SN、SRN施基肥,6月9日移栽水稻,6月18日施加分蘖肥,在7月底进行烤田,烤田结束后8月5日施加穗肥,于10月13日收获水稻。

2019年和2021年STN、SN和SRN处理分别灌溉尾水5次和6次,每次灌水量为 $500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,尾水总灌溉量分别为 $2\,500\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3\,000\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。灌水量和氮投入量如表3所示。尾水灌溉处理两年带入的氮素分别为 $24.69\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $27.33\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,占氮投入总量的比例分别为10.52%~28.15%和11.52%~

30.26%。

1.3 测定方法

2019年和2021年于穗肥期和收获期采集0~20 cm土壤样品,采用蛇形取样法用土钻在每个小区土壤表层进行取样,混匀后装于自封袋后密封,标上日期及编号,带回实验室处理,按各具体试验不同将土壤样品分为两部分,一部分新鲜土壤在0~4℃冰箱保存,用于测定土壤微生物量碳氮和酶活性等;另一部分新鲜土壤进行风干处理,过20目和100目筛,用于测定pH、EC等。

土壤微生物量碳和微生物量氮测定采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提法;脲酶活性测定用靛酚蓝比色法;磷酸酶活性测定采用磷酸苯二钠比色法;过氧化氢酶活性采用 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 高锰酸钾滴定法测定,以1 h内每克土壤分解的过氧化氢的毫克数表示过氧化氢酶活性。硝酸还原酶活性测定采用磺胺比色法。蔗糖酶活性以24 h后每克土样所产生葡萄糖的质量来表示。

1.4 数据分析

用Excel 2003软件进行数据处理,采用SPSS 25软件对所得数据进行统计分析,采用方差分析(ANOVA)来评估Duncan多重极差检验在 $P<0.05$ 的概率水平上的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 尾水回用对土壤理化性质和土壤养分的影响

各处理组收获期土壤养分性质如表4所示。2019年CN0处理土壤pH最高为5.22,池塘水施氮肥处理pH最低为4.96,CN0处理显著高于其他处理组。2021年STN处理pH最高为5.85,SRN处理最低为5.50。2021年pH所有处理组均显著高于2019年($P<0.05$)。土壤EC在2019年和2021年尾水SN均最高,分别为284.07、361.63 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,较CN分别增加了29.99%、58.34%。两年间土壤EC值变化较大,相比2019年2021年池塘水灌溉处理土壤EC显著降低,尾

表3 2019年和2021年试验期间氮投入量及灌水量

Table 3 Nitrogen input and irrigation amounts during the trial periods in 2019 and 2021

年份 Year	处理 Treatment	灌水量 Irrigation amount/ ($\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$)		氮投入量 Nitrogen input/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		总计 Total
		池塘水 Pond water	尾水 Domestic sewage tail water	化肥 Fertilizer	灌溉用水 Irrigation water	
2019	CN0	3 000	0	0	11.46	11.46
	CN	3 000	0	210	11.46	221.46
	CON	3 000	0	210	11.46	221.46
	STN	500	2 500	63	24.69	87.69
	SN	500	2 500	210	24.69	234.69
	SRN	500	2 500	168	24.69	192.69
2021	CN0	3 000	0	0	11.46	11.46
	CN	3 000	0	210	11.46	221.46
	CON	3 000	0	210	11.46	221.46
	STN	0	3 000	63	27.33	90.33
	SN	0	3 000	210	27.33	237.33
	SRN	0	3 000	168	27.33	195.33

注:灌溉用水氮投入量=灌水量×总氮含量;总计=化肥氮投入量+灌溉用水氮投入量。

Note: Irrigation water nitrogen input=Irrigation amount×total nitrogen content; Total content=fertilizer nitrogen input+irrigation water nitrogen input.

表4 2019年和2021年收获期各处理土壤养分性质

Table 4 Nutrient properties of soils under different treatments in harvest period in 2019 and 2021

年份 Year	处理 Treatment	pH	EC/ ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-/\text{N}/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+/\text{N}/$ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TN/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有机质 Organic matter/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
2019	CN0	5.22aD	255.30bC	0.23aC	0.32abF	1.48eD	5.12cCD	26.11cF
	CN	4.96dF	218.53cE	0.21aD	0.30abG	1.71abB	5.83bB	28.64bEF
	CON	5.15bD	200.87dF	0.32aA	0.37aE	1.61cdC	6.24aA	28.13bEF
	STN	5.08cDE	202.26dF	0.22aCD	0.29bH	1.68bcB	4.91cD	28.96bEF
	SN	5.14bD	284.07aB	0.25aB	0.32abF	1.55deD	5.21cC	29.34bDE
	SRN	4.98dEF	232.43cD	0.17aE	0.29bH	1.77aA	5.64bB	31.82aCD
2021	CN0	5.67cB	151.90dG	0.05bH	0.56aB	1.03cG	3.95cdHI	28.78dEF
	CN	5.65cBC	150.67dG	0.11aF	0.53aC	1.10abF	4.43abFG	32.47bcBC
	CON	5.83abA	131.37eH	0.04bH	0.53aC	1.16aE	4.75abEF	30.80cdD
	STN	5.85aA	247.23cC	0.05bH	0.73aA	1.01dG	3.64dI	34.54abAB
	SN	5.71bcAB	361.63aA	0.08abG	0.72aA	1.06bFG	4.31cGH	34.62abAB
	SRN	5.50dC	293.87bB	0.05bH	0.42aD	1.10abF	4.80aE	36.17aA

注:同列数据不同小写字母表示该年各处理之间存在显著差异($P<0.05$),不同大写字母表示各处理年际间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters of the same column indicate that there are significant differences among treatments during the same year ($P<0.05$). Different uppercase letters indicate significant differences between years ($P<0.05$).

水灌溉处理显著增加($P<0.05$)。2019年CON处理土壤铵态氮含量最高,为 $0.37\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于STN和SRN处理,其余各处理无显著性差异。2021年各处理氨态氮均显著上升($P<0.05$),STN铵态氮含量最高,为 $0.73\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2019年SRN处理土壤硝态氮含量最低,为 $0.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CON处理最高,为 $0.32\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,当年各处理间无显著性差异。2021年各处理硝态氮含量均显著下降($P<0.05$),CN处理硝态氮含量最高,为 $0.11\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CN0、CON、STN、SRN处理。

土壤有机质是评价土壤肥力的一项重要指标,与多种土壤养分相关,同时对土壤持水供水能力、孔隙度等物理性质有重要的影响。2019年和2021年SRN处理最高,分别为 31.82 、 $36.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。两年中尾水灌溉处理组土壤有机质含量均高于池塘水灌溉处理,2021年达到显著性差异($P<0.05$);除CN0外,2021年各处理土壤有机质均显著高于2019年,池塘水灌溉增加了 $9.49\%\sim 13.37\%$,尾水灌溉增加了 $13.67\%\sim 19.27\%$ 。2019年和2021年土壤TN分别是SRN处理和CON处理最高,为 $1.77\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.16\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,CN0和STN处理最低,分别为 $1.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2019年和2021年土壤TP浓度在CON和SRN处理最高,分别为 $6.24\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.80\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CN0;STN处理最低,分别为 $4.91\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $3.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。2021年各处理土壤TN、TP均显著下降($P<0.05$)。

2.2 尾水回用对土壤微生物量碳氮的影响

土壤微生物量是土壤中的活性养分库,可以直接参与土壤碳氮磷硫等元素的形态转化与循环过程。农村生活尾水灌溉农田后,土壤微生物量碳在不同生育时期尾水灌溉均高于池塘水灌溉处理。2019年和2021年土壤微生物量碳在抽穗期和收获期变化趋势基本一致,但2021年各处理均显著下降($P<0.05$)。2019年和2021年抽穗期STN和SRN处理最高,分别为 $359.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $339.35\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,收获期土壤微生物量碳各处理均略低于抽穗期,抽穗期尾水处理组显著高于池塘水灌溉处理。2019年收获期STN、SN、SRN处理与CON处理无明显差异,但显著高于CN0、CN处理;2021年收获期STN、SN、SRN处理显著高于CN0处理,但与其他处理无显著性差异(图1)。

2019年和2021年,收获期各处理的土壤微生物量氮总体上低于抽穗期。2019年抽穗期,STN、SN处理显著高于CN、CON处理,收获后,SRN处理的土壤微生物量氮含量最高为 $57.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,显著高于CN0、CN处理,STN、SN、SRN处理较CN处理土壤微生物量氮分别增加了 7.1% 、 10.46% 、 16.04% ,尾水灌溉处理组土壤微生物量氮高于池塘水灌溉处理。2021年抽穗期,SN处理含量最高为 $55.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,尾水灌溉处理STN、SN、SRN处理显著高于池塘水灌溉处理组。收获期,SRN处理土壤微生物量氮含量最高为 $39.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,尾水灌溉STN、SN、SRN处理较CN

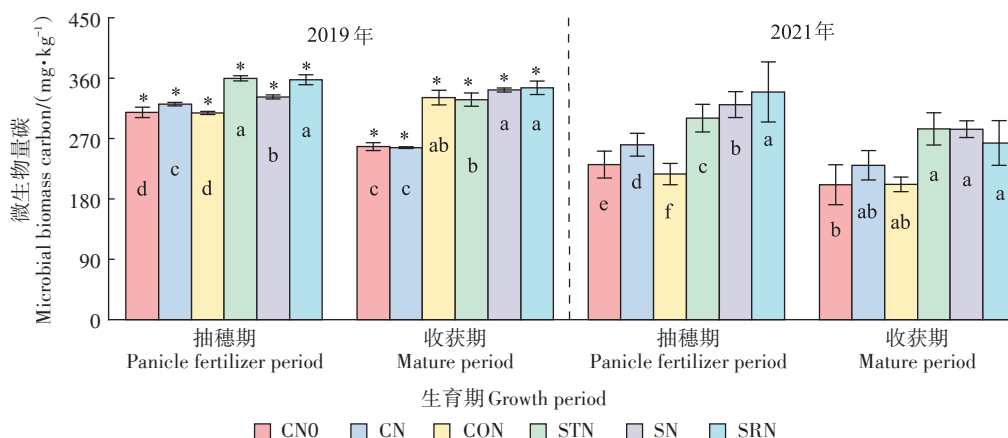
处理分别增加了15.9%、36.8%、46.88%(图2)。与2019年相比较,2021年抽穗期或收获期土壤微生物量氮均有不同程度的下降($P<0.01$ 或 $P<0.05$)。

2.3 尾水回用对土壤酶活性的影响

脲酶是土壤中主要的水解酶之一,对尿素在土壤中的水解及作物对尿素氮的利用有重大影响,在稻田淹水时期也会直接影响到土-水界面氮素的水解和转化,属于绝对专一性酶类。在2019年,抽穗期SN处理脲酶含量最高,为 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。收获期SRN处理脲酶活性最高,为 $0.94 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,STN、SRN处理脲酶活性显著高于其他处理组,STN、SN、SRN处理较CN处理分别增加了46.03%、34.92%、51.61%。2021年抽穗期STN、SN处理脲酶活性最高,分别为0.95

$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,显著高于CN0处理。收获期SRN处理脲酶活性最高,为 $1.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,STN、SN、SRN处理较CN处理分别增加了2.01%、0.98%、2.94%,显著高于CN0、CN和CON处理(图3)。两年相比较,除了抽穗期尾水灌溉处理外,其余处理在生育期年际间均呈显著差异,且2021年收获期各处理土壤脲酶活性均极显著高于2019年($P<0.01$)。

土壤磷酸酶是一类可以催化土壤有机磷矿化的酶,其活性的高低可以直接影响土壤有机磷的分解转化以及生物有效性,是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标。2019年,抽穗期尾水灌溉各处理间土壤磷酸酶活性无显著性差异($P>0.05$),但普遍低于池塘水灌溉处理组;收获后,CN0处理土壤磷酸酶活性



*表示某处理组同一时期不同年份之间达到显著差异($P<0.05$)。**表示某处理组同一时期不同年份之间达到极显著差异($P<0.01$)。小写字母表示该年同一时期各处理间差异显著($P<0.05$)。下同

* indicates the significant difference between different years in the same period for a treatment group ($P<0.05$). ** indicates that a treatment group has a very significant difference between different years in the same period ($P<0.01$). Different lowercase letters indicate significant differences between treatments during the same period of the year ($P<0.05$). The same below

图1 不同生育期各处理对土壤微生物量碳含量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on the soil microbial biomass carbon content at different growth stages

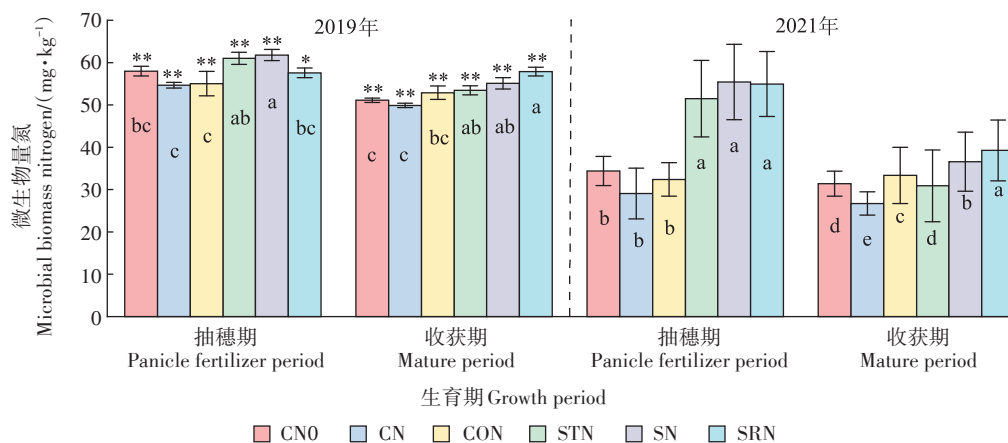


图2 不同生育期各处理对土壤微生物量氮含量的影响

Figure 2 Effects of different treatments on the soil microbial biomass nitrogen content at different growth stages

最高,为 $1.42 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,尾水灌溉处理组间无显著性差异。2021年,各处理组土壤磷酸酶和2019年类似,收获后,池塘水灌溉处理组中,CN0处理显著高于CN、CON处理,尾水灌溉处理组间无显著性差异(图4)。各处理组土壤磷酸酶活性年际变化不明显,仅收获期CON、SN处理极显著或显著上升($P < 0.01$, $P < 0.05$)。

硝酸还原酶是土壤中非增殖的反硝化细菌的一部分,反硝化细菌和硝酸还原酶、亚硝酸还原酶能将 NO_3^- 还原成 NH_3 、 N_2O 、 NO 等气态氮挥发损失,测定硝酸还原酶的活性可以了解土壤中氮素转化中脱氮作用的强度以及氮素的损失状况。2019年,抽穗期CON、SN、SRN处理显著低于其他处理组,CN0处理硝酸还原酶活性最高,为 $0.69 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 0.5 \text{ h}^{-1}$ 。收获期变化趋势和抽穗期一致,土壤硝酸还原酶活性STN、SN、SRN处理相比对照CN0处理分别显著降低了7.69%、38.46%、46.15%($P < 0.05$)。2021年,抽穗期CON、SN、

SRN处理显著低于其他处理组,CN0处理硝酸还原酶活性最高为 $0.7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 0.5 \text{ h}^{-1}$,STN、SN、SRN处理相比CN0处理分别显著降低了11.43%、21.42%、22.85%($P < 0.05$);收获期SN处理硝酸还原酶活性最高,为 $0.734 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 0.5 \text{ h}^{-1}$,与其他处理相比无显著性差异(图5)。两年相比较,除抽穗期CN0处理土壤硝酸还原酶无年际间差异外,其他处理在水稻生育期存在年际间极显著性差异($P < 0.01$)。

过氧化氢酶是一种非常重要的生物酶,在土壤中分布广泛,能够促进过氧化氢对各种化合物的氧化作用,其活性与土壤呼吸强度和微生物活动相关。2019年抽穗期,CN与STN处理过氧化氢酶活性显著高于CN0、CON和SN处理,CN处理过氧化氢酶活性最高,为 $1.40 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;收获期STN处理过氧化氢酶活性为 $1.59 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于其他处理,尾水灌溉下,增施氮肥越高过氧化氢酶活性越低。2021年抽穗期各处理过氧化氢酶活性无显著性差异,收获期CN0、

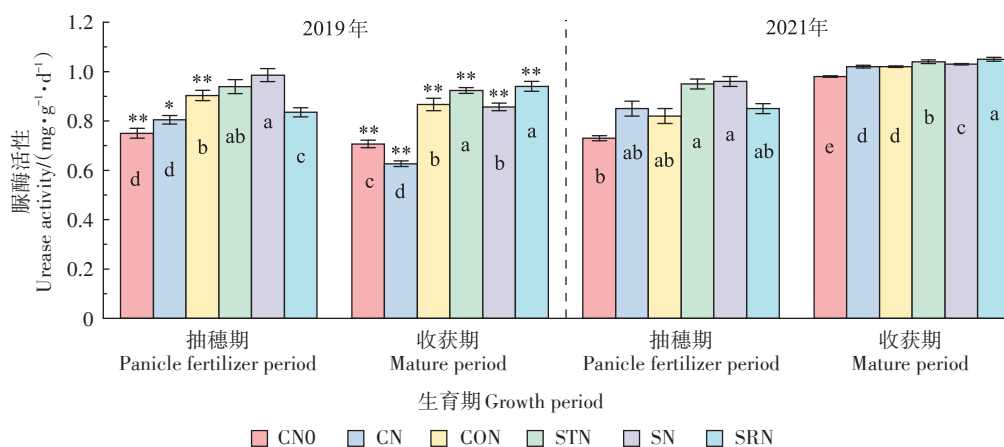


图3 不同生育期各处理对土壤脲酶活性的影响

Figure 3 Effects of different treatments on soil urease activity at different growth stages

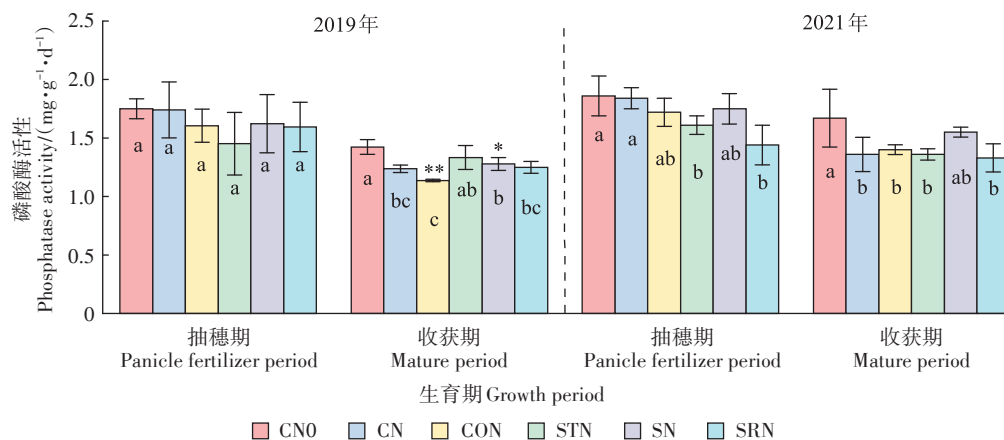


图4 不同生育期各处理对土壤磷酸酶活性的影响

Figure 4 Effects of different treatments on soil phosphatase activity in different growth stages

SN处理最高,分别为 2.05 、 $2.08 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,显著高于STN、SRN处理(图6)。两年相比较,各处理土壤过氧化氢酶活性存在年际间极显著或显著性差异($P < 0.01$, $P < 0.05$)。

土壤蔗糖酶又叫转化酶,是土壤中一种重要的酶类。与土壤有机质、氮、磷含量,微生物数量及土壤呼吸强度有关,其酶促作用产物直接关系到作物生长。2019年,抽穗期CN0、CON、STN处理蔗糖酶活性显著高于其他处理组,收获期CN处理的蔗糖酶活性最低,为 $30.81 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,两个时期尾水灌溉模式下STN处理蔗糖酶活性均显著增高。2021年,抽穗期CN0、STN处理蔗糖酶活性显著高于CN、SN、SRN处理;收获期各处理之间无显著性差异(图7)。土壤蔗糖酶CON和STN处理在收获期年际间无显著性差异($P > 0.05$),其他处理在抽穗期和收获期均有显著性差异($P < 0.01$)。

3 讨论

一般认为农村生活污水尾水灌溉不会引起土壤pH值的增加^[5],而长期尾水灌溉可能会引起土壤盐分含量的升高^[6]。本研究所用的尾水水质为经生活污水处理厂处理达标排放的尾水,和池塘水相比,COD、TN含量较高。试验区土壤pH基础值较低,为 5.98 ,偏酸性土壤。经过3~5 a尾水灌溉后,pH值虽然下降了 $0.06 \sim 1$,但与常规施肥相比没有明显变化,说明农村生活污水尾水灌溉对土壤pH变化影响较小,这与GAYDON等^[7]的研究结果一致。本试验尾水施肥(SN)处理EC值达到了 $284.07 \sim 361.63 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$,显著高于常规施肥处理,这与韩洋等^[8]的研究结果一致。从年际来看,2021年尾水灌溉和池塘水灌溉pH值均高于2019年,随着灌溉时间的增加,土壤pH值略微提高,由于土壤本身具有较好的缓冲作用,使两种水

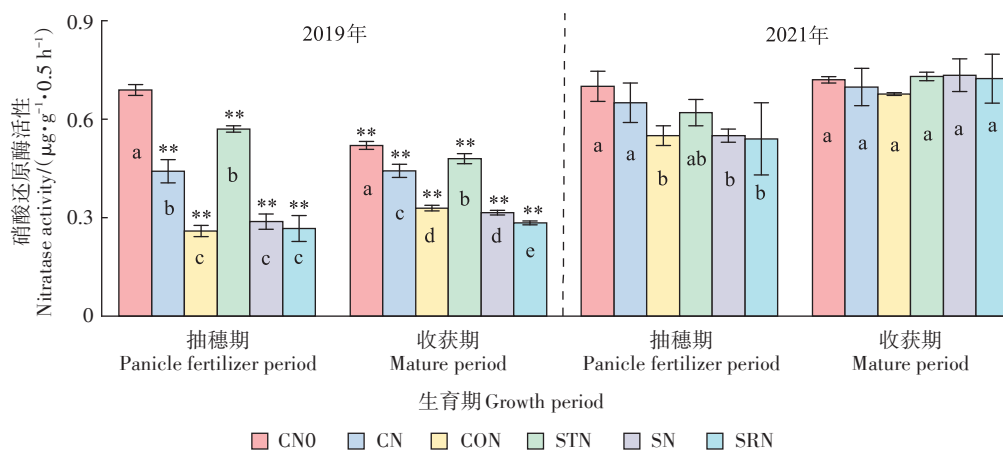


图5 不同生育期各处理对土壤硝酸还原酶活性的影响

Figure 5 Effects of different treatments on soil nitrate reductase activity in different growth stages

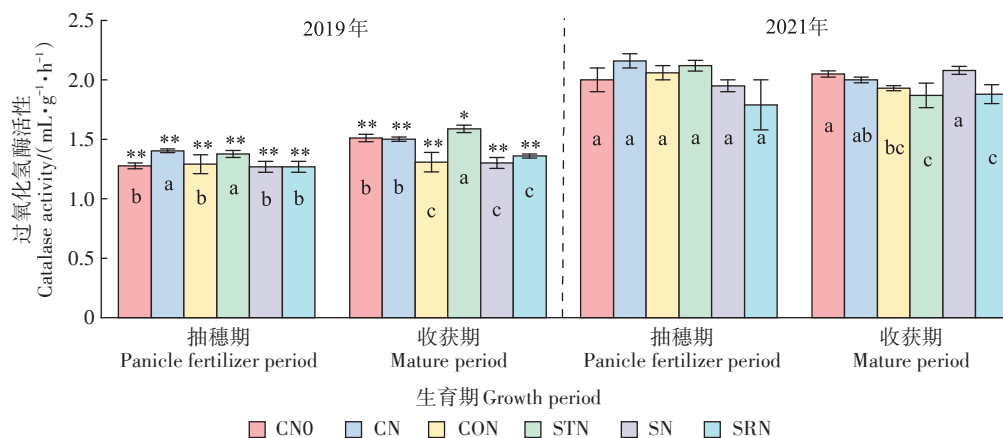


图6 不同生育期各处理对土壤过氧化氢酶活性的影响

Figure 6 Effects of different treatments on soil catalase activity in different growth stages

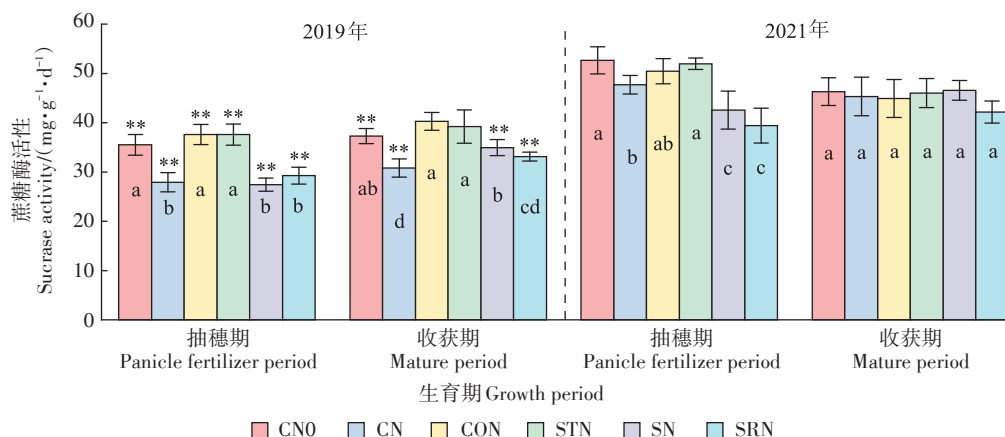


图7 不同生育期各处理对土壤蔗糖酶活性的影响

Figure 7 Effects of different treatments on soil sucrase activity in different growth stages

源灌溉对土壤pH值的影响有限。

达标排放的生活污水尾水中仍含有一定养分物质($TN \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TP \leq 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, GB 18918—2002 一级A标准),将其回用于农田可能有助于土壤肥力的提高。本研究表明,尾水灌溉下土壤有机质含量较高,这可能是由于尾水中碳、氮和磷等营养元素含量高于池塘水,其在土壤中逐渐积累所致,随着灌溉次数的增加,导致土壤有机质含量升高。韩洋等^[9]的研究发现尾水灌溉可以显著提高土壤有机质和全氮含量,这源于农村生活污水尾水中有机质的补给。通过年际间分析来看,池塘水灌溉下土壤有机质含量有一定升高,但尾水灌溉下有机质含量增幅较大,根据灌水水质分析结果看出,池塘水与农村生活污水尾水水质中均含有一定量的COD且尾水COD含量高于池塘水。研究表明,尾水中较高的溶解性有机物主要为色氨酸类芳香族蛋白质、溶解性微生物代谢产物、可见类富里酸、紫外类富里酸4类物质^[10]。但也有研究表明尾水灌溉对土壤有机质和全氮含量无显著影响^[11],这可能是由于试验所用水质存在差异,且灌溉条件和作物类型都可能对试验结果造成影响。尾水灌溉对水稻土壤全磷含量的效果不明显,李中阳等^[12]用再生水和自来水灌溉植物,得出土壤中的全磷含量无明显变化,与本研究结果类似。有学者认为,生活源再生水灌溉对土壤肥力的影响并不确定,可能受土壤质地、灌溉方式等因素的调控^[13]。在今后的研究中,要考虑引起土壤肥力变化的多种变量因素,更加系统地进行田间试验研究。

土壤微生物量是土壤养分中最为活跃的部分,也是土壤养分转化及循环的驱动因素^[14],土壤生物指标

能够敏感地反映土壤质量和健康变化,土壤微生物量碳氮在土壤物质循环、能量转化和污染物降解等方面起着重要作用。本研究表明,在不同生育期尾水灌溉处理土壤微生物量碳、氮含量均高于常规施肥CN处理和有机无机配施CON处理,说明尾水灌溉可在一定程度上提高土壤微生物量碳、氮。何艺等^[15]通过室内模拟试验发现再生水浇灌可以提高土壤微生物量碳,与本研究结果一致,本试验采用的尾水中含有一定的碳、氮、磷营养物质,为微生物提供碳源,刺激其生长,从而促进了微生物量碳、氮的增加。本研究还发现,2021年各处理土壤微生物量碳、氮含量均有一定程度下降,可能是由于田间耕作和施肥等管理措施的影响,因此,在后续的研究中应注意田间耕作和施肥方式的合理应用。

土壤微生物几乎参与土壤中一切生物和生化反应,在土壤的形成、肥力演变以及降解净化有毒物质等方面起着重要作用,是维持土壤质量的重要组成部分^[16]。土壤脲酶是一类可以水解尿素,产生氨和碳酸的酶,其活性反映了土壤氮素的转化和供应强度状况^[17]。尾水灌溉土壤脲酶活性在抽穗期和收获期高于常规施肥对照,农村生活污水尾水灌溉可以促使其活性增强,这可能是由于尾水灌溉后增加了土壤中微生物碳素的供应,有助于增强能分泌脲酶的土壤微生物的活性,进而提高脲酶活性^[18-19]。总之,生活污水尾水灌溉对土壤脲酶活性有一定程度上的增加,但其影响因素错综复杂,确切的原因有待进一步研究。

过氧化氢酶作为生物体内重要物质,主要作用就是参与活性氧代谢过程^[20]。通过研究发现,池塘水灌溉处理组与尾水灌溉处理组在抽穗期和收获期差异

不显著,说明尾水灌溉对土壤中过氧化氢酶活性的影响较小。刘雅文等^[21]通过研究发现尾水灌溉过程磷酸酶含量无显著性变化,与本研究结果一致,而周媛等^[22]通过大田实验发现再生水灌溉施肥处理对土壤过氧化氢酶的活性有促进作用。此前有研究表明,用处理过的生活尾水灌溉可以提高土壤磷酸酶的活性^[23],而 Adrover 等^[24]发现生活尾水灌溉对磷酸酶活性并无差异,这可能是由于供试土壤质地和有机质含量不同所导致,黑土壤黏土含量和有机碳含量较高,有利于微生物生物量和磷酸酶含量的增加^[25]。蔗糖酶能够水解蔗糖变成相应单糖以供作物吸收利用,是评价土壤肥力的重要指标^[26],本试验结果表明,池塘水不施肥处理组硝酸还原酶和蔗糖酶活性相对较高,可能由于不施肥处理氮素供应不足影响作物根系生长,进而影响土壤硝酸还原酶活性,施加一定量氮肥的处理组,酶活性相对较低^[27]。生活污水尾水和池塘水灌溉各处理土壤酶活性在水稻生育期内存在年际间差异,可能与田间耕作管理措施有关。

施用氮肥能促进土壤碳氮比的平衡,提高土壤的理化性质,促进植物和土壤微生物的生长;同时,不同时期施用氮肥能弥补氮素的损耗,有利于微生物的生长,使土壤的酶活性和肥力得到提高。目前已有研究表明,氮素是微生物量氮的主要作用因子,适当的氮肥可以显著地增加微生物量碳和氮含量,但过多的氮则会使微生物量氮含量下降^[28]。另一些研究则指出,氮素含量与微生物量氮含量有着紧密的联系,在一定程度上可以促进微生物氮的保持,进而增加微生物量

氮的含量^[29]。试验中尾水减氮施肥处理两年通过尾水灌溉带入的氮含量分别为 $24.69 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $27.23 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且总氮量相对常规施肥处理 ($221.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 分别减少 $28.77 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $26.13 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,但微生物量碳氮含量却高于常规施肥处理,表明用尾水灌溉带入的氮素能提高稻田土壤微生物量氮,有助于土壤生物肥力的提高。池塘水灌溉虽然也带入了一定氮素 ($11.46 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),但没有引起微生物量碳、氮的上升。Francisco 等^[30]通过研究发现土壤有机质和养分与大多数土壤酶的活性之间存在紧密的关系,表明有机质增加促进了微生物的活动,某些酶的活性(如脲酶)随之增加。因此营养丰富的土壤有利于土壤微生物的繁殖,尾水中含有大量的氮、磷等营养元素,回灌稻田有助于提高土壤的养分。

将土壤酶活性与土壤微生物量碳、氮、有机质、全氮和全磷进行相关性分析可以看到(表5),两年中,脲酶、过氧化氢酶与微生物量碳、氮和有机质呈正相关,蔗糖酶与TN、TP呈负相关关系。磷酸酶与微生物量碳氮、TN呈负相关,2021年脲酶、硝酸还原酶与有机质呈显著正相关。这说明有机质含量的高低是决定土壤酶活性的主要因素之一,同时也是土壤酶活性的重要来源。因土壤酶活性和微生物量碳氮、土壤有机质、TN、TP含量存在一定的相关性,所以可作为评价农村生活污水尾水灌溉后土壤肥力的指标。土壤酶活性及微生物对土壤酸碱环境比较敏感,本研究中试验区pH变化较小,土壤TN、TP对土壤微生物量碳、氮及磷酸酶、硝酸还原酶、蔗糖酶不利的影响可能

表5 土壤酶活性与微生物量碳、氮、有机质、全氮全磷相关性分析

Table 5 Analysis of the correlations of soil enzyme activities with the microbial biomass carbon and nitrogen, organic matter, total nitrogen, and total phosphorus contents

年份 Year	项目 Item	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	硝酸还原酶 Nitratase	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase
2019	微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.554	-0.744	-0.538	0.006	0.221
	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen	0.694	-0.523	0.520	0.137	-0.084
	有机质 Organic matter	0.355	0.459	0.613	0.432	-0.309
	全氮 TN	0.007	-0.393	0.330	0.539	-0.115
	全磷 TP	0.056	0.676	-0.188	0.195	-0.932**
2021	微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.750	-0.308	0.995**	0.208	0.023
	微生物量氮 Microbial biomass nitrogen	0.297	-0.143	0.034	0.072	0.103
	有机质 Organic matter	0.939**	-0.608	0.907*	0.433	-0.458
	全氮 TN	0.161	-0.406	0.430	-0.150	-0.499
	全磷 TP	0.310	-0.367	-0.164	-0.099	-0.705

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关;**表示在 $P<0.01$ 水平上极显著相关。

Note: * means significant correlation at the $P<0.05$ level; ** means significant correlation at the $P<0.01$ level.

是由于土壤养分的变化造成的。

4 结论

(1)与池塘水灌溉相比,生活污水尾水灌溉提高了稻田土壤有机质和微生物量碳、氮的含量,主要是由于尾水中较高的溶解性有机物等成分为微生物提供碳源,刺激其生长所致。

(2)相比常规施肥灌溉,生活污水尾水灌溉下土壤脲酶的活性较高,而土壤脲酶活性与土壤有机质、微生物量碳、氮之间存在一定的正相关性,说明尾水灌溉在一定程度上有利于土壤微生物的繁殖和土壤养分累积。

(3)农村生活污水灌溉下土壤养分、微生物量碳、氮和酶活性均存在年际差异,因此,需进行长期系统的田间试验观测,从多方面进行系统评价。

参考文献:

- [1] SONG M, WANG R, ZENG X. Water resources utilization efficiency and influence factors under environmental restrictions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 184:611–621.
- [2] 宋晓焱,尹国勋,谭利敏,等. 污水灌溉对地下水污染的机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(1):136–138. SONG X Y, YIN G X, TAN L M, et al. Study on mechanism of groundwater pollution due to apply sewage water for irrigation condition[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(1):136–138.
- [3] FONSECA A F D, HERPIN U, PAULA A M D, et al. Agricultural use of treated sewage effluents: Agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil[J]. *Scientia Agricola*, 2007, 64(2):194–209.
- [4] 吴玉红,田霄鸿,同延安,等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(1):173–180. WU Y H, TIAN X H, TONG Y A, et al. Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1):173–180.
- [5] LU S B, SHANG Y Z, LIANG P. The effects of rural domestic sewage reclaimed water drip irrigation on characteristics of rhizosphere soil[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2017, 15(4):1145–1155.
- [6] 魏益华,徐应明,周其文,等. 再生水灌溉对土壤盐分和重金属累积分布影响的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(3):5–8. WU Y H, XU Y M, ZHOU Q W, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on soil salinization and heavy metal distribution[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(3):5–8.
- [7] GAYDON D S, MEINKE H, RODRIGUEZ D. The best farm-level irrigation strategy changes seasonally with fluctuating water availability[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 103:33–42.
- [8] 韩洋,乔冬梅,齐学斌,等. 再生水灌溉水平对土壤盐分累积与细菌群落组成的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(4):106–117. HAN Y, QIAO D M, QI X B, et al. Effects of reclaimed water irrigation levels on soil salinity and composition of soil bacteria community[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(4):106–117.
- [9] 韩洋,齐学斌,李平,等. 再生水和清水不同灌水水平对土壤理化性质及病原菌分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8):32–38. HAN Y, QI X B, LI P, et al. Effects of the amount of irrigation with reclaimed wastewater on soil properties and distribution of pathogenic bacteria[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(8):32–38.
- [10] 杨长明,马锐,汪盟盟,等. 潜流人工湿地对污水厂尾水中有机物去除效果[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(8):1210–1216. YANG C M, MA R, WANG M M, et al. Removal efficiency of organic substances in effluent from a municipal sewage plant by a subsurface constructed wetland[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(8):1210–1216.
- [11] 郭魏,齐学斌,李平,等. 不同施氮水平下再生水灌溉对土壤细菌群落结构影响研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1):280–287. GUO W, QI X B, LI P, et al. Impact of reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization on soil bacterial community structure[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1):280–287.
- [12] 李中阳,樊向阳,齐学斌,等. 城市污水再生水灌溉对黑麦草生长及土壤磷素转化的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(8):1072–1076. LI Z Y, FAN X Y, QI X B, et al. Effect of reclaimed municipal wastewater on ryegrass growth and soil phosphorus conversion[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(8):1072–1076.
- [13] 范春辉,袁文静,辛意. 生活源再生水短期灌溉对表层农业土壤理化性质的影响[J]. *沈阳师范大学学报*, 2021, 39(6):544–548. FAN C H, YUAN W J, XIN Y. Effect of short-term irrigation on physicochemical characteristics of surface agricultural soil with reclaimed water from domestic sources[J]. *Journal of Shenyang Normal University*, 2021, 39(6):544–548.
- [14] 石玉龙,高佩玲,刘杏认,等. 生物炭和有机肥施用提高了华北平原滨海盐土微生物量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4):555–567. SHI Y L, GAO P L, LIU X R, et al. Increased microbial biomass in coastal saline fields of North China Plain by application of biochar and organic manure[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(4):555–567.
- [15] 何艺,谢志成,朱琳. 不同类型水浇灌对已污染土壤酶及微生物量碳的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(6):2227–2232. HE Y, XIE Z C, ZHU L. Effects of reclaimed water irrigation on soil enzyme and soil microbial biomass carbon in paddy soil of wastewater irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2227–2232.
- [16] 焦志华,黄占斌,李勇,等. 再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(2):319–323. JIAO Z H, HUANG Z B, LI Y, et al. The effect of reclaimed water irrigation on soil performance and the microorganism[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(2):319–323.
- [17] 高佳,王姣,王松,等. 生物炭基肥对马铃薯田土壤脲酶活性和产量的影响[J]. *作物杂志*, 2021, 13(6):134–138. GAO J, WANG J, WANG S, et al. Effects of biochar-based fertilizer on soil urease activity and yield of potato[J]. *Crops*, 2021, 13(6):134–138.
- [18] 郭天财,宋晓,马冬云,等. 施氮量对冬小麦根际土壤酶活性的影

- 响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 110–114. GUO T C, SONG X, MA D Y, et al. Effects of nitrogen application rate on soil enzyme activities in wheat rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 110–114.
- [19] 莫宇, 高峰, 王宇, 等. 不同施氮条件下再生水灌溉对土壤理化性质及脲酶活性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 49(1): 95–100. MO Y, GAO F, WANG Y, et al. Changes in soil physicochemical properties and urease activity as affected by reclaimed water irrigation and nitrogen fertilization[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 49(1): 95–100.
- [20] 张坤生, 田荟琳. 过氧化氢酶的功能及研究[J]. 食品科技, 2007, 23(1): 8–11. ZHANG K S, TIAN H L. Research and function of catalase in organism[J]. *Food Science and Technology*, 2007, 23(1): 8–11.
- [21] 刘雅文, 薛利红, 杨林章, 等. 生活污水尾水灌溉对麦秸还田水稻幼苗及土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2739–2745. LIU Y W, XUE L H, YANG L Z, et al. Effects of sewage irrigation on growth of rice seedlings and soil environment with straw incorporation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2739–2745.
- [22] 周媛, 李平, 郭魏, 等. 施氮和再生水灌溉对设施土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 268–273. ZHOU Y, LI P, GUO W, et al. Influence of nitrogen application and reclaimed wastewater irrigation greenhouse soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 268–273.
- [23] ADROVER M, FARRÚS E, MOYÀ G, et al. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95: 188–192.
- [24] ADROVER M, MOYÀ G, VADELL J. Seasonal and depth variation of soil chemical and biological properties in alfalfa crops irrigated with treated wastewater and saline groundwater[J]. *Geoderma*, 2017, 286: 54–63.
- [25] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216–234.
- [26] 陈霞, 罗友进, 程玥晴, 等. 长期沼肥深施对果园土壤养分和酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(11): 103–107. CHEN X, LUO Y J, CHENG Y Q, et al. Effects of deep application of long-term biogas fertilizer on soil nutrients and enzyme activities in orchard[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(11): 103–107.
- [27] 马晓霞, 王莲莲, 黎青慧, 等. 长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(17): 5502–5511. MA X X, WANG L L, LI Q H, et al. Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5502–5511.
- [28] 梁燕菲, 张潇潇, 李伏生. “薄浅湿晒”灌溉稻田土壤微生物量碳、氮和酶活性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1403–1410. LIANG Y F, ZHANG X X, LI F S. Soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in paddy soil under “thin-shallow-wet-dry” irrigation method[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1403–1410.
- [29] 庞欣, 张福锁. 不同供氮水平对根际微生物量氮及微生物活度的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 476–480. PANG X, ZHANG F S. Effect of different nitrogen levels on SMB-N and microbial activity[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 476–480.
- [30] FRANCISCO J D, SANCHEZ-HERNANDEZ J C, NOTARIO J S. Effects of irrigation management on arid soils enzyme activities[J]. *Journal of Arid Environments*, 2021, 185: 104330.

(责任编辑: 叶飞)