

不同类型水浇灌对已污染土壤酶及微生物量碳的影响

何 艺, 谢志成, 朱 琳

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071)

摘 要:采用室内模拟方法,以自来水为对照,研究了再生水、城市综合污水及含油污水短期浇灌对长期污灌区土壤的土壤酶及土壤微生物量碳(SMBC)的影响,探讨了再生水浇灌是否会在一定程度上有利于受污染土壤的肥力和质量的恢复。结果表明,再生水浇灌和自来水浇灌类似,可在一定程度上提高受污染土壤的土壤酶(包括过氧化氢酶、多酚氧化酶和脲酶)活性及 SMBC,促进土壤中石油烃污染物的降解,在一定程度上有利于受污染土壤的肥力和质量的恢复;污水浇灌不利于受污染土壤中石油烃污染物的降解,含油污水浇灌使土壤中石油烃污染物有一定程度的积累;污水浇灌和含油污水浇灌对受污染土壤的土壤酶及 SMBC 没有表现出明显的不利影响,反而有一定程度的刺激作用。

关键词:再生水;浇灌;石油烃;土壤酶活性;土壤微生物量碳

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)06-2227-06

Effects of Reclaimed Water Irrigation on Soil Enzyme and Soil Microbial Biomass Carbon in Paddy Soil of Wastewater Irrigation Area

HE Yi, XIE Zhi-cheng, ZHU Lin

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Effects of different irrigation water (reclaimed water, wastewater, petroleum-containing wastewater and tap water) used for 90 days on soil enzyme and soil microbial biomass carbon (SMBC) from a long-term wastewater irrigation kaleyard were investigated by indoor simulation method. The purpose was to understand whether irrigation with reclaimed water could benefit the remediation of contaminated agricultural soil's fertility and quality. The results showed no significant difference between the reclaimed water and tap water irrigated on the contaminated kaleyard soil. Reclaimed water could lead to the increase of soil enzyme activities (catalase, polyphenol oxidase and urease) and SMBC, and it could accelerate the degradation of petroleum hydrocarbon in the contaminated kaleyard soil. It indicated that irrigation with reclaimed water could benefit the remediation of contaminated soil's fertility and quality. Wastewater had no significant effect on activities of catalase and polyphenol oxidase, but could increase the urease activity. It also led to a increase of SMBC. Wastewater could not accelerate the degradation of petroleum hydrocarbon in the contaminated soil. Petroleum-containing wastewater could also lead to the increase of soil enzyme activities (catalase, polyphenol oxidase and urease) and SMBC, but it resulted an accumulation of petroleum hydrocarbon content in the contaminated soil.

Keywords: reclaimed water; irrigation; petroleum hydrocarbon; soil enzyme activity; SMBC

再生水是一种丰富的潜在水资源,许多国家和地区将其回用于农业灌溉。其优势主要体现在以下方面^[1]:①代替清洁水源,减轻供水压力,是一种有效的节水措施;②水中的 N、P 等营养元素可为作物生长

提供肥源;③可在一定条件下替代深度处理工艺,减轻污水处理负担。

近些年有关再生水回用于农业灌溉方面的研究主要集中在再生水灌溉对土壤理化性质、土壤中重金属积累以及对作物生长和作物品质的影响等方面^[2-9]。有关再生水灌溉对土壤酶和土壤微生物方面影响的研究还很少见。

土壤酶和土壤微生物量碳(SMBC)都是土壤中

收稿日期:2007-11-18

作者简介:何 艺(1983—),女,吉林白山人,在读硕士研究生,主要从事环境生物学方面的研究。

E-mail:heyihelena@mail.nankai.edu.cn

重要的有机组分,在土壤物质循环、能量转化及污染物降解方面具有重要的作用,可作为土壤肥力的评价指标以及土壤质量的指示因子^[10-16]。

本研究利用长期污灌区的受污染土壤作为供试土壤,以自来水为对照,研究再生水、城市综合污水(以下简称污水)和含油污水短期浇灌对已污染土壤的土壤酶及 SMBC 的影响,探讨再生水浇灌能否会在一定程度上有利于已污染土壤的肥力和质量的恢复,从而为再生水农业利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

本试验采用室内盆装模拟的方法,供试土壤采自天津市东丽区荒草垞长期污灌区菜地,采样层为 0~20 cm 表层土,土壤基本理化性质及土壤中石油烃污染物的含量情况见表 1。

1.2 浇灌用水水质

浇灌用水分别为自来水、再生水、污水和含油污水。其中再生水和污水取自天津开发区污水厂(再生水为二级出水,污水为未经处理的原污水),试验期间共取水 3 次,运回实验室后-4℃保存。试验用水水质指标由污水厂提供,由于 3 次取水的水质指标没有显著差异,因此取其平均值作为本试验用水水质情况的参考,见表 2。含油污水是利用城市综合污水加 20#重柴油人工配制的(每次浇灌前配制),石油烃含量约为 30~40 mg·L⁻¹。

1.3 试验设计

供试土壤运回实验室后达半干状态时把土块压碎,除去石块、植物残根及其他杂物后过 3 mm 筛装盆。试验用盆为直径 30 cm,高 26 cm 的塑料盆,每盆装土 10 kg。试验设 4 种不同处理,以自来水为对照,分别采用再生水、污水及含油污水对供试土壤进行浇灌,每种处理设 3 个平行。试验自 2007 年 4 月 1 日起至 2007 年 6 月 30 日止历时 90 d,平均每 5 d 浇灌 1 次,每次浇灌时各盆浇水量保持一致(约为 300 mL),每 15 d 取样 1 次对相关指标进行测定。试验过程中保持土壤含水量为田间最大持水量的 70%~80%。

1.4 测定项目及方法

表 2 试验用水水质情况(mg·L⁻¹)
Table 2 Quality of irrigation water used in the experiment(mg·L⁻¹)

水质指标	二级出水	污水	农田灌溉水质标准 (GB5084—92)
pH	7.10	7.49	5.5~8.5
COD	50.99	365.89	≤150
BOD ₅	6.60	175.32	≤80
SS	28.96	332.71	≤100
总 P	1.56	6.50	≤10
总 N	10.16	29.80	≤30
氯化物	1 567.21	1 629.96	≤250
硫化物	—	0.26	≤1.0
石油类	—	3.44	≤1.0
Cu	0.017	0.205	≤1.0
Zn	0.239	0.602	≤2.0
Pb	0.021	0.094	≤0.1
Cr	0.008	0.084	≤0.1
Ni	0.039	0.057	—
Hg	—	—	≤0.001
Cd	—	—	≤0.005
粪大肠菌群/·L ⁻¹	—	5.6×10 ⁷	≤10 000

测定项目包括土壤酶(过氧化氢酶、多酚氧化酶和脲酶)、SMBC 和土壤中石油烃含量。

土壤过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法,结果以 20 min 后 1 g 风干土的 0.1 mol·L⁻¹ 高锰酸钾的毫升数表示;土壤多酚氧化酶活性的测定采用 430 nm 比色法,结果以 2 h 后 1 g 风干土中紫色没食子素的毫克数表示;土壤脲酶活性的测定采用 578 nm 比色法,结果以 24 h 后 1 g 风干土中 NH₃-N 的毫克数表示^[17]。

SMBC 的测定采用氯仿熏蒸,0.5 mol·L⁻¹ 硫酸钾浸提,浸提液采用浓硫酸重铬酸钾氧化、硫酸亚铁滴定法测定,结果以每千克干土中 SMBC 的毫克数表示^[18]。

计算方法如下:

$$\text{SMBC}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}=2.64\times\text{Ec}$$

其中:Ec 为熏蒸与不熏蒸土壤中有机碳的差值,2.64 为校正系数。

表 1 供试土壤的理化性质及土壤中石油烃含量
Table 1 The physical-chemical properties of soil tested and petroleum hydrocarbon contents in the soil

项目	pH	有机质/%	总 N/g·kg ⁻¹	总 P/g·kg ⁻¹	粘粒<0.063 mm	阳离子交换量/cmol·kg ⁻¹	石油烃含量/mg·kg ⁻¹
测定值	7.72	2.54	1.243	0.908	94.32%	23.05	360.66±7.86

土壤中石油烃含量的测定采用氯仿提取,紫外分光光度法测定,结果以每千克干土中石油烃的毫克数表示^[9]。

1.5 数据处理

试验数据采用 Excel 2003 和 Spss13.0 进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同水质浇灌对土壤中石油烃含量的影响

如图 1 所示,浇灌前各组土壤中石油烃含量无显著差异($P>0.05$),变化范围为 $350.79\sim369.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 干土。试验过程中,自来水和再生水浇灌的土壤中石油烃含量变化情况类似,在 0~60 d 之间,石油烃含量有所下降,60 d 以后没有明显变化,趋于稳定;污水浇灌的土壤中石油烃含量略有下降,但不明显;含油污水浇灌的土壤中石油烃含量有一定程度的积累。试验结束时,与初始值相比,自来水和再生水浇灌的土壤中石油烃含量显著降低($P<0.01$);污水浇灌的土壤中石油烃含量无显著差异($P>0.05$);含油污水浇灌的土壤中石油烃含量显著提高($P<0.05$)。浇灌 90 d 后,自来水和再生水浇灌的土壤中石油烃含量无显著差异($P>0.05$);污水和含油污水浇灌的土壤中石油烃含量显著高于自来水浇灌组($P<0.01$)。

李慧等研究表明,与污水浇灌相比,自来水浇灌可有效减少土壤中石油烃污染物的积累^[10,12]。本试验结果表明,自来水和再生水浇灌能在一定程度上促进受污染土壤中石油烃污染物的降解,这可能是由于受污染土壤中存在一定量的石油烃降解微生物^[15],自来水和再生水通过调节土壤水分使这部分微生物发挥作用,将土壤中石油烃作为碳源利用,从而促进其降解。

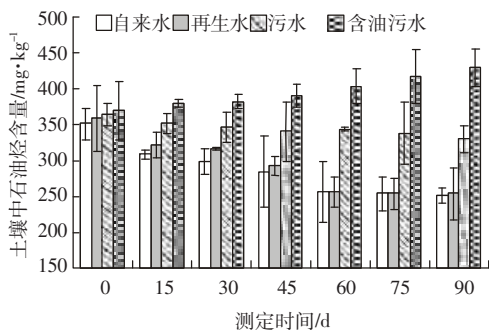


图 1 不同水质浇灌的土壤中石油烃含量变化情况

Figure 1 Changes of petroleum hydrocarbon contents in the soil irrigated with different water

2.2 不同水质浇灌对土壤酶活性的影响

2.2.1 对过氧化氢酶和多酚氧化酶活性的影响

氧化还原酶在土壤物质和能量转化中起重要作用,参与土壤腐殖质组分的合成及土壤形成过程^[10]。过氧化氢酶和多酚氧化酶是两种比较重要的氧化还原酶。过氧化氢酶广泛存在于土壤和生物体内,与土壤微生物数量有关,能够促进代谢中间产物过氧化氢的分解,缓解其毒害作用^[17]。多酚氧化酶与土壤中芳烃类和酚类化合物降解密切相关^[10,12]。

如图 2 所示,浇灌 90 d 后,与初始值相比,自来水浇灌组土壤过氧化氢酶活性显著提高($P<0.05$);再生水和污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性没有明显变化($P>0.05$);含油污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性显著提高($P<0.01$)。试验过程中,与自来水浇灌组类似,再生水浇灌组土壤过氧化氢酶活性在 15 d 和 60 d 时均显著高于初始值($P<0.01$);污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性无明显变化;含油污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性在 15、60 和 75 d 时均显著高于初始值($P<0.01$)。

浇灌前各组土壤过氧化氢酶活性无显著差异($P>0.05$)。试验过程中,自来水与再生水浇灌组土壤过氧化氢酶活性均无显著差异($P>0.05$);污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性在 15 d 时显著低于自来水浇灌组($P<0.01$);含油污水浇灌组土壤过氧化氢酶活性在 15 d ($P<0.05$) 和 60 d ($P<0.01$) 时显著低于自来水浇灌组。试验结束时,即浇灌 90 d 后,各组间土壤过氧化氢酶活性无显著差异($P>0.05$)。

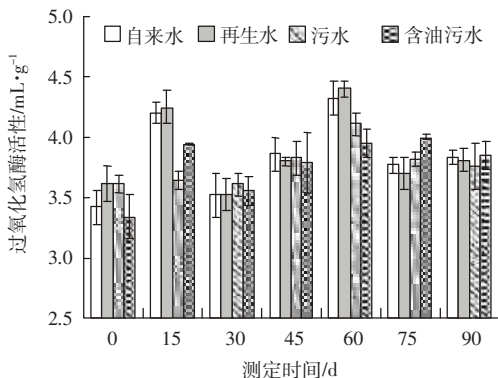


图 2 不同水质浇灌的土壤中过氧化氢酶活性变化情况

Figure 2 Changes of catalase activities in the soil irrigated with different water

如图 3 所示,浇灌 90 d 后,与初始值相比,自来水、再生水和含油污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性均显著提高($P<0.01$);污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性

无明显变化($P>0.05$)。试验过程中,自来水浇灌组土壤多酚氧化酶活性在 15、60 和 75 d 时均显著高于初始值($P<0.01$);与自来水浇灌组类似,再生水浇灌组土壤多酚氧化酶活性也在 15 d($P<0.01$)、60 d($P<0.05$)和 75 d($P<0.05$)时显著高于初始值;污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性无明显变化;含油污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性在 30 d 时显著高于初始值($P<0.05$)。

浇灌前各组土壤多酚氧化酶活性无显著差异($P>0.05$)。试验过程中,再生水浇灌组土壤多酚氧化酶活性仅在 15 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.05$),其余时间均无显著差异;污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性在 60 d($P<0.01$)和 75 d($P<0.05$)时显著低于自来水浇灌组;含油污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性在 30 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.05$),60 d 和 75 d 时显著低于自来水浇灌组($P<0.05$)。试验结束时,即浇灌 90 d 后,再生水和含油污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性与自来水浇灌组无显著差异($P>0.05$),污水浇灌组土壤多酚氧化酶活性显著低于自来水浇灌组($P<0.05$)。

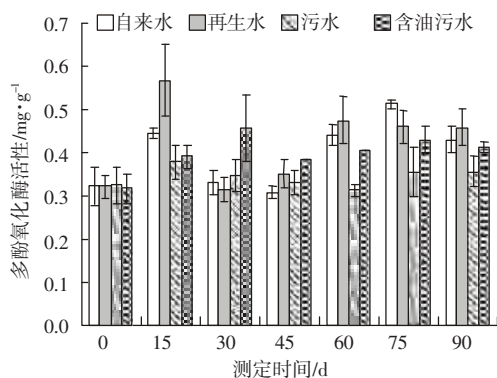


图 3 不同水质浇灌的土壤中多酚氧化酶活性变化情况

Figure 3 Changes of polyphenol oxidase activities in the soil irrigated with different water

过氧化氢酶和多酚氧化酶参与石油烃及其代谢中间产物在土壤中的降解过程^[10,12]。试验结果表明,自来水和再生水浇灌能在一定程度上提高这两种酶的活性,从而促进受污染土壤中石油烃污染物的降解。自来水和再生水浇灌使土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶活性在浇灌 15 d 时显著提高,这可能是由于自来水和再生水通过调节土壤水分刺激与这两种酶有关的土壤微生物的生长,从而促进土壤中石油烃污染物的降解;30 d 和 45 d 时这两种酶的活性有所降低,直到 60 d 时又恢复到较高的水平;60 d 后,土壤过氧化氢酶活性稍有降低,多酚氧化酶活性没有明显变化,

与之相对应,自来水和再生水浇灌的土壤中石油烃含量在浇灌 60 d 后没有明显降解,这可能是由于土壤中可利用碳源的减少使与这两种酶相关的微生物数量稍有减少或趋于稳定。污水浇灌对这两种酶活性没有明显影响,可能是由于污水中某些污染物不利于与这两种酶相关的土壤微生物,但并没有达到对其产生抑制作用的浓度。含油污水浇灌对这两种酶的活性有一定程度的刺激作用,李慧等的研究认为可能是由于石油烃可在一定浓度范围内作为底物碳源为与这两种酶相关的土壤微生物所利用,从而使酶活性有所增强^[10,12]。

2.2.2 对脲酶活性的影响

如图 4 所示,浇灌 90 d 后,与初始值相比,各组土壤脲酶活性均显著提高($P<0.01$)。

试验过程中,自来水浇灌组土壤脲酶活性在 45 d 后均显著高于初始值($P<0.01$);再生水浇灌组土壤脲酶活性在 45 d 和 75 d 时显著高于初始值($P<0.01$);污水和含油污水浇灌组土壤脲酶活性在 30 d 后均显著高于初始值($P<0.01$)。

浇灌前各组土壤脲酶活性无显著差异($P>0.05$)。试验过程中,再生水浇灌组土壤脲酶活性与自来水浇灌组无显著差异($P>0.05$);污水浇灌组土壤脲酶活性在 30 和 60 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.05$);含油污水浇灌组土壤脲酶活性在 15 和 30 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.01$)。试验结束时,即浇灌 90 d 后,各组土壤脲酶活性无显著差异。

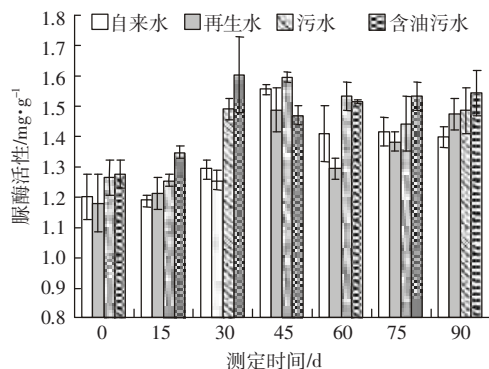


图 4 不同水质浇灌的土壤中脲酶活性变化情况

Figure 4 Changes of urease activities in the soil irrigated with different water

脲酶在土壤氮循环中起重要作用,对土壤肥力有重要贡献^[11]。试验结果表明,自来水和再生水浇灌能在一定程度上提高土壤脲酶活性。脲酶对污染非常敏感^[10-13],然而本试验污水和含油污水浇灌并没有对土

壤脲酶活性产生抑制作用,反而表现出一定程度的刺激作用,这可能是由于:(1)受污染土壤中的微生物对某些污染物具有一定的生物适应性,试验所用污水中的污染物并没有达到可在短期内对其产生抑制作用的浓度;(2)污水中丰富的 N、P 等营养元素可被这部分微生物所利用,从而提高脲酶活性;(3)本试验用 20# 重柴油配制含油污水,研究表明,柴油可在一定浓度范围内刺激脲酶活性,可能是由于柴油的部分组成物质在初始时可为土壤中与脲酶相关的微生物所利用^[15]。因此,本试验所用低浓度含油污水在短期内对土壤脲酶活性表现出一定程度的刺激作用。

2.3 不同水质浇灌对 SMBC 的影响

如图 5 所示,浇灌 90 d 后,与初始值相比,自来水、再生水和污水浇灌组 SMBC 无明显变化;含油污水浇灌组 SMBC 显著提高($P<0.05$)。试验过程中,与自来水浇灌组类似,再生水浇灌组 SMBC 在 15、45 和 60 d 时均显著高于初始值($P<0.05$);污水浇灌组 SMBC 在 30 和 45 d 时显著高于初始值($P<0.01$);含油污水浇灌组 SMBC 在 45 d 后均显著高于初始值($P<0.05$)。

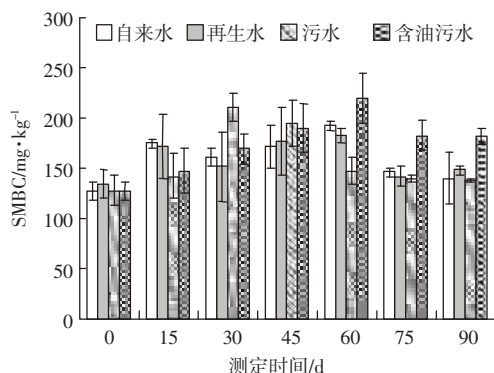


图 5 不同水质浇灌的 SMBC 变化情况

Figure 5 Changes of SMBC in the soil irrigated with different water

浇灌前各组 SMBC 无显著差异($P>0.05$)。试验过程中,再生水浇灌组 SMBC 与自来水浇灌组均无显著差异($P>0.05$);污水浇灌组 SMBC 在 30 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.05$),60 d 时显著低于自来水浇灌组($P<0.05$);含油污水浇灌组 SMBC 在 75 d 时显著高于自来水浇灌组($P<0.01$)。试验结束时,即浇灌 90 d 后,再生水和污水浇灌组 SMBC 与自来水浇灌组无显著差异($P>0.05$);含油污水浇灌组 SMBC 显著高于自来水浇灌组($P<0.01$)。

如前所述,自来水和再生水浇灌会在一定程度上

刺激土壤酶活性,促进土壤中石油烃污染物的降解,而土壤酶主要来源于土壤微生物^[12],因此,自来水和再生水浇灌能在一定程度上提高 SMBC,试验结果也表明了这一点。

自来水和再生水浇灌组的 SMBC 与土壤过氧化氢酶活性变化情况呈显著正相关,相关系数分别为: $r=0.797(P<0.05)$ 和 $r=0.780(P<0.05)$ 。如前所述,自来水和再生水浇灌的土壤中石油烃污染物在浇灌 60 d 后没有明显降解,与之相对应,土壤过氧化氢酶活性和 SMBC 在浇灌 60 d 后有所降低并趋于稳定,这可能是由于盆内土壤中理化条件(如温度、微量元素、盐度等)的改变使土壤微生物总生物量或群落结构发生变化,使 SMBC 有所降低。具体原因有待进一步研究。与脲酶活性变化情况相似,污水浇灌组 SMBC 在试验中期有所提高,这可能是由于污水中丰富的 N、P 等营养元素可为与脲酶相关的土壤微生物所利用,刺激其生长,使 SMBC 有所提高。如前所述,含油污水浇灌对土壤酶活性有一定程度的刺激作用,主要是由于试验所用低浓度含油污水,可为土壤微生物提供底物碳源,刺激其生长,提高 SMBC。

3 结论

(1)再生水浇灌与自来水浇灌类似,可在一定程度上促进土壤中石油烃污染物的降解;污水浇灌不利于受污染土壤中石油烃污染物的降解;含油污水浇灌使土壤中石油烃污染物有一定程度的积累。

(2)再生水浇灌与自来水浇灌类似,可在一定程度上提高土壤过氧化氢酶、多酚氧化酶和脲酶活性;污水浇灌对土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶没有明显影响,对脲酶有一定程度的刺激作用;含油污水对土壤过氧化氢酶、多酚氧化酶和脲酶均有一定程度的刺激作用。

(3)再生水浇灌与自来水浇灌类似,可在一定程度上提高 SMBC;污水和含油污水浇灌也可在一定程度上提高 SMBC。

由此可见,与自来水浇灌类似,再生水浇灌在一定程度上有利于受污染土壤的肥力和质量的恢复。本试验为室内模拟短期浇灌试验,污水和含油污水浇灌对土壤酶及 SMBC 没有表现出明显的不良影响,反而有一定程度的刺激作用。这可能是由于受污染土壤中的微生物对某些污染物具有一定的生物适应性,污水中污染物没有达到可在短期内对其产生不利影响的浓度;其次污水中丰富的 N、P 等可作为营养元素,低

浓度的石油烃可作为底物碳源为土壤微生物所利用,在一定程度上刺激其生长,从而对土壤酶及 SMBC 表现出一定程度的刺激作用。

由于本试验时间较短且仅为室内模拟试验,得到的结论只具有初步的参考价值,有关再生水灌溉对受污染土壤的肥力和质量恢复的作用,应通过长期田间灌溉条件下的实验进一步检验。

参考文献:

[1] 马 敏, 黄占斌. 再生水农业灌溉的现状与发展趋势[J]. 节水灌溉, 2006(5): 43–46.
MA Min, HUANG Zhan-bin. The status quo and development trend of irrigation with reclaimed water on cropland[J]. *Water Saving Irrigation*, 2006(5): 43–46.

[2] Stevens D P, McLaughlin M J, Smart M K. Effects of long-term irrigation with reclaimed water on soils of the Northern Adelaide Plains, South Australia[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(5): 933–948.

[3] Wang Z, Chang A C, Wu L, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland[J]. *Geoderma*, 2003, 114, 261–278.

[4] 杨林林, 杨培玲, 任树梅, 等. 再生水灌溉对土壤理化性质影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 82–85.
YANG Lin-lin, YANG Pei-ling, REN Shu-mei, et al. Experimental studies on effects of reclaimed water irrigation on soil physicochemical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservatio*, 2006, 20(2): 82–85.

[5] Zhao Q L, Zhang J L, You S J, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on crops and health risk assessment[J]. *Leading-edge Strategies and Technologies for Sustainable Urban Water Management*, 2006, 6(6): 99–109.

[6] 巫常林, 黄冠华, 刘洪禄, 等. 再生水短期灌溉对土壤-作物中重金属分布影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 91–96.
WU Chang-lin, HUANG Guan-hua, LIU Hong-lu, et al. Experimental investigation on heavy metal distribution in soil-crop system with irrigation of treated sewage effluent[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(7): 91–96.

[7] 李 波, 任树梅, 张 旭, 等. 再生水灌溉对番茄品质、重金属含量以及土壤的影响研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 163–165.
LI Bo, REN Shu-mei, ZHANG Xu, et al. Study on quality of tomato and heavy metal in soil and fruit contribution with irrigation of rejuvenated water[J]. *Journal of Soil and Water Conservatio*, 2007, 21(2): 163–165.

[8] 赵庆良, 张金娜, 刘志刚, 等. 再生回用水灌溉对作物品质及土壤质量的影响[J]. 环境科学, 2007, 28(2): 411–416.
ZHAO Qing-liang, ZHANG Jin-na, LIU Zhi-gang, et al. Effect of reclaimed water used for irrigation on the quality of crops and soil [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(2): 411–416.

[9] 郭道宇, 董 志, 宫辉力, 等. 再生水对作物种子萌发、幼苗生长及抗氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8):1337–1342.
GUO Xiao-yu, DONG Zhi, GONG Hui-li, et al. Effects of reclaimed water on seed germ ination, growth and antioxidant system in crops [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1337–1342.

[10] 李 慧, 陈冠雄, 杨 涛, 等. 沈抚灌区含油污水灌溉对稻田土壤微生物种群及土壤酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1355–1359.
LI Hui, CHEN Guan-xiong, YANG Tao, et al. Impacts of petroleum-containing wastewater irrigation on microbial population and enzyme activities in paddy soil of Shenfu irrigation area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1355–1359.

[11] Gianfreda L, Rao A M, Piotrowska A, et al. Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practice and organic pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 341: 265–279.

[12] Li H, Zhang Y, Zhang C G, et al. Effect of petroleum-containing wastewater irrigation on bacterial diversities and enzymatic activities in a paddy soil irrigation area[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34: 1073–1080.

[13] Shen G P, Lu Y T, Zhou Q X, et al. Interaction of polycyclic aromatic hydrocarbons and heavy metals on soil enzyme[J]. *Chemosphere*, 2005, 61: 1175–1182.

[14] Franco I, Contin M, Bragato G, et al. Microbiological resilience of soils contaminated with crude oil[J]. *Geoderma*, 2004, 121: 17–30.

[15] Labud V, Garcia C, Hernandez T. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil[J]. *Chemosphere*, 2007, 66: 1863–1871.

[16] Calbrix R, Barry S, Chabrerie O, et al. Impact of organic amendments on the dynamics of soil microbial biomass and bacterial communities in cultivated land [J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35: 511–522.

[17] 关松荫, 等. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 274–320.
GUAN Song-yin, et al. Soil enzyme and study method[M]. Beijing: Agriculture Publishing Company, 1986. 274–320.

[18] 林启美, 吴玉光, 刘焕龙. 熏蒸法测定土壤微生物量的改进[J]. 生态学杂志, 1999, 18(2): 63–66.
LIN Qi-mei, WU Yu-guang, LIU Huan-long. Modification of fumigation extraction method for measuring soil microbial biomass carbon[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(2): 63–66.

[19] 城乡建设环境保护部环境保护局环境监测分析方法编写组. 环境监测分析方法[M]. 1983. 339–332.
Compiling group of environmental monitoring and analysis methods of Environmental Protection Agency of Urban and Rural Construction Department of Environmental Protection. Environmental monitoring and analysis methods[M]. 1983. 339–332.