

再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物的影响研究

焦志华, 黄占斌, 李 勇, 王文萍, 颜丙磊, 彭丽成, 李海峰

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要:土壤性能和土壤微生物是再生水灌溉对环境安全效应评价的重要指标。通过模拟试验,以北京高碑店污水处理厂生产的再生水浇灌大豆为例,分析了收获期土壤理化特性及微生物类群变化。结果表明,再生水灌溉能够在一定程度上提高土壤肥力,表现为有机质和有效磷显著增加;土壤重金属铅、镉含量相对清水和土壤本底无明显增加,但土壤溶液电导值(EC)增加显著,在一定程度上造成盐度累积。在土壤微生物方面,再生水灌溉使土壤细菌数量相对清水灌溉处理增加;二级再生水和三级再生水灌溉处理间的放线菌数量差异显著,且明显高于清水对照;再生水灌溉对真菌数量影响不大。再生水灌溉使大豆根际土壤脲酶活性增加,碱性磷酸酶活性最高。土壤微生物数量、酶活性与土壤养分含量之间呈显著相关关系,可作为评价土壤肥力和土壤环境质量的指标。

关键词:再生水;灌溉;土壤;土壤微生物;酶活性

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0319-05

The Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Performance and the Microorganism

JIAO Zhi-hua, HUANG Zhan-bin, LI Yong, WANG Wen-ping, YAN Bing-lei, PENG Li-cheng, LI Hai-feng

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology—Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Soil performance and the microorganism are important indexes and aspects on evaluating environment effect of irrigation with reclaimed water. The research was used pot experiment to study reaction of performance and the microorganism groups in soil root zoon of planting soybean under irrigating with second grade and third grade reclaimed water. The result indicated that irrigation with reclaimed water could improve soil fertility, the organic material and available phosphor were increased, markedly. The heavy metal lead (Pb), cadmium (Cd) of the soil had no significantly accumulation. The electric conductivity (EC) of the soil was increased that make soil salinity at some degrees. On soil microorganism aspect, irrigating with reclaimed water could enhance bacteria and actinomycetes amounts while not enhance fungi amount, and the different between irrigation with second grade reclaimed water and the third reclaimed water was obviously and higher than that of fresh water irrigation control. On soil enzymes aspect, it was showed that urease activity was increased, and the alkaline phosphatase activity was biggest. The soil microbe number and enzyme activities were correlated with soil nutrient, so they could be used as the indexes to evaluate the fertility and environment quality of soil.

Keywords: reclaimed wastewater; irrigation; soil; soil microbe; enzyme activity

再生水是指对污水处理厂出水、工业排水、生活污水等非传统水源进行回收,经适当处理后达到一定水质标准,并在一定范围内重复利用的水资源。再生水的农业应用是国内外有效缓解农业用水紧张的重要举措之一,也是污水资源化并利用,减轻污水排放二次污染的环保发展趋势。北京市现有水资源量为

40 亿 m^3 , 人均水资源量仅 300 m^3 , 农业年度缺水 10 亿 m^3 ; 而北京市年污水排放量达 12 亿 m^3 。根据规划,北京市 2008 年将使城市污水 90% 得到处理, 污水处理的再生水 50% 将用于农业灌溉。

由于经济和技术原因,再生水中的污染物质并没有被完全去除,其中丰富的 N、P 元素、较高的全盐含量、多种毒性痕量物质(重金属、有机污染物等)以及病原体使这种再生水具有水源、肥源、污染源三种属性,这三种属性决定了再生水灌溉具有正负两方面的效应。正面效应主要表现为:再生污水中含有大量植物生长所必需的营养元素,合理的污水灌溉可改善土

收稿日期:2009-09-22

基金项目:国家自然科学基金(50679080);“十一五”国家 863 课题(2006AA100205);中国矿业大学(北京)青年科研基金

作者简介:焦志华(1976—),女,博士研究生,讲师,研究方向为环境生物学与微生物。E-mail:zhijiaojiao2008@163.com

壤性质、提高土壤肥力,从而间接刺激植物的生长^[1-3]。负面效应主要表现为:再生污水中含有微量的盐分、有毒重金属、微量元素等污染物,这些污染物随污水灌入土壤-植被系统中,对土壤乃至动、植物生态链造成毒害;再生污水中大量的悬浮颗粒物随污水灌入土壤-植被系统,导致土壤理化性质发生变化,进一步降低土壤肥力^[4-8]。

不同地区的再生水处理和利用,受再生水处理技术和当地经济发展水平影响,也受到当地气候、土壤、栽培管理方式和灌溉制度等因素的制约。本研究采用盆栽试验的方法,以北京高碑店污水处理厂不同水质的再生水灌溉春大豆为例,通过对收获期盆栽土壤的相关指标的测定,研究再生水灌溉对土壤性能和土壤微生物种群的影响,为再生水灌溉对土壤环境质量影响的评价和安全控制方案制定提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验布置

试验采用盆栽方法,在北京高碑店城市污水处理厂试验基地进行。再生水水质分原污水(污水处理厂进水,简称 O)、二级水(污水处理厂二沉池出水,S)、三级水(砂滤池出水,T)、清水(自来水,对照,F)如表 1,组成 4 个处理,每处理 6 个重复。盆栽盆为内径 35

cm、高 32 cm 的 PVC 材质花盆,供试土壤取自北京市水科所通州永乐店节水试验站田间表土(表 2),经风干、过筛、混施底肥(尿素万分之五)后每盆装土 16 kg,之后灌辛硫磷(40%)杀虫。供试大豆品种为中黄 13,每盆播种 3 穴,出苗后每盆留 3 株。用水为现浇现取,播种后即按处理灌溉。当土壤含水量为田间持水量的 50%左右时,补浇水至田间持水量 100%,记录每次浇水量,记录作物生长和管理情况。

1.2 测定项目与方法

测试土壤取自大豆收获期盆栽土壤,测定土壤理化指标 pH 值和电导率 EC,常规养分指标为全氮、有效磷、全钾和有机质;重金属铅、镉;土壤酶学指标为脲酶、过氧化氢酶和碱性磷酸酶;微生物学指标为土壤细菌、真菌和放线菌数量。

土壤 pH 值按 GB7859—1987 法采用 PHS—3C 精密酸度计测定;土壤电导率按 GB7871—1987 法采用 DDS—11A 数显电导率仪测定;土壤全氮按 GB7173—1987 法采用 KDY—9830 全自动凯氏定氮仪测定,土壤有效磷按 GB 12297—1990 法采用 U—NICAM UV300 紫外可见分光光度计测定;全钾按照 GB7854—1987 法采用 WFX—130 原子吸收分光光度计测定;有机质按 GB7857—1987 法测定;铅、镉测定根据 GB/T 5009.12—1996、GB13082—1991 采用硝

表 1 实验中再生水水质
Table 1 Water quality of reclaimed water in the experiment

化学成分 Chemical composition	清水 Fresh water	二级再生水 Second grad reclaimed water	三级再生水 Third grad reclaimed water	原污水 Raw sewage water	农灌标准(旱作)Irrigation water standard(dry farming)
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	0.94	9.25	5.85	202.3	150
COD _{Cr} /mg·L ⁻¹	2	38.1	23.8	411.1	300
SS/mg·L ⁻¹	4	12.2	5.55	354.3	200
TN/mg·L ⁻¹	7.81	30.1	20.05	58.84	30
TP/mg·L ⁻¹	0.02	1.95	2.02	6.02	10
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	45.9	133	143	161	250
Pb/mg·L ⁻¹	nd	0.31	nd	0.28	0.1
Cd/mg·L ⁻¹	nd	0.01	nd	0.02	0.005
Zn/mg·L ⁻¹	0.02	0.13	0.05	0.24	2.0
pH	7.77	7.85	7.49	7.89	5.5~8.5
EC/μS·cm ⁻¹	491	1 199	1 184	1 497	1 000

注:nd 为未检出。

表 2 试验用土壤理化性质
Table 2 Physical and chemical characteristics of the soil used in the experiment

粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	沙粒 Sand/%	总碳 Total C/%	NH ₄ ⁺ -N/ mg·kg ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N/ mg·kg ⁻¹	Pb/ mg·kg ⁻¹	Cr/ mg·kg ⁻¹	Cd/ mg·kg ⁻¹	pH	EC/ μS·cm ⁻¹
16.23	59.65	24.5	1.01	33.8	27.53	34.59	40.38	0.27	8.17	231.67

酸-高氯酸消煮火焰原子吸收法,仪器为 ICP-MS(美国 PE 产 DRC-E);根际土壤微生物种群数量采用稀释倍数法测定,好氧异养细菌、放线菌和真菌的活菌计数培养基分别为牛肉膏蛋白胨培养基、高氏一号琼脂培养基、马丁氏孟加拉红琼脂培养基;脲酶活性的测定采用奈氏比色法,以每克干土 24 h 生成 $\text{NH}_3\text{-N}$ 量为脲酶一个活性单位;过氧化氢酶活性的测定采用高锰酸钾滴定法,酶活性以每克干土 1 h 内消耗 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 毫升数表示;碱性磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,活性以每克土壤的酚毫克数表示。

2 结果与分析

2.1 再生水灌溉对土壤理化性质的影响

土壤理化性质直接影响植物生长,表 3 为再生水灌溉处理的大豆收获期土壤理化性质。

表 3 表明,再生水灌溉与清水处理的 pH 差异规律不明显,再生水灌溉对土壤 pH 影响不大。原污水和再生水灌溉处理的大豆土壤 EC 均高于清水对照,二级再生水灌溉处理低于三级水的处理且差异显著 ($P<0.001$),再生水灌溉明显提高土壤 EC 值。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、孔隙度和团聚度等物理性质有重要的影响。试验表明,原污水和再生水灌溉处理的大豆根际土壤有机质均高于清水灌溉处理,且差异显著 ($P<0.05$),显示再生水灌溉可提高土壤有机质含量。

与清水对照相比,再生水灌溉处理对大豆根际土壤的全氮含量影响不明显,原因可能是再生污水中氮含量促进大豆吸收土壤有机质,加快植株生长速率而促进土壤氮消耗,使处理间氮含量差异不显著。原污水和再生水灌溉大豆根际土壤有效磷含量均显著高于清水灌溉,说明再生水灌溉可提高土壤有效磷含量。二级再生水灌溉的土壤全钾含量低于清水灌溉 ($P<0.001$),其他处理与清水灌溉差异不显著。总体来

说,再生水灌溉对大豆土壤中全钾含量的影响不大。

铅是对人类健康有害的重金属元素之一,对植物危害主要表现在两方面:一是抑制根生长而抑制营养吸收,二是影响植物光合和蒸腾作用,降低作物产量^[9]。镉是一种植物非必需元素,尽管镉在植物和土壤中的含量很低,但它对生物甚至土壤微生物代谢活动有严重抑制和毒性影响^[10-11]。各处理铅含量在 $15.45\sim 18.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均属于非污染土壤(非污染表土铅含量一般 $3\sim 189 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。再生水灌溉后大豆根际土壤 Pb 含量与对照无显著差异。各处理的 Cd 含量均在 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,均属于非污染土壤。

2.2 再生水灌溉对大豆土壤微生物数量和土壤酶活性的影响

土壤微生物几乎参与土壤中一切生物和生化反应,在土壤形成、肥力演变、植物养分转化和土壤结构改良、降解及净化有毒物质等方面起重要作用^[12],是维持土壤质量的重要组成部分。细菌是土壤微生物中数量最多一个群落,多数是异养好氧兼嫌气菌,在土壤物质转化过程中起着巨大的作用,特别是在土壤中使植物不能直接利用复杂含氮化合物转化为可溶性无机化合物的氨化作用,这类微生物作用尤为重要。从表 4 得知,原污水和再生水灌溉处理的大豆盆土根际细菌数量均显著高于清水灌溉处理。放线菌是广泛分布于土壤中优势微生物类群,对有机物矿化有重要作用,污水和再生水灌溉处理的大豆盆土根际放线菌数量均显著高于清水灌溉处理。二级再生水和三级再生水灌溉的处理间差异达到显著性水平,且明显高于清水对照。因此,再生水灌溉会增加大豆根际土壤放线菌数量,这可能是再生水中物质刺激土壤放线菌生长,促进再生水中有有机物分解。原污水灌溉处理的大豆根际真菌数量远高于其他各处理,再生水灌溉对大豆根际土壤真菌数量影响并不大。

土壤酶是土壤生物化学过程参与者,在生态系统的物质循环和能量流动过程中扮演着重要角色^[13],可

表 3 不同灌溉处理收获期大豆土壤理化性质

Table 3 Physical and chemical character of the soil at harvesting stage of soybean under different irrigation treatments

处理 Treatment	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效磷 Available P/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾 K/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 Organic material/%	Pb/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Cd/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
F	0.05 ± 0.001 7	33.20 ± 3.518	31.40 ± 0.991	0.64 ± 0.005 7	18.28 ± 0.76	0.05 ± 0.006	7.76 ± 0.038	0.19 ± 0.003
O	0.06 ± 0.001 8	$50.41\pm 3.229^{**}$	29.68 ± 1.144	0.70 ± 0.016 3**	$16.12\pm 1.00^{**}$	0.05 ± 0.010	7.35 ± 0.036	$0.42\pm 0.010^{**}$
S	0.06 ± 0.000 5*	$42.63\pm 1.234^{*}$	$19.25\pm 2.966^{**}$	0.70 ± 0.007 9**	$15.45\pm 0.76^{**}$	0.05 ± 0.006	7.88 ± 0.017	$0.33\pm 0.003^{**}$
T	0.06 ± 0.002 9**	$41.62\pm 2.569^{*}$	30.70 ± 0.115	0.70 ± 0.016 5**	18.45 ± 0.76	0.06 ± 0.006	7.85 ± 0.036	$0.42\pm 0.014^{**}$

注: * 表示 $P<0.05$, ** 表示 $P<0.01$ 。

表 4 不同灌溉处理收获期大豆土壤微生物数量和土壤酶活性

Table 4 Quantity of microorganism and enzyme activity of soil at harvesting stage of soybean under different irrigation treatments						
处理 Treatment	脲酶 Urease/ NH ₃ -Nm ^g ⁻¹ ·g ⁻¹ ·24h ⁻¹	过氧化氢酶 Catalase/ mL·g ⁻¹ ·h ⁻¹	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase/mg·g ⁻¹	细菌 Bacteria/ 10 ³	放线菌 Actinomyces/ 10 ³	真菌 Fungi/ 10 ²
F	0.074 4±0.001 2	0.253 3±0.005 4	0.535 7±0.35	289.00±20.60	159±35.2*	13.00±7**
O	0.094 3±0.007 8**	0.266 7±0.008 9	0.614 3±0.12**	344.00±31.20*	592±190.5**	202.00±10**
S	0.105 7±0.004 1**	0.276 7±0.003 6	0.785 7±0.25**	312.00±44.90*	601±127**	11.00±0.6
T	0.085 8±0.009 6	0.26±0.006 9	0.528 6±0.09	447.00±45.00**	503±32.3**	13.00±3

注:*表示 $P<0.05$,**表示 $P<0.01$ 。

用于土壤污染诊断和土壤质量和健康评价。过氧化氢酶能催化过氧化氢成水和分子氢,防止对生物体毒害作用,其强度可表征土壤腐殖化强度大小和有机质积累程度。脲酶能促进有机质分子中肽键水解,其活性与土壤的微生物数量、有机质含量、全氮和速效氮含量呈正相关,可用于表示土壤氮素供应状况^[4]。土壤磷酸酶是催化含磷有机酯和酞水解的一类酶,其活性高低影响土壤中有机磷分解转化及其生物有效性,即磷酸酶活性是衡量土壤肥力,尤其是土壤有效磷水平的一个重要指标^[15]。表 4 显示,再生水灌溉对大豆根际土壤过氧化氢酶活性与清水灌溉差异不大,而脲酶均有一定程度的增加,其中二级水灌溉脲酶活性增幅最大,二级再生水和三级再生水灌溉处理间差异显著。二级水灌溉处理的土壤碱性磷酸酶活性最高。

2.3 土壤各项指标与微生物数量、酶活性的相关性

将土壤微生物数量与土壤酶活性与有机质、有效磷、全氮、全钾和 EC 间进行相关分析表明(表 5),细菌和放线菌数量与有机质和有效磷显著相关,放线菌与 EC 值显著相关,脲酶与有机质含量显著相关,碱性磷酸酶与有效磷含量显著相关,其他相关性则不显著。因土壤微生物数量、土壤酶活性与土壤养分含量之间存在着一定相关关系,故土壤微生物数量、酶活性高低可作为评价再生水灌溉后土壤肥力改变的指标之一。

表 5 土壤各项指标与微生物数量、土壤酶活性的相关系数
Table 5 Correlative coefficient among soil features, quantity of microorganism and enzyme activity of soil

项目	细菌	放线菌	真菌	脲酶	过氧化氢酶	碱性磷酸酶
有机质	0.645*	0.621*	0.470	0.563*	0.427	0.704
有效磷	0.880*	0.656*	0.421	0.443	0.485	0.639*
全氮	0.323	0.506	0.610	0.857	0.526	0.382
全钾	0.566	0.456	0.421	0.486	0.633	0.182
EC	0.612 8	0.674*	0.452	0.611	0.490	0.326

注:*表示 $P=0.05$ 的显著水平。

3 结论

与清水对照相比,再生水灌溉可以显著提高大豆根际土壤的有机质、有效磷含量,并且经再生水灌溉土壤的 EC 值也有所提高,但对大豆根际土壤的 pH、全氮和全钾的影响不大。同时发现,试验的再生水灌溉短期内没有对土壤造成铅、镉污染。这说明,再生水作为一种灌溉用水能够在一定程度上促进土壤肥力增加,且应用再生水灌溉在重金属方面具有一定的安全性。

再生水灌溉处理增加了大豆根际土壤中细菌和放线菌数量,对真菌数量影响不大;再生水灌溉增加土壤脲酶和磷酸酶活性,对过氧化氢酶活性影响不大。其中土壤有机质与微生物数量、土壤酶活性的相关性最为显著。这说明,土壤有机质不但是养分的储藏所和重要来源,同时也是土壤中某些酶活性的重要来源。

参考文献:

[1] Ramirez-Fuentes E. Characteristics and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time[J]. *Biore-source Technology*, 2002, 85(2):179-187.

[2] 黄冠华,杨建国. 污水浇灌对草坪土壤与植株氮含量影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(3):22-25.

HUANG Guan-hua, YANG Jian-guo. Effect of irrigation of turfgrass with treated domestic effluent on nitrogen contents in soil and plant[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3):22-25.

[3] 张乃明,张守萍. 山西太原污灌区农田土壤汞污染状况及其生态效应[J]. *土壤通报*, 2001, 32(2):95-97.

ZHANG Nai-ming, ZHANG Shou-ping. Soil mercury pollution and its ecological effect in the waste water irrigation area of Taiyuan[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(2):95-97.

[4] 张大庚,依艳丽. 沈抚污水灌区石油烃对土壤及水稻的影响[J]. *土壤通报*, 2003, 34(4):333-336.

ZHANG Da-geng, YI Yan-li. Effect of petroleum groups on soil and rice in the Shen-Fu irrigation region[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(4):333-336.

- [5] 贾玉章, 赵久清. 浅析大同市区污水浇灌对农业生态环境的影响[J]. 山西水利科技, 1998, 120(1): 92-96.
- JIA Yu-zhang, ZHAO Jiu-qing. Influence of wastewater irrigation in a-agricultural ecosystem in Datong area[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 1998, 120(1): 92-96.
- [6] 孙吉雄, 韩烈保. 用二级城市污水灌溉草坪[J]. 草原与草坪, 2001, 92(1): 36-40.
- SUN Ji-xiong, HAN Lie-bao. Secondary municipal effluent on irrigation of turf grass[J]. *Grassland and Turf*, 2001, 92(1): 36-40.
- [7] 崔超, 韩烈保. 再生水绿地灌溉水质标准的比较研究[J]. 再生资源研究, 2004, 1: 28-31.
- CUI Chao, HAN Lie-bao. A comparative study of water quality standards of reclaimed water for greensand irrigation[J]. *Recycling Research*, 2004, 1: 28-31.
- [8] Nakshabandi M M. Some environmental problems associated with use of treated wastewater for irrigation in Jordan[J]. *Agri Water Manage*, 1997, 34: 81-94.
- [9] Zuo-Wen Zhang, Takao Watanabe, Shinichiro Shimbo, et al. Lead and cadmium contents in cereals and pulses in north-eastern China[J]. *The Science of the Total Environment*, 1998, 220: 137-145.
- [10] Tonner G, Kunze C. The influence of heavy metals on nitrogen mineralization with regard to the relative proportions of fungi and bacteria[J]. *Angewandte Botanik*, 1990, 64: 345-355.
- [11] Y X Chen, Y F He, Y Yang, et al. Effect of cadmium on nodulation and N_2 -fixation of soybean in contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 781-787.
- [12] 龚平, 孙铁珩, 李培军. 重金属对土壤微生物的生态效应[J]. 应用生态学报, 1997, 8(2): 218-224.
- GONG Ping, SUN Tie-heng, LI Pei-jun. Ecological effect of heavy metals on soil microbes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(2): 218-224.
- [13] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(4): 523-525.
- LIU Jian-xin. Correlative research on the activity of enzyme and soil nutrient in the different types of farmland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4): 523-525.
- [14] 杨鹏, 薛立, 陈红跃, 等. 不同混交林地土壤养分、微生物和酶活性的研究[J]. 湖南林业科技, 2004, 31(4): 43-45.
- YANG Peng, XUE Li, CHEN Hong-yue, et al. Soil nutrient, microorganism and enzyme activity in different mixed broadleaved stands[J]. *Hunan Forestry Science and Technology*, 2004, 31(4): 43-45.
- [15] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- ZHOU Li-kai. Studies on soil enzymology[M]. Beijing: Sciences Press, 1987.