

# 再生水灌溉对园林植物叶片生理及根际土壤特性的影响

李竞<sup>1</sup>, 马红霞<sup>1,2</sup>, 郑恩峰<sup>2</sup>

(河北邢台职业技术学院, 河北 邢台 054035)

**摘要:** 选用8种河北省常见园林植物(大叶黄杨、女贞、月季、丁香、紫荆、连翘、海棠和榆叶梅)进行再生水灌溉试验, 浇灌周期为3年, 以自来水灌溉作为对照, 研究了再生水灌溉对园林植物生长特性及根际土壤和微生物数量的影响。结果表明: 再生水中所含有的植物生长所需的元素大部分可被植物有效吸收, 而植物对一些有毒元素的吸收受到抑制; 再生水处理的植物叶片矿质元素含量总体上比对照增加, 部分差异达到了显著水平, 与对照自来水相比, 8种园林植物出现了钠元素的积累, 重金属也有逐渐升高趋势, 但植物表现并未表现出异常现象。在土壤理化性状方面, 再生水灌溉情况下, 8种园林植物的土壤pH值与对照相比无显著差异; 土壤全盐量、水溶性钠和氯离子含量均高于自来水灌溉, 多种植物土壤含量与自来水灌溉相比达到了显著差异或极显著差异; 在土壤养分和酶活性方面, 再生水灌溉不同程度促进了土壤养分和酶活性的提高, 除了女贞、月季和紫荆以外, 与对照相比, 绝大部分土壤养分和酶活性差异均不显著; 在土壤微生物方面, 再生水灌溉不同程度促进了土壤微生物数量的增加, 其中, 以女贞、月季和紫荆增加幅度较大; 8种园林植物土壤微生物均以细菌最多, 占微生物总数的90%以上, 其次是放线菌和真菌。综合分析可知, 再生水灌溉能够短期内促进园林植物的生长和根际土壤养分、酶活性微生物数目的提高。

**关键词:** 再生水; 园林植物; 根际; 土壤养分; 叶片生理

中图分类号: S158.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)04-0070-07

## Influence of Irrigation With Reclaimed Water on Rhizosphere Soil Properties and Leaf Physiology of Different Landscape Plants

LI Jing<sup>1</sup>, MA Hongxia<sup>1,2</sup>, ZHENG Enfeng<sup>2</sup>

(Xingtai Polytechnic College of Hebei, Xingtai, Hebei 054035, China)

**Abstract:** Taking irrigation with tap water as contrast treatment, the experiment of using reclaimed water to irrigate eight common landscape plants (*Euonymus japonicus*, *Ligustrum lucidum*, *Rosa chinensis*, *Syzygium aromaticum*, *Cercis chinensis*, *Forsythia suspensa*, *Chaenomeles speciosa* and *Prunus triloba*) had been carried out for nearly three years. The influence of irrigation with different water quantities on soil properties of different landscape plants rhizosphere was studied. The results showed that some elements that the plant growth needs were contained in the reclaimed water, and most of these elements could be absorbed effectively by the plants, but a few deleterious elements in the reclaimed water were restrained. In contrast with tap water irrigation, reclaimed water irrigation enhances adversity resistance appreciably. The difference between reclaimed water irrigation and tap water irrigation is small in terms of most mineral elements, but the sodium element accumulation appears in all the leaves of eight plants, and so are the heavy metals. There is no obvious difference on the appearance of all the plants. Compared with contrast, pH has no significant difference between the soil irrigated with reclaimed water and control, and soil total salt, water soluble sodium and chloride ion content are higher than CK. Reclaimed water irrigation enhances the soil nutrients and soil enzyme activities, while the difference of the contents of soil nutrients and soil enzyme activities is not obvious. For the aspect of soil microbes, irrigation with reclaimed water accelerates the growth of soil microbes, especially for the soil bacteria quantities of *Ligustrum lucidum*, *Rosa chinensis* and *Cercis chinensis*. In the mine soil, bacteria amounts are predominant (more than 99.3%), actinomycetes amounts are the next, and fungi amounts are

the least among composition of three communities of soil microbes. In summary, irrigation with reclaimed water improve the soil nutrients, soil enzyme activities and soil microbes, also obviously promote landscape plants growth amounts in a short time.

**Keywords:** reclaimed water irrigation; landscape plants; rhizosphere; soil nutrient; leaf physiology

再生水是指工业废水与生活污水进入城市污水处理厂经二级或二级以上处理后排放的水的总称,是一种相对稳定的潜在水资源<sup>[1-3]</sup>。在城市绿地灌溉、补充景观水体、环卫等方面,用再生水代替自来水是一个非常有利的节水措施。当前水资源严重不足已成为制约城市社会、经济发展的第一瓶颈,一方面城市缺水十分严重,另一方面大量的城市污水经处理后又白白流失,浪费了大量的可利用资源<sup>[1-3]</sup>。再生水与其他替代水源(远距离调水、海水淡化、雨水收集利用等)比较,在资源可靠性、技术进步潜力、生态环境影响、工程效率等方面都具有优势<sup>[4-5]</sup>。

再生水的水源一般是城市污水,包括生活污水、部分工业废水和截流的雨水。城市污水中除含有常规污染物、重金属和溶解性盐类,还含有各种难降解的有机物、致病菌、病毒和某些寄生虫卵<sup>[6-7]</sup>。现代污水处理技术把污水处理成再生水是非常有效可靠的,根据多年来再生水回用的经验和大量的科学研究,从公共健康和环境安全来说,再生水回用是安全的<sup>[8]</sup>。但是,部分工业废水未经达标排放到城市污水系统后,会引入一些化学物质,造成再生水厂原水水质发生变化,对污水的生化处理产生不利影响,进而影响再生水水质的稳定性和可靠性<sup>[9]</sup>。这种水用于绿地灌溉,则可能导致对绿地植物的伤害、土壤环境质量和地下水水质的下降,是一种潜在的长期风险。目前再生水水质与污水相比有了实质的改善,城市污水成分也有很大的变化。随着河北省的迅速发展,城区工业废水的比例逐渐缩小,城市污水的来源主要以生活污水为主。再生水毕竟不同于自来水,长期使用再生水浇灌,是否会如污灌一样造成某些元素在土壤中的累积,对园林植物的生长造成影响,再生水应用于城市园林处于刚刚起步阶段,国内有关研究报道甚少,如何更加合理和安全的将再生水资源应用于城市园林,是我们面临的新问题<sup>[10-12]</sup>。围绕再生水在农业和园林中的应用国内外开展了相关方面的研究,以色列、欧美、日本等一些国家已有几十年的历史,尤其是在以色列,城市绿地80%以上是用生活污水和工业废水经过简单处理后,结合现代灌溉技术进行灌溉。国外对城市污水回用于树木的研究主要集中在生态林、经济林,长期使用再生水浇灌,针对再生水灌溉下的园林植物根部土壤环境的系统性研究较少。因此本研究采用盆栽试验方法,以自来水灌溉为对照,研究不同

水质灌溉方式下对几种常见园林植物根际土壤理化性质、常规养分和微生物数量结构的影响,为再生水园林灌溉的实际应用及其标准的制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

选择河北省有代表性的园林植物8种,所选园林植物均为2~3 a生的小苗,生长状况基本一致,。试验地点为河北农业大学园林大棚内,再生水取自河北省沧州市供水排水厂,再生水灌溉的起止年限为2012—2016年,试验周期为4 a,其中2012年为自来水和再生水幼苗培养期,采用简易自动循环水培装置,水培池四周由砖砌成,上层铺塑料布,制成盛水容器,由增氧泵使水池内的水循环,为减少试验干扰因素,植物的栽培基质选用营养成分基本一致的土壤。

2013年4月将培养的幼苗移植花盆中定期观测并补充自来水和再生水,每种园林植物选择30株,将水培池培养好的园林植物移栽植于直径为50 cm,深度为100 cm的花盆中,每2个月浇灌一次自来水和再生水(每次用量500 ml),自来水和再生水指标如下表所示,试验在遮雨条件下进行。

### 1.2 样品采集

不同植物根际土壤样品采集采用抖落法<sup>[13-14]</sup>。挖取具有完整根际的土体(根际主要分布的范围),先轻轻抖落大块不含根际的土壤,用小刀刮下附在根际周围的土壤(距离根围0~5 mm)作为根际土(R),取根际土尽量减少损害植物根际,对于混杂于根际土中的根系要彻底去除。每种植物分别采集5株植物根际土壤,取完根际土以后按原来的种植方式重新植入花盆,每年采集到植物40株和40个土样(根际土,质量 $\geq 0.5$  kg),共采集3 a,刚采集的新鲜土样塑封袋盛装在保温箱内4℃保存以测定土壤酶活性和微生物数目,另一部分自然条件风干20 d后风干去除有机碎片,磨细,过2 mm筛用以测定土壤养分。

### 1.3 测定方法

土壤理化性质及养分含量的测定:pH值采用电极电位法(1:2.5土水比);土壤电导率(5:1水土比浸提液, $\mu\text{S}/\text{cm}$ )采用P4多功能测定仪测定;全盐采用电导法(%);土壤有机质(g/kg)采用重铬酸钾氧化外加热法;土壤全氮(g/kg)用全自动凯氏定氮法;

土壤全磷(g/kg)用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;速效磷(mg/kg)采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色法测

定;碱解氮(mg/kg)采用 NaOH-H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 法测定;有效钾采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度计法<sup>[15]</sup>。

表 1 灌溉用水水质指标

指标	自来水	再生水	指标	自来水	再生水
pH 值	7.15	8.13	Cu/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.016	0.08
EC/(μS·cm <sup>-1</sup> )	721	956	Cd/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.001	0.001
色度	9	23	Cr/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.0125	0.0138
浊度	10	22	Zn/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.019	0.0147
COD <sub>Cr</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	5.9	32.1	Pb/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.035	0.036
BOD <sub>5</sub> /(mg·L <sup>-1</sup> )	1.8	8.4	NH <sub>4</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.041	4.21
SS/(mg·L <sup>-1</sup> )	7.9	15.7	TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.08	1.32
Na/(mg·L <sup>-1</sup> )	29.47	81.41	全盐/(mg·L <sup>-1</sup> )	625	719
Fe/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.098	0.136	粪大肠菌群/(个·L <sup>-1</sup> )	<2	43200
Mn/(mg·L <sup>-1</sup> )	0.0005	0.143	总大肠菌群/(个·L <sup>-1</sup> )	<3	265000

矿质元素的测定方法:采集园林植株中部功能叶片,采用 ICP-AES 法测定再生水灌溉的园林植物中常规元素(P, K, Ca, Na, Mg, Fe, Mn)和部分重金属元素。

土壤微生物的数量测定:采用平板梯度稀释法,其中细菌培养基为牛肉膏蛋白胨琼脂培养基,真菌培养基为马丁氏培养基,放线菌培养基为高氏一号琼脂培养基。

土壤酶活性的测定:根际土壤酶活测定用分光光度计进行比色法测定,测定酶活种类为纤维素酶(1 g 土样 30 min 内分解产生 1 mg 葡萄糖所需的酶量)、转化酶(1 g 土样 24 h 内分解产生 1 mg 葡萄糖所需的酶量)、硝酸还原酶(1 g 土样 1 min 内分解产生 1 μg NO<sub>2</sub><sup>-</sup>所需的酶量)、脲酶(1 g 土样 24 h 内分解产生 1 mg 氨基氮所需的酶量)和酸性磷酸酶(1 g 土样 24 h 内分解产生 1 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 所需的酶量)<sup>[16]</sup>。

#### 1.4 数据处理与分析

试验所测数据用 2013—2016 年(植物移植花盆稳定生长后的数据)的平均值表示,用 Microsoft Excel 2010 和 Spss 18.0 进行显著差异分析、方差及相关性分析(平均数间的多重比较采用 Duncan's 检验方法,  $p < 0.05$  差异显著)。

## 2 结果与分析

### 2.1 再生水灌溉对植物叶片矿质元素含量的影响

从表 2 中化验结果看到,经过两个生长周期的试验处理,再生水处理的大叶黄杨、女贞、月季、丁香、紫荆、连翘、海棠和榆叶梅叶片氮、磷、钾含量均比对照有所增加,仅海棠叶的磷的含量与对照相等,但所有测定结果均在正常的含量范围内,且植物外观没有出现缺素症状。该结果表明,再生水灌溉促进了植株地上部分矿质元素氮、磷、钾的吸收和累积,对植株的矿

质元素的吸收起到了积极的促进作用。

从表 2 还可知,经过两个生长周期的试验处理,再生水处理的大叶黄杨、女贞、月季、丁香、紫荆、连翘、海棠和榆叶梅叶片的微量元素铁、铜、锌、锰含量均比对照有所增加,表现出升高的趋势,所有测定结果均在正常的含量范围内,且植物外观没有出现缺素症状。试验结果表明,再生水灌溉对植株地上部分微量元素铁、铜、锌、锰的吸收没有产生明显不良影响。在所有植株的叶片中,再生水处理的植株叶片矿质元素含量总体上高于对照。但统计检验表明大部分植物处理间差异并未达到显著水平,仅个别植物有所体现。说明再生水促进了植物对矿质元素的吸收。

钠是植物有益元素之一。表中化验结果表明,再生水处理的植株地上部分钠含量均比对照增加,女贞和月季的增幅接近 1 倍,相对而言,大叶黄杨的增幅较小。钠元素测定结果表明,再生水灌溉两个生长周期后,不同程度地引起了植株地上部分钠含量的升高。在其他管理因素完全一致,仅灌溉水源不同的前提下,再生水中钠离子含量较高引起了植株组织内钠的累积。从再生水水质分析结果得知,本试验点再生水中 Na<sup>+</sup> 含量大约是对照的 1 倍,因此本研究结果初步表明植株体内钠含量的升高源于灌溉水带入土壤中较多的钠(土壤化验结果表明,再生水浇灌引起土壤中交换性钠大幅升高),再生水浇灌两个生长周期后,随着植物根系的吸收,植物叶片组织中就已经出现了钠的积累现象。植物生长状况调查结果表明,再生水处理的女贞、月季、丁香、紫荆、连翘、海棠和榆叶梅生长正常,外观未见明显异常;但再生水浇灌的大叶黄杨叶片出现了严重的焦边现象,该现象可能与钠含量较高直接相关。

### 2.2 再生水灌溉对根际土壤理化性质的影响

从表 3 的结果中可以看出,灌溉的 8 种园林植物

土壤中盐分含量与对照相比均极为显著地增加,说明在再生水的多年灌溉下,土壤中的盐分已出现了明显累积。根据地方标准,当土壤中的全盐质量分数高于1.2 g/kg时会使部分植物生长受到抑制或损害,土壤有盐渍化的危险。本研究中再生水处理下土壤中全盐的质量分数为0.108~0.402 g/kg,对照土壤中全盐的质量分数为0.089~0.356 g/kg,低于相关标准,但由于盐分在土壤中出现了积累,应注意监测,并应采取措施避免盐害的发生。在2种水质灌溉下,8种园林植物土壤中氯离子和水溶性钠含量均显著增加,说明多年的再生水灌溉已导致氯离子、钠离子在

土壤中有所积累。

土壤肥力水平分析:由试验数据得知,供试植物土壤的pH值范围为8.16~8.95,根据土壤酸碱性分级情况属于碱性土壤,两种水质灌溉的土壤pH值没有显著的差异。土壤中氮、磷、钾和有机质是决定土壤肥力的主要指标,也是植物生长发育所必需的营养元素。试验结果显示再生水灌溉的土壤中,除了女贞、月季和紫荆以外,其他园林植物土壤碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量并没有显著增加,所以尽管再生水中氮、磷含量较高,但土壤中的氮、磷含量并没有显著提升,由此可知再生水灌溉并不能显著提高土壤肥力。

表2 再生水灌溉对植物叶片矿质元素含量的影响

项目		N/	P/	K/	Fe/	Cu/	Zn/	Mn/	Mg/	Na/	Ca/
		%	%	%	(mg·kg <sup>-1</sup> )	%	%				
大叶黄杨	自来水	1.02	0.05	0.25	156	1.59	13.25	13.95	0.156	0.032	0.952
	再生水	0.95	0.07	0.29	198*	2.38	19.58**	16.58*	0.325	0.039	0.725
女贞	自来水	2.36	0.36	1.89	269	12.36	62.58	322.12	0.523	0.089	0.547
	再生水	2.59**	0.52**	1.92**	287*	16.89*	73.59**	356.24*	0.698*	0.092**	0.985**
月季	自来水	2.89	0.29	1.23	325	25.89	38.98	258.94	0.514	0.075	2.364
	再生水	3.26**	0.31	1.65*	459**	29.24**	46.15**	268.03*	0.598*	0.082*	2.569*
丁香	自来水	1.25	0.14	0.56	103	14.78	23.17	56.58	0.125	0.018	2.014
	再生水	1.35*	0.16	0.78	156	16.98*	29.71**	63.17*	0.236	0.023	2.698**
紫荆	自来水	2.74	0.29	1.25	358	32.18	71.25	156.98	0.745	0.085	2.014*
	再生水	2.94	0.34*	1.35*	417**	38.94**	74.03*	163.02*	0.869*	0.091*	1.856
连翘	自来水	1.02	0.09	0.89	234	15.47	23.58	92.56	0.356	0.036	3.569*
	再生水	1.15	0.13	0.92	254*	16.28	26.41*	96.85*	0.398	0.041	3.025
海棠	自来水	1.25	0.07	0.36	109	11.37	18.98	86.23	0.233	0.025	0.895
	再生水	1.36	0.07	0.54	117**	16.98*	21.07**	89.17*	0.249	0.029*	0.925
榆叶梅	自来水	1.14	0.14	0.09	156	6.89	13.56	56.23	0.351	0.047	1.144
	再生水	1.57**	0.16	0.11	198*	9.17**	16.28	58.07	0.401*	0.051	1.269*

注:\*表示自来水与再生水灌溉在 $p<0.05$ 水平差异显著;\*\*表示自来水与再生水灌溉在 $p<0.01$ 水平差异显著,下同。

### 2.3 再生水灌溉对根际土壤微生物数量的影响

土壤微生物的数量分布,不仅可以敏感地反映土壤质量的变化,而且是土壤中生物活性的具体体现。本研究中细菌、真菌和放线菌与微生物总数的变化趋势基本相一致,在组成微生物种群的细菌、放线菌和真菌三大类中,细菌数量处于绝对优势地位,占到微生物总数的99.3%以上,放线菌和真菌所占的比例较少,从放线菌和真菌所占比例来看,放线菌近似相等于真菌。表4的结果表明再生水灌溉后土壤细菌数量,与自来水灌溉相比,大多数供试植物呈现增加趋势或无明显变化,韩烈保等研究一般三级水灌溉多年后,草地早熟禾土壤的土壤细菌总数、放线菌总数、真菌总数都低于自来水灌溉,本研究与其不一致。郭道宇等研究再生水草坪灌溉不仅有利于草坪草根际微生物数量的增加,同时在促进草坪草根际微生物群

落多样性增加方面也表现出一定的优势,本研究与郭道宇等研究一致。土壤中细菌数量,这可能与再生水中含有各种难降解的有机物、致病菌、病毒和某些寄生虫卵有关。土壤真菌是常见的土壤微生物,它适宜酸性,由于供试土壤均显碱性故真菌的数量总体偏低。表4的结果表明再生水灌溉对土壤真菌数量的影响,与自来水灌溉相比,绝大多数供试植物土壤微生物数目均有所增加。放线菌是参与土壤有机质分解过程的主要成员之一,能分解多数真菌和细菌不能分解的化合物,还参与难分解的有机质的分解过程,它能同化无机氮,分解碳水化合物及脂类、单宁等难分解的物质,在土壤中对物质转化也起一定作用,再者放线菌数量也与植被病害防治有密切关系。表4的结果表明,与自来水灌溉相比,用再生水灌溉的8种供试植物大多数显示土壤放线菌数量无明显变化。

表 3 再生水灌溉对根际土壤理化性质的影响

项目	pH 值	Cl <sup>-</sup> /	水溶性钠/	全盐/	有机质/	全氮/	碱解氮/	有效率/	速效钾/	
		(mg · kg <sup>-1</sup> )	(mg · kg <sup>-1</sup> )	(g · kg <sup>-1</sup> )	(g · kg <sup>-1</sup> )	(g · kg <sup>-1</sup> )	(mg · kg <sup>-1</sup> )	(mg · kg <sup>-1</sup> )	(mg · kg <sup>-1</sup> )	
大叶黄杨	自来水	8.51	42.56	28.56	0.095	12.56	0.98	56.89	13.69	132.89
	再生水	8.46	56.98*	35.98	0.125	12.98	1.03	78.95	16.98	156.32*
女贞	自来水	8.56	52.36	59.85	0.356	18.95	1.58	92.36	56.98	156.94
	再生水	8.42	98.54**	89.54**	0.402*	19.25*	1.62*	113.56*	86.14**	198.47*
月季	自来水	8.59	63.14	62.98	0.314	17.85	1.76	112.39	62.34	165.23
	再生水	8.52	123.45**	96.32	0.387	20.37*	1.82	165.98*	89.26*	203.14**
丁香	自来水	8.51	92.54	16.89	0.089	13.58	0.87	123.56	16.87	112.47
	再生水	8.53	157.84*	26.84*	0.108	15.69	0.95	135.47	23.58	132.54
紫荆	自来水	8.42	38.56	56.94	0.289	19.25	1.68	56.98	75.14	176.95
	再生水	8.43	54.19**	82.02**	0.369	20.47*	1.95	59.28*	91.77**	198.47*
连翘	自来水	8.56	45.36	26.98	0.098	12.74	1.12	104.78	23.69	95.85
	再生水	8.72	89.74*	35.17	0.147	12.85	1.25	123.56*	34.14	102.03
海棠	自来水	8.51	56.12	23.04	0.103	13.56	1.01	68.25	35.21	103.58
	再生水	8.47	94.17	38.45*	0.236*	15.26	1.13	78.25	39.15	123.41*
榆叶梅	自来水	8.43	35.78	35.26	0.145	14.78	1.16	56.32	29.87	119.87
	再生水	8.25	52.18*	45.04*	0.156	16.58*	1.19	62.14*	43.89	132.59*

表 4 再生水灌溉对根际土壤微生物数量的影响

项目		细菌		放线菌		真菌	
		数量/(10 <sup>5</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	百分数/%	数量/(10 <sup>5</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	百分数/%	数量/(10 <sup>5</sup> cfu · g <sup>-1</sup> )	百分数/%
大叶黄杨	自来水	432.6	98.2	1.56	0.65	0.96	0.23
	再生水	562.9*	98.6	1.89	0.75	1.23*	0.21
女贞	自来水	569.3	97.5	2.36	0.64	2.36	0.19
	再生水	658.4**	98.1	3.02	0.69*	2.69**	0.16
月季	自来水	612.3	98.0	2.15	0.72	2.98	0.35
	再生水	789.4**	97.3	2.51*	0.53	3.25**	0.36
丁香	自来水	126.5	98.3	1.01	0.78	1.23	0.34
	再生水	230.1**	98.5	1.23	0.71	1.98	0.28
紫荆	自来水	235.7	99.1	3.02	0.58	3.25	0.46
	再生水	245.5*	98.7	3.59*	0.53	4.56**	0.41
连翘	自来水	169.8	98.5	1.09	0.75	0.89	0.38
	再生水	203.6*	98.3	1.26*	0.76	1.25	0.25
海棠	自来水	234.1	97.2	1.13	0.85	0.94	0.62
	再生水	265.9*	97.5	1.25	0.76	1.28*	0.58
榆叶梅	自来水	325.5	98.0	1.26	0.76	1.23	0.52
	再生水	414.7**	97.3	1.68	0.72	1.59*	0.61
大叶黄杨	自来水	239.6	97.8	1.45	0.82	1.56	0.48
	再生水	256.8*	98.1	1.69	0.85	1.68	0.36
女贞	自来水	217.5	97.2	1.35	0.76	1.47	0.45
	再生水	235.7*	97.3	1.54	0.74	1.69*	0.34

#### 2.4 再生水灌溉对根际土壤酶活的影响

土壤酶活性评价热微生物活性的重要指标。试验结果显示再生水灌溉的土壤硝酸还原酶、酸性磷

酸酶、纤维素酶、脲酶、转化酶和蔗糖酶活性均高于自来水处理,除了女贞、月季和紫荆以外,其他园林植物土壤硝酸还原酶、酸性磷酸酶、纤维素酶、脲

酶、转化酶和蔗糖酶活性并没有显著增加(表5),所以尽管再生水中酶活性较高,但土壤中的酶活性并

没有显著提升,由此可知再生水灌溉并不能显著提高土壤酶活性。

表5 再生水灌溉对园林植物根际土壤酶活性的影响

项目	硝酸还原酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )	酸性磷酸酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	纤维素酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	脲酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	转化酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	蔗糖酶/ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )	
大叶黄杨	自来水	1.25	0.98	2.98	1.69	2.03	1.85
	再生水	1.56	0.99	3.25	1.75	2.13	1.98*
女贞	自来水	2.15	2.53	6.52	5.36	4.56	2.54
	再生水	2.36*	2.68*	7.05*	6.23*	5.23*	2.69*
月季	自来水	2.54	2.14	6.14	5.04	3.69	2.36
	再生水	2.98**	2.23*	6.68*	6.98**	4.26*	2.87*
丁香	自来水	1.59	1.06	3.58	2.36	2.56	1.97
	再生水	1.64*	1.09	3.95	3.25*	3.58**	2.69**
紫荆	自来水	1.23	2.54	5.89	6.74	5.02	2.69
	再生水	1.69*	2.56	6.25**	7.25*	5.12	3.05*
连翘	自来水	2.57	1.13	4.32	3.25	2.07	1.03
	再生水	2.98	1.25*	5.07	5.14**	2.69	1.24
海棠	自来水	1.34	0.97	3.21	2.98	3.15	1.21
	再生水	1.56	1.12	4.87*	3.02	3.54*	1.69*
榆叶梅	自来水	1.45	1.34	2.89	2.74	2.87	1.38
	再生水	1.69*	1.56**	3.25*	2.85	3.12	1.87*

### 3 讨论与结论

土壤细菌是土壤微生物的主要组成成分,能分解各种有机物质。由于再生水中含有较丰富的 N,P,K 等矿物质营养,为细菌的生长提供了丰富的碳源和氮源,并可提高土壤的通气性,激发细菌的生长和发育从而极大地增加了细菌的数量,这也与再生水中含有各种难降解的有机物、致病菌、病毒和某些寄生虫卵有关<sup>[17]</sup>。真菌是常见的土壤微生物之一,从数量上看,它们明显低于其他种类微生物,但从生物量上看,却占有极其重要的地位<sup>[18-19]</sup>。放线菌是细菌的一类,在数量方面仅次于细菌,它们对土壤中的有机化合物的分解及土壤腐殖质合成起着重要作用。再生水中含有的氮磷等营养物质高于自来水含量,所以长期用再生水浇灌的土壤中营养物质含量较高,土壤肥力提高,为微生物创造良好的生存环境,刺激微生物的生长和活动<sup>[18-19]</sup>。土壤微生物组成以细菌为主,放线菌次之,真菌最少,不同处理条件下土壤微生物数量存在明显差异。土壤微生物不仅控制着土壤有机质和重要营养元素的生物转化,还深刻影响着土壤物理—化学性质<sup>[20]</sup>。因此土壤微生物对于土壤可持续利用具有至关重要的作用。同样,营养元素、土壤物理化学性质也显著的影响着土壤微生物数量、活性及其多样性。

由于水质是影响土壤微生物的最直接的因素(水

质和植物之间交互作用不显著),因此灌溉水质中各指标的含量差异,对土壤细菌总数也有很大影响。值得注意的是,再生水中的 BOD<sub>5</sub> 物质如果过多,其进入土壤后会比较迅速的消耗土壤空隙中的氧气,从而使得厌氧微生物得到发展,土壤细菌的反硝化作用加强,土壤中的 N 素被反硝化成气体 N<sub>2</sub> 挥发。另外,再生水通常需要用氯来消毒,当氯气进入再生水中,水中的有机质或悬浮物会被破坏分解,产生一些挥发酚,散发异臭<sup>[21-22]</sup>。含盐量较高的再生水进入土壤后又会影响土壤的 EC,进而影响到土壤细菌总数的变化。此外根系分泌物对土壤微生物有较大的影响,根系分泌物使根际微生物的种类和数量都有很大的变化<sup>[23]</sup>。根际微生物的数量在很大程度上取决于根系分泌物中糖、有机酸和氨基酸等物质的多少,分泌物越多,微生物生长越旺盛。土壤微生物的数量还受植物、土壤类型以及土壤管理措施的影响。最新研究结果指出<sup>[24]</sup>,植物的作用因植物群落结构多样性、植物种类、同种植物不同的基因型,甚至同一植物不同根的区域而异;而土壤的作用与土壤质地和有机质含量等因素有关;植物和土壤类型在对土壤微生物群落结构影响上的作用存在互作关系。

在土壤理化性状方面,再生水灌溉情况下,几种园林植物的土壤 pH 值与对照相比无显著差异;土壤全盐量、水溶性钠和氯离子含量均高于自来水灌溉,

多种植物土壤含量与自来水灌溉相比达到了显著差异或极显著差异;在土壤养分方面,与对照相比,碱解氮、有效磷、速效钾含量差异不显著。土壤微生物是土壤生态系统物质循环和能量流动的主要驱动力,对土壤有机质的分解、腐殖质的形成、养分的转化及循环等过程具有重要作用;土壤微生物通过分泌酶的方式参与土壤生态系统营养循环等,土壤酶活性动力学的变化可反映出土壤中各种生化过程的强度及其方向,土壤酶活性、微生物量和微生物数量在植物生长过程中起着重要作用。本研究中再生水灌溉促进了园林植物与土壤之间的平衡共生关系,在园林植物植株生长过程中提高了土壤肥力,而土壤肥力的改变会对植物的入侵做出进一步的反馈调节。相同生境条件下,施用再生水灌溉后,园林植物植物根际土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均有所增加。由此表明了再生水灌溉对园林植物根际土壤养分、土壤微生物量、酶活性及微生物数量均表现为一定程度的增加效应,与前人的研究结果相一致<sup>[6-7]</sup>。综合分析可知,再生水灌溉能够短期内促进园林植物的生长和根际土壤养分、酶活性微生物数目的提高。但从生态系统结构稳定性而言,再生水灌溉对土壤养分影响的过程比较复杂,与灌溉量、灌溉时间、生境、土壤本身特性、物候等生理生态特性的差异有关。对于园林植物栽培过程中土壤本身的肥力特性也是影响再生水灌溉效应的重要因素,再生水灌溉对园林植物生长的效应需从土壤肥力、园林植物类型以及管理措施等多方面因素加以综合考虑。

致谢:感谢河北农业大学谷建才教授在论文写作和数据分析等方面提供的悉心指导。

#### 参考文献:

- [1] 杨林林,杨培岭,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.
- [2] 彭致功,杨培岭,王勇,等.再生水灌溉对草坪土壤速效养分及盐碱化的效应[J].水土保持学报,2006,20(6):84-88.
- [3] 黄冠华,查贵锋,冯绍元,等.冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率的研究[J].农业工程学报,2004,20(1):65-68.
- [4] 吴文勇,刘洪禄,郝仲勇,等.再生水灌溉技术研究现状与展望[J].农业工程学报,2008,24(5):302-306.
- [5] 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.
- [6] 周陆波,韩烈保,苏德荣,等.再生水灌溉对草坪草生长的影响[J].节水灌溉,2005(1):5-8.
- [7] 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.
- [8] 韩烈保,王昌俊,苏德荣.再生水灌溉对绿地土壤及植物影响的研究[J].北京林业大学学报,2006,28(1):1-7.
- [9] 苗战霞,黄占斌,侯利伟,等.再生水灌溉对玉米和大豆抗氧化酶系统的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(4):1338-1342.
- [10] 王艳春,张莉楠,古润泽.再生水灌溉对园林植物和土壤的影响研究[J].北京园林,2005(4):6-11.
- [11] 陈雁,李树华.再生水对园林植物生长影响的研究[J].灌溉排水学报,2008,27(2):98-101.
- [12] 王艳春,张娟,郝宝刚.再生水灌溉城市园林绿地对植物矿质元素和土壤性状的影响研究[J].中国园林,2007,23(2):62-65.
- [13] 罗安程, TB-Subedi,章永松,等.有机肥对水稻根际土壤中微生物和酶活性的影响[J].植物营养与肥料学报,1999,5(4):321-327.
- [14] 柴强,黄鹏,黄高宝.间作对根际土壤微生物和酶活性的影响研究[J].草业学报,2005,14(5):105-110.
- [15] 许景伟,王卫东.不同类型黑松混交林土壤微生物,酶及其与土壤养分关系的研究[J].北京林业大学学报,2000,22(1):51-55.
- [16] 周礼恺,张志明.土壤酶活性的测定方法[J].土壤通报,1980,5(1):37-38.
- [17] 钟文辉,蔡祖聪.土壤微生物多样性研究方法[J].应用生态学报,2004,15(5):899-904.
- [18] 李世昌,刘梅娟,卢凤勇,等.栽参对土壤微生物生态及土壤酶活性的影响[J].生态学报,1983,3(1):29-34.
- [19] 钟文辉,蔡祖聪.土壤管理措施及环境因素对土壤微生物多样性影响研究进展[J].生物多样性,2004,12(4):456-465.
- [20] 章家恩,刘文高,胡刚.不同土地利用方式下土壤微生物数量与土壤肥力的关系[J].土壤与环境,2002,11(2):140-143.
- [21] 潘能,侯振安,陈卫平,等.绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J].环境科学,2012,33(12):4081-4087.
- [22] 郭道宇,董志,宫辉力.再生水灌溉对草坪土壤微生物群落的影响[J].中国环境科学,2006,26(4):482-485.
- [23] 苗战霞,黄占斌,侯利伟,等.再生水灌溉对玉米根际土壤特性和微生物的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(1):62-66.
- [24] 赵新风,徐海量,张鹏,等.养分与水分添加对荒漠草地植物群落结构和物种多样性的影响[J].植物生态学报,2014,38(2):167-177.