

建筑回填土中再生水灌溉对草坪草生长及土壤理化性质的影响

李河, 史海滨, 李仙岳, 王志超, 步怀亮

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 为探明建筑回填土条件下草坪草种植的适宜性以及再生水灌溉对草坪草生长和土壤理化性质的影响情况, 选用黑麦草为试验对象, 通过室内盆栽试验的方式, 设置清水灌溉、再生水灌溉、清水—再生水交替灌溉3个处理, 研究了呼和浩特市建筑回填土灌溉再生水对草坪草生长及土壤理化性质的影响。试验发现: (1) 与清水灌溉相比, 清水—再生水交替灌溉、再生水灌溉下的草坪草生长速率分别增长了23%, 34%。(2) 各处理草坪草在质地、盖度、均一性方面的得分表现为: 再生水灌溉>清水—再生水交替灌溉>清水灌溉, 但差异性不显著($P>0.05$)。(3) 到观测结束期时, 再生水、清水—再生水交替灌溉下的土壤全盐量较对照组分别增加了8%, 3%。(4) 不同灌溉水质条件下黑麦草对土壤重金属的富集具有差异性, 土壤中重金属含量有增有减。试验结果表明, 再生水灌溉对草坪草的生长速率有很明显的促进作用, 草坪草的颜色在再生水灌溉下要显著优于其他处理($P<0.05$)。同时, 对试验土壤及草坪草的后期分析能够发现, 短期内再生水灌溉下的土壤不会对草坪草产生盐害, 土壤也均未受到污染, 可见短期内建筑回填土下使用再生水灌溉草坪草是可行的。

关键词: 建筑回填土; 再生水灌溉; 黑麦草; 重金属

中图分类号: X825; S273.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0171-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.029

The research on the influence of reclaimed water irrigation on turfgrass growth and soil physical and chemical properties in building backfill soil

Li He, SHI Haibin, LI Xianye, WANG Zhichao, Bu Huailiang

(Water Conservancy and Civil Engineering college of Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018)

Abstract: To explore the suitability of grass planting one lawn under backfill conditions as well as the impact of irrigation with reclaimed water on grass growth and soil properties. This paper chooses *Lolium perenne* as the test subject by setting up three groups, fresh water irrigation, reclaimed water irrigation and fresh+reclaimed water alternative irrigation in the form of indoor pot experiment. It studies the impact of irrigation with reclaimed water on grass growth and soil properties in Hohhot. The results showed as follows: (1) Compared with fresh water irrigation, lawn with fresh+reclaimed alternative irrigation and reclaimed water grows by 23% and 34% respectively. (2) The scores of quality, coverage and evenness of lawns indicate: reclaimed water irrigation>fresh+reclaimed alternative irrigation>fresh water irrigation. But the difference is not significant ($P>0.05$). (3) When the observation is ended, the salt of soil irrigated by fresh+reclaimed alternative irrigation and reclaimed water increases by 8% and 3% respectively. (4) Under different irrigation water quality conditions, *Lolium perenne*'s absorption of soil heavy metals varies and the heavy metal contents are different in the soil. The results showed that reclaimed water irrigation has an obvious role in enhancing the growth rate of the lawn and the color of the lawn irrigated by reclaimed water is visibly better than others ($P<0.05$). At the same time, the further analysis of test soil and lawn showed that claimed water irrigation will not impose soil damage on lawns and soil is not affected. It can be seen that it is feasible to irrigate lawn with reclaimed under backfill conditions in the short term.

Keywords: building backfill soil; reclaimed water irrigation; *Lolium perenne*; heavy metal

再生水利用是污水资源化利用的一种主要形式, 是一种可作为除常规水资源以外的第二稳定水源, 具

备广泛应用于耗水量较大的绿地灌溉的潜能^[1-3]。同时, 相关研究表明, 再生水中含有丰富的营养元素^[4],

收稿日期: 2016-04-29

资助项目: 内蒙古自治区水利科技项目(nsk2012-8)

第一作者: 李河(1991—), 男, 硕士生, 主要从事节水灌溉原理及应用方面的研究。E-mail: 530341678@qq.com

通信作者: 史海滨(1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉原理及应用方面的研究。E-mail: shi_haibin@sohu.com

使用再生水灌溉具有促进植物的生长发育、优化形态品质、改变生理特性、改善土壤养分供应状况等优点^[5-6]。刘金荣等^[7]研究发现,再生水灌溉使草坪草的再生量提高,叶绿素含量也显著提高,灌溉后期草坪草叶宽显著提高。马莉等^[8]以兰州地区常见冷季型草坪草黑麦草为研究对象,通过盆栽试验发现,再生水灌溉处理的土壤有机质、全氮、全磷、全钾、全钠等含量均不同程度的高于对照。然而,再生水中含有微量的重金属、盐分和有毒元素等,这些污染物随再生水进入土壤中,在土壤中累积会对植物和土壤造成伤害^[9]。潘能等^[10]认为,再生水灌溉下城市绿地土壤盐分显著高于其对照灌区,过量的盐分不仅会对土壤结构产生影响,而且会造成植物发芽延迟、生长受阻等情况发生,而魏益华等^[11]发现,除 0—15 cm 土层全盐量增加外,15—45 cm 土壤层盐分累积现象与自来水灌溉相比无明显差异。此外,使用再生水灌溉是否会对土壤、植物产生重金属危害也是不容忽视的问题。徐卫红等^[12-13]研究表明,锌、镉及复合污染对黑麦草生物量存在不同程度的抑制作用,并且明显降低了黑麦草叶绿素含量,但同时提高了叶片 POD、SOD 的活性。魏益华等^[11]认为,短期内采用再生水灌溉不会显著增加土壤中重金属含量。随着城市的发展和建设,绿地面积的增加,以建筑回填土为主的城市近郊被越来越多的回用于绿地种植,但因为人们生活习惯和城市建设等原因,建筑和生活垃圾未经处置随意堆放,极易造成土壤污染,对生态环境及人类健康产生了严重影响。而当前关于不同再生水灌溉模式下的建筑回填土是否影响草坪草正常生长的研究还相对较少。因此,本研究以呼和浩特市典型近郊土壤和再生水为对象,将两者有机结合起来,通过室内盆栽试验,分析建筑回填土中不同再生水灌溉模式对草坪草生长及土壤理化性质的影响,以期为再生水灌溉下建筑回填土中草坪草的种植提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

- 1.1.1 试验用水
- 清水采用内蒙古农业大学自来水,再生水为呼和浩特市章盖营污水处理厂二级再生水,灌溉水源的化学成分见表 1。由表 1 可知,无论是清水还是再生水,各项指标均符合城市绿化水质标准。
- 1.1.2 供试植物
- 根据呼和浩特市当地的草坪草种植习惯,试验草种采用多年生黑麦草。黑麦草具有再生能力强,易于种植,生物量大,抗病虫害能力强等特性。有报道显示黑麦草对重金属具有很强的抗性,且对重金属有蓄集作用^[12-13]。
- 1.1.3 试验用土
- 试验用土为呼和浩特市近郊地区建筑回填土,土质不均一,以壤沙土为主,0—20 cm

土层不同粒径颗粒质量分数为:粘粒 1.9%,粉粒 16.7%,砂粒 81.4%。土壤基本理化性质指标如下:pH 值为 8.33,EC 值为 165.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$,容重为 1.41 g/cm^3 ,铅、砷、汞、镉、铬的含量分别为 4.69×10^4 , 3.616×10^3 ,38.88,0.1381, 3.843×10^4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

表 1 不同灌溉用水主要水质指标的比较

测定指标	清水	章盖营污水处理厂再生水	城市绿化水质标准
COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	19	39.9	无
BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)	7.5	9.35	≤20
NH ₃ -N/(mg·L ⁻¹)	3.31	10.17	≤20
TP/(mg·L ⁻¹)	0.02	3.39	无
TN/(mg·L ⁻¹)	3.58	15.96	无
pH 值	7.1	6.9	6.0~9.0
EC/(dS·m ⁻¹)	0.72	5.51	无
嗅	无不快感	无不快感	无不快感
铅/(μg·L ⁻¹)	<0.001	0.7796	≤0.2
砷/(μg·L ⁻¹)	<0.001	0.4696	≤50
汞/(μg·L ⁻¹)	<0.001	<0.005	≤1
铬/(μg·L ⁻¹)	<0.001	1.786	≤100
镉/(ng·L ⁻¹)	<0.1	5.91	≤10000

1.2 试验设计

试验在内蒙古农业大学水资源利用与保护重点实验室内进行,将试验用土取回后风干,过 0.5 cm 筛备用,每盆装干土 2.55 kg。试验用盆上、下口直径均为 16 cm,高 12 cm。试验于 2014 年 6 月 15 日进行播种,2014 年 10 月 15 日测定结束。称取 2 g 多年生黑麦草种子,均匀撒施于土壤表面,然后覆一层薄土。试验初期采用蒸馏水进行浇灌,保证种子的正常萌发和生长。待草坪正常生长 15 d 后将统一处理后的试验材料分为 3 组,分别使用清水灌溉、清水—再生水交替灌溉、再生水灌溉,每种处理设 3 组重复,试验期间每盆每天灌溉水量为 100 ml,不进行施肥。

1.3 试验测试指标及方法

草坪草生长速率:考虑到多年生黑麦草喜温不耐寒,适宜在 10~27 $^{\circ}\text{C}$ 左右的环境下生长的生理特性,而呼和浩特市属于典型的蒙古高原大陆性气候,四季温度变化明显,因此草坪草生长速率的测定时间段为 2014 年 7 月 1 日至 10 月 15 日。待植株的自然高度长到 12 cm 左右时修剪,依据 2/3 修剪原则,修剪后高度定为 4 cm,修剪前用游标卡尺测定该盆草坪草的平均自然高度,修剪后采用修剪前的测量值减去修剪高度除以间隔的天数,即为该生育期内草坪草的生长速率。

草坪草感官表现调查:草坪草的感官表现主要通过草坪颜色、质地、盖度、均一性 4 项指标进行评价,测定时间为草坪草生育期内的 7,8,9 月。具体评价方法如下,颜色:枯黄 0 分,黄绿色 50 分,深绿色 100 分;质地:叶宽<1 mm 为 90~100 分,1~2 mm 为 80~90 分,2~3 mm 为 70~80 分,3~4 mm 为 60~70

分,4~5 mm 为 50~60 分,>5 mm 为 0~50 分;盖度:全部由裸地杂草构成 0 分,每增加 10%草坪加 10 分,最高 100 分;均一性:高度、密度一致 100 分,裸地或枯草或杂草每占 10%扣 20 分^[14]。

土壤盐分:土壤样品经风干后,磨碎混合过 2 mm 筛,用电导率法测土壤盐分,水土比例为 5:1。

土壤重金属(铅、铬、镉、砷、汞):2014 年 10 月 20 日取土样经风干,过 2 mm 筛后测定,其中铅、镉参照原子吸收分光光度法(GB/T17141—1997)测定,铬参照原子吸收分光光度法(GB/T 17137—1997)测定,砷参照硼氢化钾—硝酸银分光光度法(GB/T17135—1997)测定,汞参照原子吸收分光光度法(GB/T17136—1997)测定。

草坪草地上部分重金属(铅、铬、镉、砷、汞):与土壤样品采集同时进行。用自来水和蒸馏水对地上部冲洗 3 遍,然后在烘箱 75 ℃下烘 72 h 至恒重,称取干重。烘干后用不锈钢的研磨机磨碎过 100 目的筛子,然后在消煮管中加入 7 ml HNO₃ 和 1 ml H₂O₂,用微波消解仪进行消解,消煮液过滤后测定方法与土壤样品相同。

1.4 数据处理及评价方法

1.4.1 数据处理 采用 Microsoft Excel 2007 和 Spss17.0 软件进行数据处理、分析制图与方差分析。

土壤盐度^[10](EC_{1:5}):1 μS/cm=1 dS/m。
式中:EC_{1:5} 为土水质量比为 1:5 的浸提液测定的土壤电导率

草坪草地上部分重金属富集系数=草坪草地上部分重金属积累量/土壤重金属含量^[15]。

单项污染指数计算公式:
$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中:P_i 为土壤重金属 i 的单项污染指数;C_i 是土壤重金属 i 的实测值;S_i 是重金属 i 的评价标准值。

综合污染指数计算公式:
$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i]^2 + [\max(p_i)]^2}{2}} \tag{2}$$

式中:max(P_i) 为最大单项污染指数; $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i$ 为单项平均污染指数^[16]。

1.4.2 评价方法 本研究基于国家《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级限量值作为污染评价参考值(表 2),采用单项因子污染指数法和综合污染指数法进行评价,综合污染指数法采用内梅罗综合污染指数法进行评价,评价标准见表 3。

2 结果与分析

2.1 回填土中不同灌溉水质对草坪草生长速率的影响
不同灌溉水质条件下草坪草生长速率的季变动

态如图 1 所示。全生育期内,各处理的草坪草生长速率基本上都呈现出增高—降低—增高—降低的波动式规律,这可能与呼和浩特市光照强度和温度随季节的变化差异较大有关。随着生育期的延长,日平均气温的上升,草坪草的生长速率也有大幅度的增长,到 8 月初第一次达到峰值。而对于冷季型草坪草来说,最适宜生长温度一般在 15~25 ℃之间,过高的温度会抑制其生长,因此在 8 月期间草坪草生长放缓,9 月初第二次达到峰值后随着温度的降低而生长速率也逐月降低。然而,不同处理间却存在很明显的差异,使用清水灌溉、清水—再生水交替灌溉、再生水灌溉下的草坪草生育期的平均生长速率分别为 0.47, 0.58,0.63 cm/d。与清水灌溉相比,清水—再生水交替灌溉、再生水灌溉下的草坪草生长速率分别增长了 23%,34%。可见,再生水灌溉对草坪草的生长速率有很明显的促进作用。在生长初期,各处理下草坪草生长速率并无明显差异,但是到了 7 月后期,再生水处理下的草坪草生长速率大幅度提高,而后也处于较高水平。这是由于再生水中富含氮、磷、钾等营养元素,为草坪草不同生育阶段对各营养元素的需求提供了充足的保证,并且建筑回填土本身从未进行过种植活动,土壤较贫瘠,因此,在不施肥的条件下这种作用愈发明显。

表 2 国家土壤环境质量标准二级限量值

元素	As	Hg	Pb	Cd	Cr
标准限量值/(mg·kg ⁻¹)	25	1	350	1	250

表 3 土壤内梅罗综合污染指数法评价标准

分级	P _综	污染水平
I	P _综 ≤0.7	清洁
II	0.7<P _综 ≤1.0	尚清洁
III	1.0<P _综 ≤2.0	轻度污染
IV	2.0<P _综 ≤3.0	中度污染
V	P _综 >3.0	重度污染

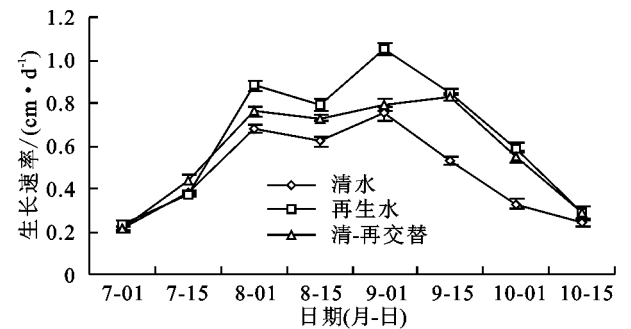
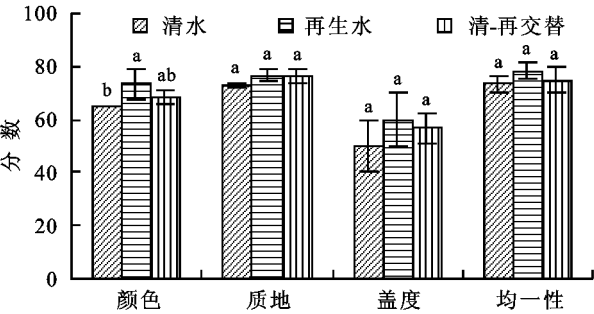


图 1 不同灌溉水质条件下草坪草生长速率的季变动态

2.2 回填土中不同灌溉水质对草坪草外观品质的影响

图 2 为不同灌溉水质条件下反映草坪质量的相关指标。由图 2 可知,在作物全生育期内,再生水灌溉总体上不仅不会对草坪生长质量产生不良影响,甚至在某种程度上要优于清水—再生水交替灌溉及清

水灌溉。经分析比较,各处理草坪草在质地、盖度、均一性方面的得分表现为:再生水灌溉>清水—再生水交替灌溉>清水灌溉,但差异性不显著($P>0.05$)。唯一例外的是草坪草的颜色在再生水灌溉下要显著优于其他处理($P<0.05$),这是因为除碳、氢、氧外,在草坪草的生长发育过程中对氮的需求量最多,约占整株质量的 3%~5%左右,其中叶绿素的合成质量与氮的直接供给量更是息息相关,而供试再生水中的总氮量是清水的 4 倍,较高的含氮水平对草坪草的颜色具有一定的促进作用。可见,在不施肥的情况下,与清水灌溉相比,使用再生水灌溉利于形成优质的草坪,提高草坪的观赏性。



注:图中小写字母表示差异达到 $P<0.05$ 显著水平。

图 2 不同灌溉水质条件下对草坪草颜色、质地、密度、均一性的影响

2.3 回填土中不同灌溉水质对土壤盐分的影响

全盐量是反映土壤盐害的重要指标之一,电导率可直接反映土壤全盐量^[10]。由图 3 可知,整个生育期内,再生水、清水—再生水交替灌溉下土壤盐度的变化呈现先增大后降低的趋势,而只有清水灌溉的对照组基本上没有太大的变化。到观测结束期时,与对照相比,再生水、清水—再生水交替灌溉下的土壤全盐量分别增加了 8%,3%。而与初始本底值相比,清水、再生水、清水—再生水交替灌溉下的土壤全盐量则分别增加了 2%,10%,5%。可见,不同处理下的灌溉水均能在一定程度上增加土壤的全盐量。这是因为灌溉水中含有一定量的盐分,且不同水质的含盐量差异较大,这部分盐分随灌溉水渗入到土壤中并在土壤表层产生不同程度的积聚现象。纵观整个生育期,不同灌溉水质条件下的土壤盐度富集差异水平主要体现在 7,8 月份。这是由于随着温度的升高、光照作用的增强,植物—土壤的蒸腾蒸发作用有很明显提升,“气散盐存”^[17]现象表现明显,大量盐分积聚在土壤表层,只有少量盐分被灌溉水淋洗到下层土壤中,而这种现象以只灌再生水的处理表现的尤为明显。清水—再生水交替灌溉对土壤盐分的淋洗作用要强于再生水灌溉,减小了土壤表层盐分的积聚。饱和浸出液 EC_e 值可以用来判断植物生长是否受盐分危害,本试验土

壤饱和浸出液 EC_e 值范围在 0.406 7~0.490 9 dS/m 之间,通过土壤饱和浸出液 EC_e 值与盐分、植物生长间的关系^[10,18]可知,再生水灌溉下的土壤不会对草坪草产生盐害,可见,短期内使用再生水灌溉不会对建筑回填土上种植的草坪草产生不利影响。

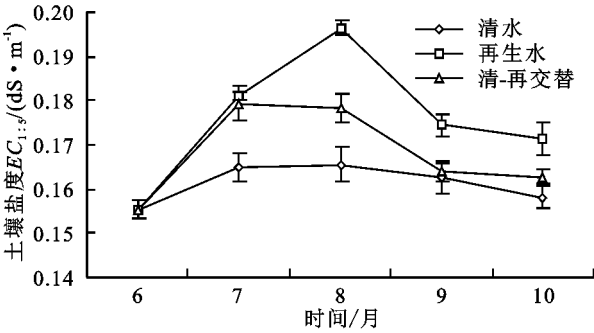


图 3 不同灌溉水质条件下土壤盐分的季变动态

2.4 回填土中不同灌溉水质对草坪草及土壤重金属含量的影响

富集系数是用来反映某重金属元素在土壤—植物系统中迁移难易程度的常用指标^[15],它是植物中元素质量分数与土壤中元素质量分数的比值。不同灌溉水质条件下黑麦草中重金属砷、汞、铅、镉、铬的富集量和富集系数如表 4、表 5 所示。由表可知,无论采用何种灌溉水质进行灌溉,黑麦草对重金属砷、汞、铅、镉、铬都有一定的富集作用,然而,不同灌溉水质条件下的黑麦草对各重金属的富集量具有差异性。从表 4 中可以看出,只进行清水灌溉的黑麦草对重金属铅的富集量最高($P<0.05$);只进行再生水灌溉的黑麦草对重金属砷、汞、镉、铬的富集量最高,但是除铬差异性不显著外($P>0.05$),其它均达显著水平($P<0.05$)。结合清水及再生水水质分析,这种差异性不一定仅仅与灌溉水质有关,还可能与不同种类重金属本身的物理化学行为和生物有效性差异有关,使得其在土壤—植物系统中的迁移转化规律差异较大。同时,多种重金属组成的复合效应使得重金属的迁移转化十分复杂,不同重金属之间既有可能产生协同作用,也有可能产生拮抗作用,而黑麦草本身具有的独特性质,也是造成黑麦草对不同重金属富集量差异性的原因之一,并且这种差异性通过黑麦草对不同重金属的富集系数反映出来。由表 5 可知,不同灌溉水质条件下黑麦草对不同重金属的富集系数由高到低依次为:镉、铬、汞、铅、砷。

由表 6 可知,不同灌溉水质条件下土壤中重金属砷、汞、铅、镉、铬富集量均在国家标准范围内,满足《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)二级标准并且远远小于相应的指标限值。与未进行灌溉的土壤中重金属初始值相比,使用清水灌溉后土壤中重金属含量除砷略有增加之外($P>0.05$),汞、铅、镉、铬均

有不同程度的减少,其中铬含量减少明显($P<0.05$),而使用再生水、清水—再生水交替灌溉后的土壤中重金属含量除铅略有减少之外($P>0.05$),砷、汞、镉、铬均很大程度上在土壤中富集($P<0.05$)。这主要是因为除建筑回填土本身含有一部分的重金属外,再生水中重金属含量也要比清水中重金属含量高 5~1 000 倍,大量的重金属随着再生水灌溉积聚在土壤表层,然而,黑麦草作为重金属富集植物,不仅具有生物量大等特性,而且在一定的再生水灌溉下还能促进其生长速率,相当一部分的重金属被富集到黑麦草中刈割带走。但总体来说,土壤中重金属的灌入量要大于黑麦草的带出量,并且黑麦草本身对重金属的吸收具有一定的限值。此外,重金属在土壤中不仅与植物存在“剂量—效应”关系,而且很大程度上与土壤本身的理

化性质(如土壤类型、电导率、pH、胶体的吸附作用)和土壤中的有机物、微生物及矿物质等有关。

分别计算不同灌溉水质条件下土壤中重金属砷、汞、铅、镉、铬的单项污染指数和综合污染指数^[16],并利用土壤内梅罗综合污染指数法评价标准进行评价,如表 7 所示。结果表明,本试验用土建筑回填土并未受到重金属污染,而使用清水、再生水、清水—再生水交替灌溉后的土壤重金属综合污染指数都较本底值有所增大($P<0.05$),分别增加了 17%,42%,33%。但均未受到重金属污染,土壤状况属于清洁。此外,不同灌溉水质条件下土壤中的砷、汞、铅、镉、铬也并未达到污染的程度,单项污染指数最高的砷(0.21)也远远小于 0.7,可见,短期内使用再生水灌溉对建筑回填土中重金属的污染影响较小。

表 4 不同灌溉水质条件下草坪草中重金属富集量						$\mu\text{g/kg}$
重金属	砷	汞	铅	镉	铬	
清水	131.6c	28.47c	$1.588\times10^4\text{ a}$	0.5784b	$6.834\times10^4\text{ a}$	
再生水	249.2a	41.65a	$8.895\times10^3\text{ b}$	1.111a	$8.181\times10^4\text{ a}$	
清—再交替	150.3b	34.18b	$1.391\times10^4\text{ a}$	1.047a	$7.207\times10^4\text{ a}$	

注:同列数据后不同小写字母表示差异达到 $P<0.05$ 显著水平,下同。

表 5 不同灌溉水质条件下草坪草中重金属富集系数					
重金属	砷	汞	铅	镉	铬
清水	0.02b	0.76b	0.36a	5.78a	2.24a
再生水	0.06a	0.88a	0.2b	0.22c	2.03ab
清—再交替	0.03b	0.75b	0.32a	0.29c	1.92b
平均	0.04	0.80	0.29	2.10	2.06

表 6 不同灌溉水质条件下土壤中重金属富集量						$\mu\text{g/kg}$
重金属	砷	汞	铅	镉	铬	
本底	$3.616\times10^3\text{ b}$	38.88b	$4.69\times10^4\text{ a}$	0.1381b	$3.843\times10^4\text{ ab}$	
清水	$4.316\times10^3\text{ ab}$	37.62b	$4.368\times10^4\text{ a}$	$<0.1\text{ c}$	$3.055\times10^4\text{ c}$	
再生水	$5.357\times10^3\text{ a}$	47.09a	$4.54\times10^4\text{ a}$	4.948a	$4.039\times10^4\text{ a}$	
清—再交替	$4.936\times10^3\text{ a}$	45.5a	$4.385\times10^4\text{ a}$	3.644a	$3.751\times10^4\text{ b}$	
国家标准	$\leq2.5\times10^4$	$\leq1\times10^3$	$\leq3.5\times10^5$	$\leq1\times10^3$	$\leq2.5\times10^5$	

注:国家标准为《土壤环境质量标准》(GB15618—1995),pH>7.5。

表 7 不同灌溉水质条件下土壤重金属污染指数							
样品名称	单项污染指数					综合污染指数	污染程度
	砷	汞	铅	镉	铬		
本底	0.14b	0.04a	0.13a	0.00014b	0.15ab	0.12b	清洁
清水	0.17ab	0.04a	0.12a	0.0001b	0.12b	0.14a	清洁
再生水	0.21a	0.05a	0.13a	0.0049a	0.16a	0.17a	清洁
清—再交替	0.20a	0.05a	0.13a	0.0036ab	0.15ab	0.16a	清洁

注:综合污染指数采用土壤内梅罗综合污染指数法评价标准, $P_{\text{综}}\leq0.7$,清洁。

3 结论

(1)建筑回填土下使用再生水灌溉对草坪草的生长速率有很明显的促进作用。较清水灌溉相比,清水—再生水交替灌溉、再生水灌溉下的草坪草生长速率分别增长了 23%,34%。

(2)建筑回填土下使用再生水灌溉的草坪草生长质量表现在总体上不仅不会产生不良影响,甚至在某

种程度上要优于清水—再生水交替灌溉及清水灌溉。在不施肥的情况下,与清水灌溉相比,使用再生水灌溉利于形成优质的草坪,提高草坪的观赏性。

(3)建筑回填土下使用不同灌溉水质均能在一定程度上增加土壤中的盐分,与初始本底值相比,清水、再生水、清水—再生水交替灌溉下的土壤全盐量分别增加了 2%,10%,5%,但土壤盐分水平不会对作物

生长产生危害,说明短期内使用再生水灌溉不会对建筑回填土上种植的草坪草产生不利影响。

(4)黑麦草、土壤对于不同种类重金属的富集具有差异性,这不仅与黑麦草本身的特性有关,同时也是土壤环境中多种因素共同作用的结果。与本底值相比,再生水灌溉下的土壤中重金属含量总体上增加,但利用土壤内梅罗综合污染指数法进行评价,建筑回填土经再生水灌溉后仍处于清洁状态,可见,短期内使用再生水灌溉对建筑回填土中重金属的污染影响较小。

参考文献:

[1] 王熹,王湛,杨文涛,等. 中国水资源现状及其未来发展方向展望[J]. 环境工程,2014(7):1-5.

[2] 刘洪禄,吴文勇,师彦武,等. 北京市再生水利用潜力与配置方案研究[J]. 农业工程学报,2006,22(2):289-291.

[3] Li C. Discussion on comprehensive utilization of urban rainwater[J]. Energy and Environment,2010(5):65-67.

[4] 陈卫平,吕斯丹,张炜铃,等. 再生(污)水灌溉生态风险与可持续利用[J]. 生态学报,2014,34(1):163-172.

[5] Acadian N W, Giovanni G D D, Encino J, et al. The transport of waterborne solutes and bacteriophage in soil subirrigated with a wastewater blend[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2005,111(1/4):279-291.

[6] Yeager T H, Merveldt J K, Larsen C A. Ornamental plant response to percentage of reclaimed water irrigation [J]. American Sochorticultural Science, 2010, 45 (11):1610-1615.

[7] 刘金荣,杨有俊,郑明珠,等. 再生水灌溉对冷季型草坪

草生长的影响[J]. 草业科学,2013,30(8):1149-1155.

[8] 马莉,谢晓蓉,刘铁军,等. 兰州地区再生水灌溉对冷季型草坪草土壤养分的影响[J]. 草业科学,2015,32(2):182-187.

[9] 贾哲峰,周海峰,常智慧. 再生水灌溉对绿地植物影响的研究进展[J]. 草业学报,2012,21(4):300-306.

[10] 潘能,陈卫平,焦文涛,等. 绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析[J]. 环境科学,2012,33(12):4087-4093.

[11] 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.

[12] 徐卫红,王宏信,李天一,等. 重金属富集植物黑麦草对 Zn 的响应[J]. 水土保持学报,2006,20(3):43-46.

[13] 徐卫红,王宏信,王正银,等. 重金属富集植物黑麦草对锌、镉复合污染的响应[J]. 中国农学通报,2006,22(6):365-368.

[14] 左海涛,武菊英,温海峰,等. 再生水灌溉对草坪草生长和土壤的影响[J]. 核农学报,2005,19(6):474-478.

[15] 杨远祥,朱雪梅,邵继荣,等. 不同混种比例对白三叶和香根草锌镉富集的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(1):266-275.

[16] 陈涛,常庆瑞,刘京,等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159.

[17] 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.

[18] 郭新送,送付朋,鞠正山. 不同水土比土壤浸提液与饱和泥浆电导率的比较研究[J]. 土壤,2015,47(4):812-818.

(上接第 170 页)

参考文献:

[1] 吴普特,朱德兰,汪有科. 涌泉根灌技术研究与应用[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):354-368.

[2] Hanson B, May D. Effect of subsurface drip irrigation on processing tomato yield, water table depth, soil salinity, and profitability [J]. Agricultural Water Management, 2004,68(1):1-17.

[3] 汪有科,黎朋红,马理辉,等. 涌泉根灌在黄土地的水分运移规律试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(5):449-454.

[4] 费良军,曹俊,聂卫波. 涌泉根灌土壤湿润体特性试验[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(3):260-265.

[5] 黎朋红,汪有科,马理辉,等. 涌泉根灌湿润体特征值变化规律研究[J]. 水土保持学报,2009,23(6):190-194.

[6] 李耀刚,王文娥,胡笑涛. 基于 HYDRUS-3D 的涌泉根灌土壤入渗数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2013,31

(6):546-552.

[7] 牛文全,樊晓康,赵晓波,等. 初始含水率对涌泉根灌均质土壤水分扩散的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):491-496.

[8] 吴恒卿,黄强,魏群. 涌泉根灌双点源交汇入渗湿润体试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(5):201-207.

[9] 张智韬,吴普特,陈俊英,等. 涌泉根灌土壤湿润体运移模型[J]. 排灌机械工程学报,2013,31(2):173-179.

[10] 费良军,傅渝亮,何振嘉,等. 涌泉根灌肥液入渗水氮运移特性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(6):121-129.

[11] 董玉云,费良军,穆红文. 施肥方式对膜孔点源入渗尿素转化特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2012,30(1):8-12.

[12] 董玉云,郭小雷,费良军,等. 膜孔灌条件下不同氮肥施用后的转化特性研究[J]. 华北农学报,2013,28(5):194-197.