

再生水灌溉对冬小麦根冠发育及产量的影响

马福生, 刘洪禄*, 吴文勇, 郝仲勇, 许翠平, 马志军

(北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要: 以冬小麦为研究对象, 研究了再生水灌溉对冬小麦株高、叶面积、根系发育和产量的影响, 试验设置清水处理 1 (T1)、再生水处理 2 (T2)、先用再生水后用清水的处理 3 (T3) 和先用清水后用再生水的处理 4 (T4), 结果表明: 在 $p=0.05$ 时, T1、T2 和 T4 间拔节期后的冬小麦株高和单株总叶面积无显著性差异。收获时不同处理冬小麦的根长密度、根重密度和单位体积土壤内的根表面积均随着土层深度的增加而减小, 在 $p=0.05$ 时, 1 m 深土层内不同处理间的上述指标无显著性差异。再生水灌溉并未影响收获时冬小麦根系的主要分布深度, 各处理 0~70 cm 土层范围内根系占根系总量的 95% 左右, 且 0~20 cm 土层是冬小麦根系的主要分布层。冬小麦产量受到灌水量、灌水水质状况等多种因素的共同影响, 除 2001~2002 年再生水比清水处理增产 22.3% 外, 其余试验结果均表明, 再生水灌溉对冬小麦产量无显著性影响。

关键词: 再生水; 北京; 灌溉; 冬小麦; 根系

中图分类号: S273.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2008)-2-0057-07

马福生, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生水灌溉对冬小麦根冠发育及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 57-63.
Ma Fusheng, Liu Honglu, Wu Wenyong, et al. Effects of irrigation with reclaimed water on root system and yield of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(2): 57-63. (in Chinese with English abstract)

0 引言

再生水回用于农业灌溉已经成为世界上许多国家缓解水资源紧缺的成功举措之一^[1]。回用过程中, 其灌溉安全性始终是国内外管理、科研及生产者共同关注的焦点, 围绕再生水灌溉中可能存在的问题, 国内外科研工作者针对持久性有机污染物、病原微生物、生态风险以及对土壤、地表水、地下水、作物等生态环境因子的影响进行了大量研究, 取得了丰硕的研究成果^[2-7]。在各项生态环境因子中, 农作物是其重要组成部分, 为人类提供必要食物的同时, 发挥着重要的生态功能^[8], 因此, 再生水灌溉对农作物的影响成为再生水回用领域的热点问题, 其中国内的主要研究内容包括再生水灌溉对土壤-作物系统中重金属分布的影响^[9], 对种子萌发及幼苗生长的影响^[10]、对土壤理化性质的影响^[11, 12]以及对籽粒品质的影响^[13-15]。相对于国内而言, 国外在再生水灌溉对农作物的影响研究方面起步较早, 研究成果较为系统, 研究内

容往往同时包含再生水灌溉对农作物生长、产量形成、土壤环境质量、土壤水分分布以及籽粒或果实品质的影响, 并深入到机理研究^[16-21]。

综上所述, 目前针对再生水灌溉对大田作物根系发育影响的研究成果还少见报道, 而根系是支撑作物地上部生长、吸收营养成分、将土壤作物系统联为整体的重要功能性器官。2005 年北京市主要农作物中, 粮食作物的播种面积位居第一, 占主要农作物播种面积的 60.4%^[22], 本文针对北京市粮食作物面积大, 且再生水灌溉对作物根系研究薄弱的现状, 开展了再生水灌溉对北京地区冬小麦根冠发育影响的试验研究, 以期丰富再生水灌溉研究的理论体系、保障再生水灌溉的安全利用提供可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 基本情况与试验设计

本试验在位于北京市通州区永乐店镇的北京市节水灌溉中心试验站内的试验测坑中进行, 该试验站位于北纬 39° 20', 东经 114° 20', 海拔 12 m。多年平均降雨量 565 mm, 多年平均水面蒸发量 1140 mm, 多年平均气温 11.5℃, 无霜期 185 天。供试测坑均为无底测坑, 且规格统一, 长×宽为 3 m×2 m, 测坑周边用 1 m 深土工膜隔离, 消除土壤水分侧向流动的影响, 均为粉壤土。当地地下水埋深 8 m 左右, 因此地下水补给可忽略不计。

试验期为 2000 年 9 月末~2006 年 6 月中旬, 为探讨

收稿日期: 2007-02-26 修订日期: 2007-08-28

基金项目: 北京市“十一五”重大科技攻关课题 (D0706007040291), 国家“863”计划项目 (2006AA100205)

作者简介: 马福生 (1980-), 内蒙宁城人, 工程师, 主要从事再生水、农业节水方面的研究。北京市海淀区车公庄西路 21 号 北京市水利科学研究所, 100044。Email: mafusheng88@126.com

※通讯作者: 刘洪禄 (1963-), 辽宁营口人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事农业节水、再生水灌溉利用技术研究, 北京市海淀区车公庄西路 21 号 北京市水利科学研究所, 100044。

Email: liuhonglu@yeah.net

多年再生水灌溉土壤种植条件下,冬小麦根系对再生水灌溉的响应效果,将试验设置 4 个处理,分别是清水灌溉处理 1 (T1)、再生水灌溉处理 2 (T2)、再生水灌溉 3 年后用清水灌溉 3 年的处理 3 (T3)和清水灌溉 3 年后用再生水灌溉 3 年的处理 4 (T4),每个处理重复 3 次,试验小区随机排列。同时,本文还逐年探讨了再生水灌溉对冬小麦产量的影响。试验所用再生水水源为高碑店污水处理厂的二级出水,清水取自当地地下水。供试测坑每年种植冬小麦和夏玉米两茬作物,试验期间共种植了 6 茬冬小麦(生育期为第一年的 9 月末~次年的 6 月中旬)和 5 茬夏玉米(生育期为每年的 6 月中旬~9 月末)。每年灌溉制度根据当地农作习惯制定,各处理历年冬小麦的灌溉和降雨情况如表 1 所示。2000~2004 年灌水定额为 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,2004~2006 年灌水定额为 $600 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。2004~2005 年种植小麦品种为“轮选 987”,底肥施用复合肥 $750 \text{ kg}/\text{hm}^2$,拔节期追施尿素 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2$;2005~2006 年种植小麦品种仍然为“轮选 987”,底肥施复合肥 $375 \text{ kg}/\text{hm}^2$,拔节期追施尿素 $375 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。处理间除灌水类型不同外,其余管理措施均相同。

表 1 试验期间各处理冬小麦的灌溉及降雨情况

Table 1 Irrigation and precipitation for all treatments during experiment

年份	各处理冬小麦灌水情况					生育期 降雨量 /mm
	T1	T2	T3	T4	灌水时间	
2000~2001	Q5	Z5	Z5	Q5	播种期,越冬期,返青期,拔节期,灌浆期	83.6
2001~2002	Q5	Q1,Z4	Q1,Z4	Q5	播种期,越冬期,返青期,拔节期,灌浆期	158.0
2002~2003	Q5	Z5	Z5	Q5	播种期,越冬期,返青期,拔节期,灌浆期	156.0
2003~2004	Q3	Z3	Q3	Z3	越冬期,返青期,灌浆期	218.2
2004~2005	Q4	Z4	Q4	Z4	越冬期,返青期,拔节期,灌浆期	161.9
2005~2006	Q4	Z4	Q4	Z4	播种期,越冬期,拔节期,灌浆期	97.4

注:Z、Q 表示灌水类型,其中 Z 表示再生水,Q 表示清水;Z、Q 后面的阿拉伯数字表示某类水的灌水次数。如:Z1 表示灌再生水 1 次,其他同。2001~2002 年试验 T2 和 T3 灌的一次清水均为播种时灌水。

1.2 试验观测项目及方法

1) 再生水水质:试验所用再生水为高碑店污水处理厂生产的二级出水,分别测定每次灌溉使用的再生水水质,测定指标包括全盐(TDS)、悬浮物(SS)、 BOD_5 、 COD_{Cr} 、总磷(TP)、总氮(TN)和 pH 值。试验用水水质状况如表 2 所示。

2) 小麦根系:于 2006 年 6 月 17 日(小麦收获日)用根钻分别对行上和行间的小麦根系进行取样。供试小麦采用密植行作,行上指小麦植株的正下方,行间指两行

表 2 冬小麦灌溉用水水质状况

Table 2 Quality of water used for irrigation during experiment

类型	项目						
	TDS	SS	BOD_5	COD_{Cr}	TP	TN	pH
清水	760	未检出	0.28	3.2	0.039	8.45	8.18
再生水	880	未检出	0.91	39.2	4.20	32.0	7.69

小麦中间。根钻钻筒内径 7 cm,筒高 10 cm,钻杆高 120 cm,自地表而下,每 10 cm 一层进行取样,取至地表以下 100 cm 深处,共计 10 层,取出的土柱直径为 7 cm,高 10 cm。将每个样品装入自封塑料袋内,进行分别标记,带回试验室后采用干筛法过 0.5 mm 的筛,拣取各层土柱中的所有根系。将拣取的根系带到试验室内,用 0.25 mm 的筛子冲洗干净,运用加拿大生产的 WinRHIZO-Reg-LA 根系分析系统对根系样品逐层扫描,用该系统配套软件分析得到根长、直径、表面积等参数值,扫描完成后,将根系置于牛皮纸信封内,在 70°C 下,将根系烘至恒重,用精度为 1/10000 的分析天平逐样称取根系干质量。根据根系扫描结果和烘干称重结果逐层计算小麦的根长密度、根重密度以及单位体积土壤内的根表面积。

3) 小麦株高、叶面积:根据试验区小麦的生长状况,分别按比例选取不同长势水平的小麦作为典型样株,采用塑料直尺或钢卷尺测定小麦的株高和叶面积,每小区选样 10 株。监测期自 2006 年 4 月 26 日起(小麦已进入拔节期)至 2006 年 6 月 1 日(小麦已进入灌浆成熟期)止,每隔 1~2 周测定一次。

4) 小麦产量:于小麦籽粒风干脱皮后,测定各处理小麦产量,折合为每公顷产量。

2 结果分析

2.1 再生水灌溉对冬小麦地上部发育的影响

于 2006 年 4 月 26 日、5 月 11 日、5 月 18 日和 6 月 1 日分别测定了处理 1 (T1)、处理 2 (T2) 和处理 4 (T4) 3 个处理冬小麦的株高和单株总叶面积,结果如表 3 所示。

表 3 T1、T2 和 T4 冬小麦株高和单株总叶面积

Table 3 Height and total leaf area of winter wheat for T1, T2 and T4

日期	株高/cm			单株总叶面积/ cm^2		
	T1	T2	T4	T1	T2	T4
2006-04-26	31.7	34.2	32.4	46.5	51.8	46.1
2006-05-11	57.4	59.2	59.3	57.6	64.0	58.2
2006-05-18	63.6	65.4	64.5	48.5	47.9	44.1
2006-06-01	63.2	68.0	66.7	30.6	35.5	29.3

叶片是冬小麦进行光合、蒸腾和呼吸作用的重要器官,叶片发育状况直接影响着小麦的水分利用效率。供

试冬小麦生长至 5 月中旬后进入孕穗期，此后，由于部分叶片出现不同程度的枯萎现象，导致单株总叶面积逐渐减小。运用平均值的成对二样本分析，对每个生育阶段测定的株高、单株总叶面积进行处理间的显著性检验。结果表明：4 次测定结果中，在 $p=0.05$ 时，各生育阶段各处理间冬小麦的株高、单株总叶面积均无显著性差异，即再生水灌溉对拔节期后冬小麦株高和叶面积无显著性影响。

2.2 再生水灌溉对冬小麦根系发育的影响

根系是作物吸收水肥等营养成分、支撑地上部的重要器官，本文研究了 4 种处理条件下冬小麦根系的发育状况，具体内容包括根长、根重、根表面积等指标的垂向空间分布变异特征。

2.2.1 再生水灌溉对冬小麦根系密度的影响

1) 再生水灌溉对冬小麦根长密度的影响

图 1 和图 2 分别分析了各处理冬小麦自地表而下 100 cm 深土层内的行间根长密度和行上根长密度的垂向变化特征。0~100 cm 深土层内各处理行间和行上根长密度均随着土壤深度的增加而减小，且在 0~30 cm 深土层内根长密度急剧减小，其中行间根长密度分别从 T1 的 3.015 cm/cm^3 减少到 0.625 cm/cm^3 ，从 T2 的 2.171 cm/cm^3 减少到 0.183 cm/cm^3 ，从 T3 的 2.079 cm/cm^3 减少到 0.679 cm/cm^3 ，从 T4 的 2.329 cm/cm^3 减少到 1.128 cm/cm^3 ；行上根长密度分别从 T1 的 4.176 cm/cm^3 、T2 的 5.639 cm/cm^3 、T3 的 3.904 cm/cm^3 和 T4 的 5.309 cm/cm^3 减少到 0.4 cm/cm^3 左右。此外，行上根长密度在 0~20 cm 深土壤中明显高于行间根长密度，行上与行间根长密度在 20~100 cm 深土壤中互有高低。显著性检验结果表明：在 $p=0.05$ 时，0~100 cm 深土层内，处理间冬小麦根长密度总体上无显著性差异，即再生水灌溉对收获时 1 m 深土层内冬小麦的根长密度总体上无显著性影响。

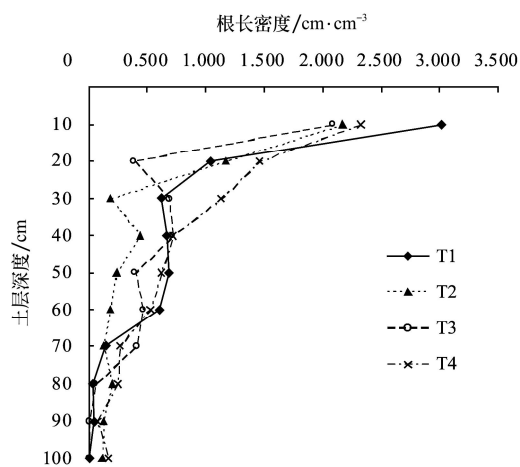


图 1 各处理行间根长密度垂向变化
Fig. 1 Vertical trend of root length density between lines for all treatments

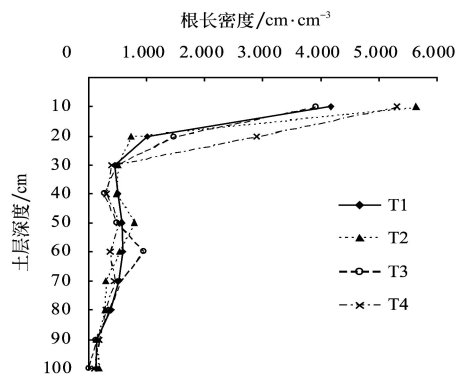


图 2 各处理行上根长密度垂向变化
Fig. 2 Vertical trend of root length density on lines for all treatments

2) 再生水灌溉对冬小麦根重密度的影响

图 3 和图 4 分别分析了各处理冬小麦自地表而下 100 cm 深土层内的行间根重密度和行上根重密度的垂向变化特征。可以看出，与根长密度一样，0~100 cm 深土层内各处理冬小麦行间和行上根重密度均随着土壤深度的增加而减小，根重密度在 0~20 cm 土层内减小迅速，20~100 cm 深土层内的根重密度减小幅度较缓。各处理 0~10 cm 深土层内的根重密度最大，行间根重密度分别为 T1 的 0.334 mg/cm^3 、T2 的 0.263 mg/cm^3 、T3 的 0.223 mg/cm^3 和 T4 的 0.246 mg/cm^3 ；该行上根重密度分别为 T1 的 1.774 mg/cm^3 、T2 的 1.439 mg/cm^3 、T3 的 1.790 mg/cm^3 和 T4 的 1.245 mg/cm^3 ，比相应的行间根重密度分别高出了 80% 左右。此外，仅在 0~20 cm 土层范围内行上根重密度明显高于行间，20~100 cm 深土层内差异不大。显著性检验结果表明：在 $p=0.05$ 时，各处理 1 m 深土层内冬小麦根重密度总体上无显著性差异，即再生水灌溉对收获时 1 m 深土层内冬小麦根重密度总体上无显著性影响。

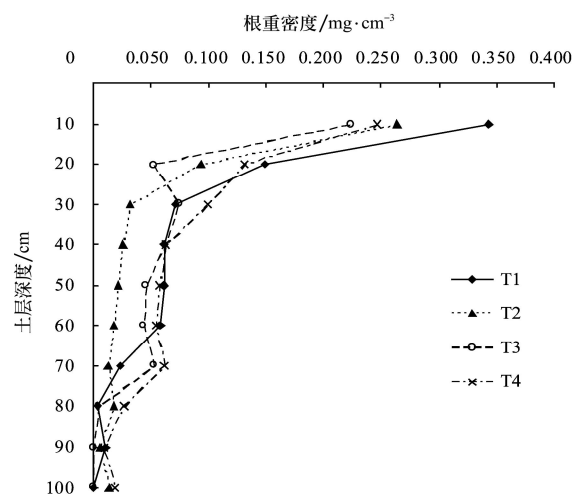


图 3 各处理行间根重密度垂向变化
Fig. 3 Vertical trend of root weight density between lines for all treatments

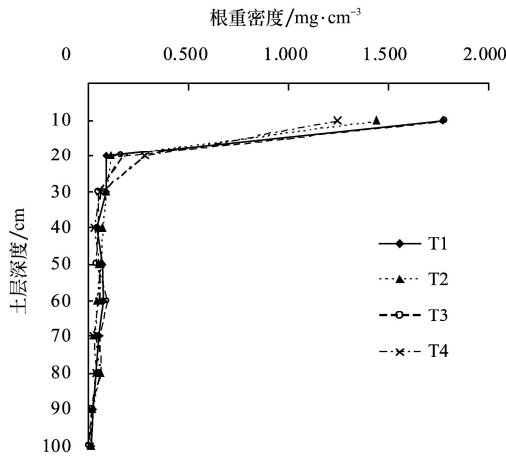


图 4 各处理行上根重密度垂向变化
Fig. 4 Vertical trend of root weight density on lines for all treatments

2.2.2 再生水灌溉对冬小麦根表面积的影响

本文还研究了各处理冬小麦自地表而下 100 cm 深土层内的行间和行上单位体积土壤内根表面积垂向变化特征。各处理单位体积土壤内的根表面积在垂直方向上的变化趋势总体上与行间根长密度和根重密度的变化趋势相同，均随着土层深度的增加而减小，0~30 cm 为根表面积的剧烈变化层，且行上与行间的差异较大，该土层内的行间单位体积土壤内的平均根表面积分别为 T1 的 0.119 cm²/cm³、T2 的 0.093 cm²/cm³、T3 的 0.083 cm²/cm³ 和 T4 的 0.114 cm²/cm³，约为各自行上单位体积土壤内根表面积的 50%左右；在 40~100 cm 深土层内，行上与行间的该项指标差异较小，该土层深度范围内的行间单位体积土壤内的平均根表面积分别为 T1 的 0.025 cm²/cm³、T2 的 0.019 cm²/cm³、T3 的 0.023 cm²/cm³ 和 T4 的 0.026 cm²/cm³，行上单位体积土壤内的平均根表面积分别为 T1 的 0.032 cm²/cm³、T2 的 0.028 cm²/cm³、T3 的 0.030 cm²/cm³ 和 T4 的 0.023 cm²/cm³。显著性检验结果表明：在 $p=0.05$ 时，0~100 cm 深土层内，各处理冬小麦行间和行上的单位体积土壤内的根表面积总体上无显著性差异，即再生水灌溉对收获时冬小麦 1 m 深土层内的根表面积总体上无显著性影响。

2.2.3 再生水灌溉对冬小麦主要根系分布深度的影响

根据以上分析，各处理间的冬小麦根长密度和根重密度并无显著性差异，为确定供试冬小麦根系的主要分布深度，将行间和行上相应各层的根长密度的平均值作为各层土壤中根系长度的代表值，分析逐层累积根长密度占 1 m 深土层的根长总密度的比例 (r_{li}) 的垂向变化趋势，结果如图 5 所示。将行间和行上相应各层的根重密度的平均值作为各层土壤中根系重量的代表值，分析逐层累积根重密度占 1 m 深土层的根重总密度 (r_{wi}) 的比例的垂向变化趋势，结果如图 6 所示。

其中 r_{li} 的计算方法如式 (1) 所示。

$$r_{li} = \rho_{li} / \rho_{lt} = \sum_{n=1}^i \rho_{ln} / \sum_{n=1}^{10} \rho_{ln} \quad (1)$$

式中 r_{li} ——第 0~ i 层土壤间累积根长密度占 1 m 深土层总根长密度的比例， $i=1,2,3,\dots,10$ ； ρ_{li} ——第 0~ i 层土壤的累积根长密度； ρ_{lt} ——1 m 深土层的总根长密度； ρ_{ln} ——第 n 层土壤行间根长密度与行上根长密度的平均值。

r_{wi} 的计算方法如式 (2) 所示。

$$r_{wi} = \rho_{wi} / \rho_{wt} = \sum_{n=1}^i \rho_{wn} / \sum_{n=1}^{10} \rho_{wn} \quad (2)$$

式中 r_{wi} ——第 0~ i 层土壤间累积根重密度占 1 m 深土层总根重密度的比例； ρ_{wi} ——第 0~ i 层土壤的累积根重密度； ρ_{wt} ——1 m 深土层的总根重密度； ρ_{wn} ——第 n 层土壤行间根重密度与行上根重密度的平均值。

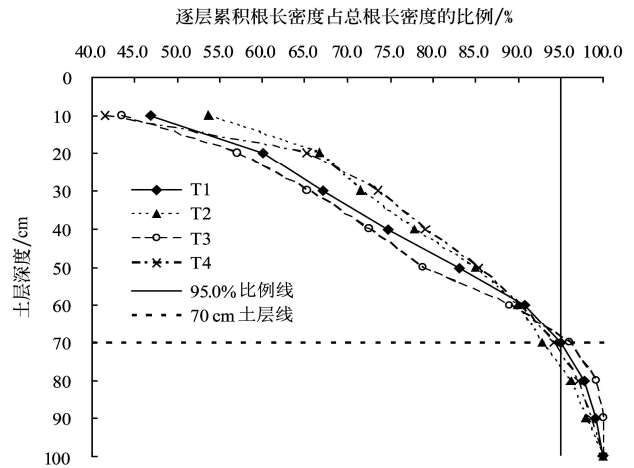


图 5 各处理逐层累积根长密度占 1 m 土层总根长密度的比例
Fig. 5 Vertical trend of cumulative root length density for all treatments

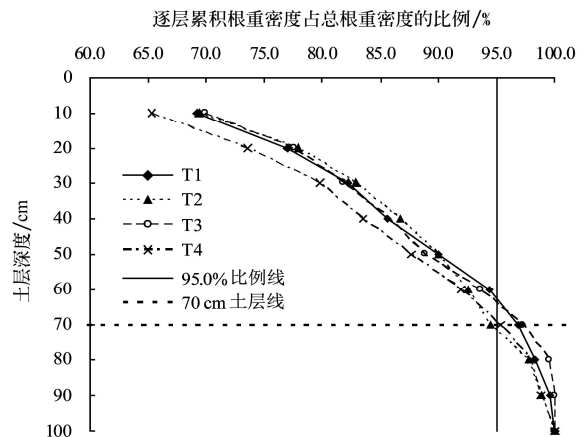


图 6 各处理逐层累积根重密度占 1 m 土层总根重密度的比例
Fig. 6 Vertical trend of cumulative root length density for all treatments

由图 5、图 6 可以看出, 0~20 cm 根系长度占 1 m 深土层内根系总长度的 60%左右, 而该层根系重量占 1 m 深土层内根系总重量的 78%左右, 因此该层为冬小麦根系的主要分布层。但无论根系长度或根系重量, 各处理 0~70 cm 土层范围内的累积根系量均占据 0~100 cm 深土层内根系总量的 95%左右。因此, 再生水灌溉并未影响收获时冬小麦主要根系的分布深度。

2.3 再生水灌溉对冬小麦产量的影响

本文根据 2000~2006 年的灌溉试验结果, 分析了 4 个处理不同年度的产量情况, 探讨了再生水灌溉对冬小麦产量的影响, 结果如表 4 所示。

2000~2001 年邵洪波等采用的供试污水是经污水处理厂处理后排到凉水河中的工业污水与部分生活污水的混合水, 采用 t-检验 (双样本等方差假设), 结果表明: 清、污灌溉产量差异不显著^[25], 从表 4 可以看出, 该年度各处理产量基本持平。2001~2002 年齐志明等设置了高水、中水和低水 3 个水平, 其再生水是高碑店污水处理厂

的二级出水, 结果表明, 相同水量和施肥条件下, 污灌小区产量平均高于对照小区 22.3%^[26], 该年度 T4 为清水灌溉, 其产量与 T1 基本持平, T2 和 T3 分别比 T1 增产 19.1% 和 24.2%。2003~2004 年巫常林等进行了冬小麦的再生水灌溉试验研究, 其再生水取自高碑店污水处理厂的二级出水, 结果表明, 随着再生水灌水量比例的增加, 冬小麦籽粒产量较明显增加。该季度试验用再生水中养分含量明显高于清水, 其中全氮和有机氮相差最大, 再生水中含量是清水的 100 倍, 总磷也相差了近 50 倍^[27], 该年度 T2 产量与 T1 持平, T3 和 T4 分别比 T1 增产 11.0% 和 45.5%。2004~2005 年和 2005~2006 年试验结果表明, 与清水灌溉处理相比较, 在 $p=0.05$ 时, 处理间冬小麦产量无显著性差异。2005~2006 年度冬小麦产量明显低于 2004~2005 年, 可能是 2005~2006 年度冬小麦底肥施用量较少 (为 2004~2005 年的 50%), 且供试冬小麦的追肥量明显低于当地农业生产中同期冬小麦的施肥量 (600~750 kg/hm²) 造成的。

表 4 不同处理条件下的冬小麦产量情况
Table 4 Winter wheat yield for all treatments

年份	T1		T2		T3		T4	
	产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	产量/kg·hm ⁻²	增产率/%	产量/kg·hm ⁻²	增产率/%
2000~2001 ^[25]	3339.0	3.2	3447.0*	3.2	3411.0*	2.2	3486.0	4.4
2001~2002 ^[26]	3263.3	19.1	3887.5	19.1	4054.0	24.2	3421.0	4.8
2003~2004 ^[27]	1666.8	0.5	1675.1	0.5	1850.1	11.0	2425.0	45.5
2004~2005	5522.5	-0.1	5516.9	-0.1	6308.6	14.2	5833.6	5.6
2005~2006	3705.7	12.9	4182.7	12.9	3748.5	1.2	4168.5	12.5

注: *表示为污水处理。

3 结论和讨论

作物的根冠发育是产量形成、籽粒品质、农田水文微循环过程以及生态功能发挥的重要影响因素, 开展再生水灌溉对作物根冠发育影响的研究具有重要的现实意义和理论价值。

1) 再生水灌溉对冬小麦生长的影响。本文中再生水灌溉对冬小麦株高和单株总叶面积均无显著性影响, 结果与北京市水利科学研究所承担的北京市科委项目“北京市再生水灌溉利用示范研究”的研究结果相同^[13]。可能是因为本文供试再生水是高碑店污水处理厂生产的二级出水, 经过处理后其水质明显好转, 且虽然再生水中的总氮、总磷含量均明显高于清水, 但因灌溉用水量较小, 因此与施肥量相比较, 由再生水带入土壤的 N、P 等营养成分含量远低于施肥量, 对冬小麦的生长并未产生显著影响。

2) 再生水灌溉对冬小麦根系的影响。本文研究结果表明, 0~70 cm 范围土层内的根系占 1 m 土层内冬小麦根系总量的 95%左右, 再生水灌溉对冬小麦的根长密度、

根重密度和单位体积土壤内的根表面积均无显著性影响。分析原因可能是由于再生水水质状况较好, 虽然其各项指标含量均高于清水, 但由于冬小麦生长过程中对各项输入元素的吸收, 再生水灌溉并未明显改变小麦计划湿润层内的土壤环境, 因此供试冬小麦的根系发育未受影响, 杨林林等通过室内土柱试验针对再生水灌溉对土壤理化性质的影响试验结果表明, 再生水灌溉对土壤次生盐碱化影响不显著^[12], 巫常林在本文的研究地点进行的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结果表明, 再生水灌溉对土壤中重金属的分布和累积无显著性影响^[9]。

3) 本文研究结果还表明, 0~20 cm 土层中供试冬小麦的根系长度占根系总长度的 68%左右, 而根系重量占根系总重量的 78%左右, 是主要根系分布层, 与马俊永^[23]和赵秉强^[24]的研究结果相同。

4) 本文还分析了冬小麦行上根系指标与行间根系指标间的差异, 结果表明 0~30 cm 土层范围内的行上根长密度和单位土壤体积内的根表面积均明显高于行间相应指标, 而 40~100 cm 范围内的上述两项指标在行上和行

间互有高低; 0~20 cm 土层范围内的行上根重密度明显高于行间根重密度, 20~100 cm 深土层内行上和行间根重密度差异变小, 因此用根钻进行密植行播冬小麦根系研究时, 有必要在行上和行间进行分别取样。

5) 再生水灌溉对冬小麦产量的影响。综合分析历年试验结果, 可以看出, 除 2001~2002 年再生水比清水处理增产 22.3% 外, 其余试验结果均表明, 再生水灌溉对冬小麦产量无显著性影响。万亮婷等研究表明, 再生水灌溉处理的冬小麦比清水处理增产 2.12%^[28]。亢连强等研究表明, 地下水埋深条件影响了冬小麦产量对再生水灌溉的响应^[29]。李康等研究表明, 再生水灌溉在一定程度上有利于冬小麦产量的提高, 特别是三级水灌溉对小麦的产量提高幅度较大, 二级水的增产幅度较小^[30]。分析上述研究成果, 可以看出再生水灌溉是否对冬小麦产量具有显著性影响与灌溉用水的水质状况、灌溉制度、地下水等环境状况、施肥状况和污水的处理水平等多种因素紧密相关。因此, 再生水灌溉对冬小麦产量的影响机理机制还需深入研究。

综上所述, 再生水对冬小麦生长及产量的影响研究涉及到水文、气象、农田水利、生态、土壤、植物生理等众多领域, 且再生水灌溉对冬小麦生长和产量的影响受到施肥量、灌水量、水质状况、灌水次数、土壤状况和降雨量等众多因素的影响, 因此其综合作用机理有待于进一步深入研究; 尤其从光合、蒸腾、气孔活动等水分生理因子对再生水灌溉响应的角度, 有待于深入研究和揭示再生水灌溉对冬小麦生长以及光合产物生成及分配的影响机制。本文仅探讨了收获时冬小麦根系分布对再生水灌溉的响应, 其他生育阶段的根系发育特征对再生水灌溉的响应效果有待于深入研究。此外, 应该加强再生水灌溉对冬小麦品质的影响研究, 把地下水—土壤—植物作为整体, 从系统的角度进行全面研究; 加强流域宏观再生水利用研究力度, 最终为再生水安全回用提供充分可靠的科学依据。

致谢: 感谢北京市“十一五”重大科技攻关课题 (D0706007040291) 和国家“863”计划项目 (2006AA100205) 的资助。感谢北京市水利科学研究所水资源研究中心师彦武及北京市水利科学研究所永乐店节水灌溉试验站有关工作人员, 中国农业大学水利与土木工程学院研究生孙维红、徐义军对本文试验所给予的大力支持与帮助。

[参 考 文 献]

- [1] 汪秀丽. 国外城市污水的再生利用[J]. 水利水电科技, 2005, 31 (1): 41—48.
- [2] Shapir N, Mandelbaum R T, Fine P. Atrazine mineralization by indigenous and introduced *Pseudomonas* sp. strain ADP in sand irrigated with municipal wastewater and amended with composted sludge[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32 (7): 887—897.
- [3] Ali-Shtayeh M S, Jamous Rana M F, Abu-Ghdeib S I. Ecology of cycloheximide-resistant fungi in field soils receiving raw city wastewater or normal irrigation water[J]. *Mycopathologia*, 1999, 144 (1): 39—55.
- [4] Fine P, Halperin R, Hadas E. Economic considerations for wastewater upgrading alternatives: An Israeli test case[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 78 (2): 163—169.
- [5] Bhati M, Singh G. Growth and mineral accumulation in *Eucalyptus camaldulensis* seedlings irrigated with mixed industrial effluents[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 88 (3): 221—228.
- [6] Annandale J G, Jovanovic N Z, Pretorius J J B, et al. Gypsiferous mine water use in irrigation on rehabilitated open-cast mine land: crop production, soil water and salt balance[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17 (2/3): 153—164.
- [7] Alvarez-Bernal D, Contreras-Ramos S M, Trujillo-Tapia N, et al. Dendrooven. Effect of tanneries wastewater on chemical and biological soil characteristics[J]. *Applied Soil Ecology*, 2006, 33 (3): 269—277.
- [8] 杨志新, 郑大玮, 文 化. 北京郊区农田生态系统服务功能价值的评估研究[J]. *自然资源学报*, 2005, 20 (4): 564—571.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 李玉明, 程 波, 张 泽, 等. 城市再生水灌溉对农田环境的影响评价研究[J]. *华农业环境科学学报*, 2006, 25 (增刊): 550—555.
- [13] 刘洪禄, 吴文勇, 郝仲勇, 等. 北京市再生水灌溉利用示范研究技术报告 (验收材料) [R]. 2005.
- [14] 韩 冰. 白银市污水灌溉对农田环境及小麦产量质量的影响研究[J]. *甘肃农业科技*, 1999, (6): 46—47.
- [15] 董克虞, 杨春惠, 林春野. 北京市污水农业利用区划研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [16] Smith C J, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in soil following irrigation with treated urban effluent in Australia[J]. *Environmental Pollution*, 1996, 94 (3): 317—323.
- [17] Wang Z, Chang A C, Wu L, et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland[J]. *Geoderma*, 2003, 114 (3): 261—278.

- [18] Paranychianakis N V, Aggelides S, Angelakis A N. Influence of rootstock, irrigation level and recycled water on growth and yield of Soultanina grapevines [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 69 (1): 13-27.
- [19] Parameswaran M. Urban wastewater use in plant biomass production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, 27 (1): 39-56.
- [20] Thwaites L A, de Rooij G H, Salzman S, et al. Near-surface distributions of soil water and water repellency under three effluent irrigation schemes in a blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantation[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86 (1/2): 212-219.
- [21] Al-Nakshabandi G A, Saqqar M M, Shatanawi M R, et al. Some environmental problems associated with the use of treated wastewater for irrigation in Jordan[J]. *Agricultural Water Management*, 1997, 34 (1): 81-94.
- [22] 北京市统计局. 北京统计年鉴2006[M]. 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [23] 马俊永, 李志宏, 冯洪恩, 等. 利用小麦根密集层土壤水分估测土体含水量[J]. *节水灌溉*, 2004 (4): 13-15.
- [24] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 等. 间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9 (2): 214-219.
- [25] 邵洪波. 污水灌溉条件下冬小麦生长及重金属分布规律的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [26] 齐志明. 清、污水灌溉对重金属分布及作物生长影响的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2003.
- [27] 巫常林. 再生水灌溉对土壤-作物系统影响得试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [28] 万亮婷, 齐学斌. 污水灌溉对冬小麦产量及其品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25 (5): 99-103.
- [29] 亢连强, 齐学斌, 马耀光, 等. 不同地下水埋深条件下再生水灌溉对冬小麦生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23 (6): 95-100.
- [30] 李康. 再生水灌溉对冬小麦生产的安全性影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.

Effects of irrigation with reclaimed water on root system and yield of winter wheat

Ma Fusheng, Liu Honglu^{*}, Wu Wenyong, Hao Zhongyong, Xu Cuiping, Ma Zhijun

(Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: The effects of irrigation with reclaimed water on height, root and yield of winter wheat were studied in this paper. Treatments included continuous irrigation with normal water(T1), continuous irrigation with reclaimed water(T2), irrigation with reclaimed water from Oct, 2000 to Oct, 2003 then irrigation with normal water from Oct, 2003 to Jun, 2006(T3) and irrigation with normal water from Oct, 2000 to Oct, 2003 then irrigation with reclaimed water from Oct, 2003 to Jun, 2006(T4). Experimental results illustrated that the height and total leaf area for per plant had no significant difference between treatments. The root length, root weight and root surface area in unite volume soil all decreased with the increase of soil depth for all treatments, and above indexes had no significant difference between treatments in the extent of 0~100 cm soil($p=0.05$). Irrigation with reclaimed water did not influence the depth of main root, the root distributed in 0~20 cm soil mainly and the root quantity in 0~70 cm soil was the 95 percent of total root quantity. According to experimental results during 2000~2006, treatments that irrigated with reclaimed water had no significant influence on the yield of winter wheat except the experiment during 2001~2002. Compared with the treatment that irrigated with local ground water, the yield of winter wheat was increased by irrigation with reclaimed water about 22.3% during 2001~2002.

Key words: reclaimed water; Beijing; irrigation; winter wheat; root