

# 再生水灌溉对冬小麦生长和产量的影响

居焯, 李康, 姜帅

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所//农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081

摘要: 随着我国污水处理技术的发展, 再生水生产能力得到了明显地提高, 实现再生水农业安全利用, 将开辟农业用水新途径。以冬小麦(*Triticum aestivum*)为对象, 通过盆栽试验, 研究了不同程度处理的再生水(二级再生水、三级再生水)对冬小麦生长和产量的影响。结果表明: 再生水灌溉能显著提高冬小麦的株高、叶面积、叶绿素含量, 但开花前对光合作用的改善不显著。再生水灌溉处理的冬小麦超氧化物歧化酶(SOD)活性整体提高, 尤其是越冬阶段, 叶片 SOD 活性较对照处理提高了 15%, 抽穗后作用减弱, 各处理间的过氧化物酶(POD)活性差异不明显。以再生水灌溉的盆栽小麦产量和对照相比没有明显差异, 再生水灌溉可以实现正常的产量水平。

关键词: 再生水, 冬小麦, 灌溉, 生长, 产量

中图分类号: S273.5; S513

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 10-2376-05

我国是世界上 12 个严重缺水国之一, 水资源人均占有量只有世界人均量的 1/4, 而随着工农业生产的发展和人口的增加, 水资源短缺问题变得越来越突出<sup>[1]</sup>。再生水是污水经过处理后可在一定范围内重复使用的非饮用水, 随着我国污水处理技术的发展, 再生水生产能力得到了明显地提高<sup>[2-3]</sup>。以北京为例, 2010 年北京城市污水处理能力预估可达到  $360 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ , 每年可增加再生水资源  $12 \times 10^8 \text{ m}^3$  左右<sup>[4-5]</sup>。与污水处理能力相比, 再生水回用率还相对较低, 北京目前的再生水回用率也仅有 20%~30%, 且大多局限在工业回用和景观回用<sup>[6-7]</sup>。

农业是主要的用水部门, 其用水量占全国总用水量的 65%, 其中 90%以上用于农田灌溉<sup>[8-9]</sup>, 如果能实现再生水农业的安全回用, 不仅可缓解水资源短缺的局面, 而且对社会可持续发展也有重要的意义。冬小麦(*Triticum aestivum*)是我国北方主要的粮食作物, 由于生长季和雨季不同步, 主要依靠灌溉取得丰产<sup>[10]</sup>。因此, 研究再生水对冬小麦生长和产量的影响, 明确小麦灌溉利用再生水的可能性, 对稳定北方粮食生产, 提高再生水回用率都具有一定的参考作用<sup>[11]</sup>。

## 1 研究方法

### 1.1 试验方法

试验于 2004 年 10 月—2006 年 6 月在中国农业科学院北京试验站进行, 冬小麦品种为中麦 9508。试验设 3 个处理, 分别为对照清水灌溉(F)、二级再生水灌溉(S)、三级再生水灌溉(T), 由于生育期采样需要, 每个处理共设 9 个重复, 对照清水为自来水, 二级再生水和三级再生水取自北京市东郊污水

处理厂, 水质基本情况如表 1, 其中二级再生水中铅质量浓度略高于农田灌溉水质标准。

表 1 试验灌溉用水的基本状况  
Table 1 The background quality of irrigation water used in the experiment

处理	$\rho(\text{BOD}_5)/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{COD})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{SS})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	pH	$\rho(\text{Cl}^-)/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{铅})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\rho(\text{镉})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
对照清水(F)	-	2	4	6.0~8.5	100	-	-
三级再生水(T)	5.85	23.8	5.55	7.5~8.4	143	-	-
二级再生水(S)	9.25	38.1	12.2	7.8~8.2	133	0.31	0.01
农田灌溉	<80	<180	<90	5.5~8.5	<350	<0.2	<0.01
水质标准							

供试土壤为褐土, 土壤肥力较好, 基本状况见表 2。试验盆钵为聚乙烯塑料桶, 规格 40 cm×30 cm( $\Phi \times h$ ), 土壤经 1 cm 孔径过筛, 每盆装土 12 kg, 施鸡粪 40 g·盆<sup>-1</sup>, 复合肥 20 g·盆<sup>-1</sup>(全 N 20%; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 10%; K<sub>2</sub>O 20%), 草碳 0.8 kg·盆<sup>-1</sup>, 混匀后装盆, 小麦出苗后每盆定苗 7 株。用称质量法控制浇水量, 使各处理土壤水分质量是保持田间最大持水量的 70%。

表 2 盆栽土壤的养分基本状况  
Table 2 The background quality of soil for pot planting

$W(\text{有机质})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$W(\text{水解 N})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )	$W(\text{速效 K})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$W(\text{速效 P})/$ ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$W(\text{田间持水})/\%$	土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
32.8	79.8	115.4	91.1	26.35	1.32

### 1.2 测定项目

超氧化物歧化酶(SOD)/过氧化物酶(POD)活性: 比色法测定, 通过冰浴研磨成匀浆, 用 20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2007BAC03A06); 北京市排水集团专项(200604)

作者简介: 居焯(1970年生), 研究员, 博士, 从事农业节水及气候变化影响研究。E-mail: juhui@cjac.org.cn

收稿日期: 2010-09-07

mmol·L<sup>-1</sup>的KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>溶液作为酶提取液,于分光光度计470 nm波长下测定OD值。

光合速率和叶绿素:Li-6400光合仪测定光合速率( $P_n$ ,  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ );SPAD-502型叶绿素仪测定最上一片完全展开叶的叶绿素相对含量。

试验数据经SAS统计软件分析,采用单因素方差分析方法,数据做LSD测验,选用5%的统计显著水平。

## 2 结果分析

### 2.1 对冬小麦株高、叶面积的影响

株高、叶面积指标能够反映冬小麦生长状况。从不同处理的小麦株高变化来看,拔节期对照处理要高于二级再生水处理与三级再生水处理,而拔节期后再生水灌溉的促进作用逐渐显现,抽穗期、开花期、成熟期,二级再生水处理比对照处理分别提高了2.18%、2.52%和3.92%,三级再生水处理分别提高了5.56%、4.68%和6.06%,这表明再生水灌溉在一定程度上能够促进作物的生长,尤其生育后期表现明显,且三级再生水对小麦株高的影响优于二级再生水(图1a)。

叶片不仅是作物重要的光合器官,而且它的大小对构建合理的群体形态结构也具有重要作用。由图1b可见,在不同生育期,再生水处理对小麦叶面积的影响没有表现出相对一致的规律,二级再生水处理在拔节期、抽穗期、成熟期相对较高,分别较对照高出4.7%、22.7%和23.8%,三级再生水灌溉在孕穗期、灌浆期相对较高,分别较对照高出9.4%和18.3%。分析认为,再生水对小麦叶面积具有一定的促进作用,且在生育后期表现更明显。

### 2.2 对冬小麦叶绿素含量的影响

再生水灌溉对小麦叶绿素含量有一定的影响。从拔节期的叶绿素测定结果来看,再生水处理提高

了小麦最上一片展开叶的叶绿素含量,其中二级再生水处理比对照处理提高了6.70%,三级再生水处理提高了16.75%;至抽穗期,二级再生水处理提高了9.29%,三级再生水处理提高了11.91%,拔节期和抽穗期再生水处理叶片的叶绿素含量与对照处理存在显著差异。到小麦开花和灌浆期的测定结果表明,开花期二级再生水、三级再生水处理较对照分别高了3.16%和4.09%,灌浆期分别高1.88%和5.31%,但处理间叶绿素含量差异减小,统计上无显著差异。分析认为,在小麦拔节—开花期,再生水处理对叶绿素的促进效果更明显,开花后叶绿素含量逐渐稳定,再生水对叶绿素含量的促进作用逐渐减弱。

表3 冬小麦不同生育期叶绿素相对含量的比较  
Table 3 Chlorophyll relative content in leaves of winter wheat in different stage

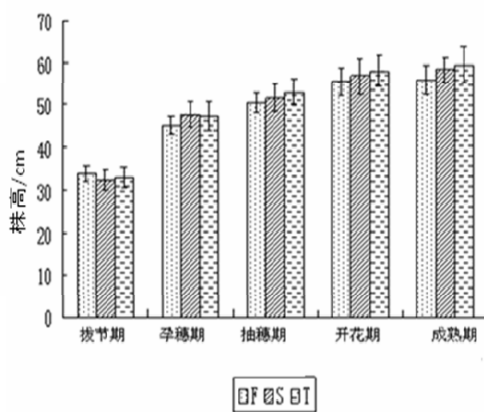
处理	拔节期	抽穗期	开花期	灌浆期
对照(F)	38.4±4.7c	51.9±3.3c	53.8±2.3a	58.4±4.4ab
二级再生水(S)	41.0±6.0bc	56.8±4.8abc	55.5±5.7a	59.5±2.9ab
三级再生水(T)	44.9±3.8b	58.1±2.6ab	56.0±6.3a	61.5±3.5a

表中数据由平均值±标准差表示,字母相同代表在5%显著水平下无差异

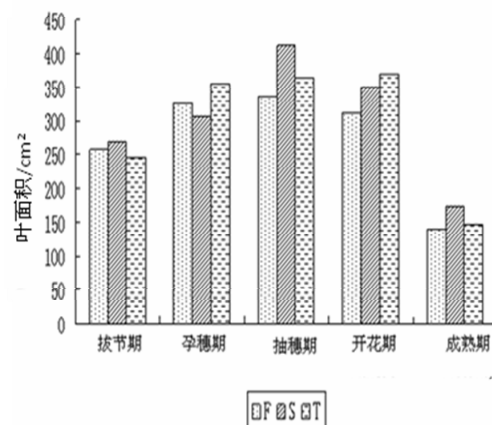
### 2.3 冬小麦光合速率日变化

光合作用是植物最基本的生理现象,是把无机物变为有机物的的重要途径。植物光合作用因植物种类而不同,并受外界因素如光照、温度、湿度等影响。

从冬小麦光合速率日变化来看(图2)在拔节期和抽穗期各处理日变化都呈双峰曲线,但抽穗期的光合峰值出现时间较拔节期延后约2h。拔节期各处理光合速率日变化整体趋势一致,3者光合速率的差异基本在1.10~2.30  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间,经统计



1a 再生水灌溉对冬小麦株高的影响(1a)



1b 再生水灌溉对冬小麦叶面积的影响(1b)

Fig. 1 Effects of reclaimed water irrigation on height (1a) and LA (1b) at different stage of winter wheat

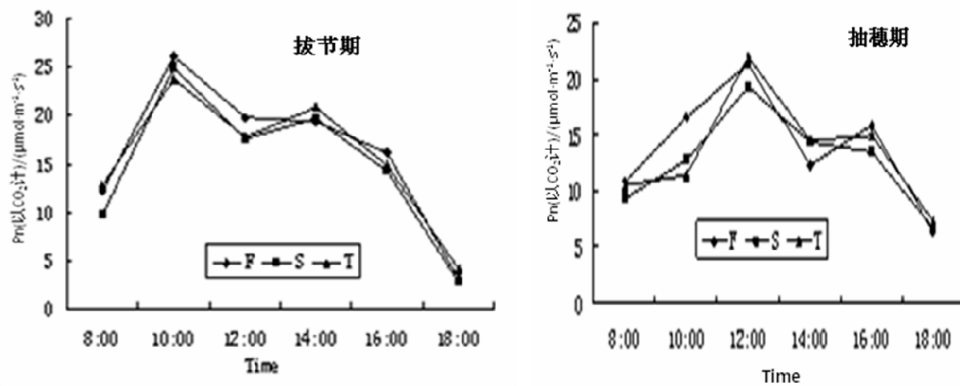


图 2 不同处理冬小麦拔节(左)/抽穗期(右)的光合速率日变化

Fig. 2 Diurnal photosynthesis rate change in elongation stage(left) and heading stage( right) of winter wheat

分析, 处理间差异不显著。抽穗期三级再生水处理光合速率明显高于其他处理, 光合速率最高为  $21.82 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 差异显著。由于本试验仅在拔节和抽穗期间进行了光合测定, 结果可以部分说明开花期前, 再生水处理的小麦在光合生理方面没有表现出明显的优势。

#### 2.4 对超氧化物歧化酶(SOD)/过氧化物酶(POD)的影响

在植物生长过程中, 体内的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)等能共同作用, 清除植物体内的有害自由基, 达到防御和保护的作用。3 种灌溉处理下, 小麦越冬—灌浆期间, SOD 活性三级再生水处理高于二级再生水处理, 二级再生水处理高于对照处理(图 3), 呈现出较强的规律性, 特别是在越冬阶段, 三级再生水处理比对照高出 16.44%, 二级再生水处理比对照高出 14.54%, 而到成熟期, 二级再生水处理的 SOD 活性较高。经方差分析, 越冬期和拔节期三级再生水处理和二级再生水处理间无显著差异, 但均高于对照处理, 且差异显著;

至抽穗期时, 3 者之间无显著差异; 灌浆期时又产生了差异, 三级再生水处理显著高于二级再生水处理, 二级再生水处理显著高于对照, 由此分析得出, 小麦整个生育期间, 再生水灌溉下的 SOD 活性保持在较高的水平, 说明再生水灌溉在植株体内还是有一定的作用, 激发了抗氧化酶系统活性的提高。

不同生育期 POD 活性变化不同。整体看来, 越冬期 POD 活性要显著高于其它生育期, 这主要是冬小麦在越冬期受到低温胁迫导致。不同处理间结果显示, 二级再生水处理在越冬期、拔节期、抽穗期较高, 在灌浆期和成熟期较低, 而三级再生水处理在越冬期和抽穗期较低, 但再生水灌溉下对冬小麦叶片 POD 活性的影响处理间差异不显著。

#### 2.5 对冬小麦产量的影响

不同的灌溉水量、水质、灌溉时期对小麦产量影响不同。由表 4 可知, 在小麦产量构成因子中, 再生水灌溉对千粒重影响较大, 对穗重和有效穗粒数的影响较小, 而对单株穗数基本没有影响。3 种处理间的小麦平均千粒重为  $44.82 \text{ g}$ , 对照处理最

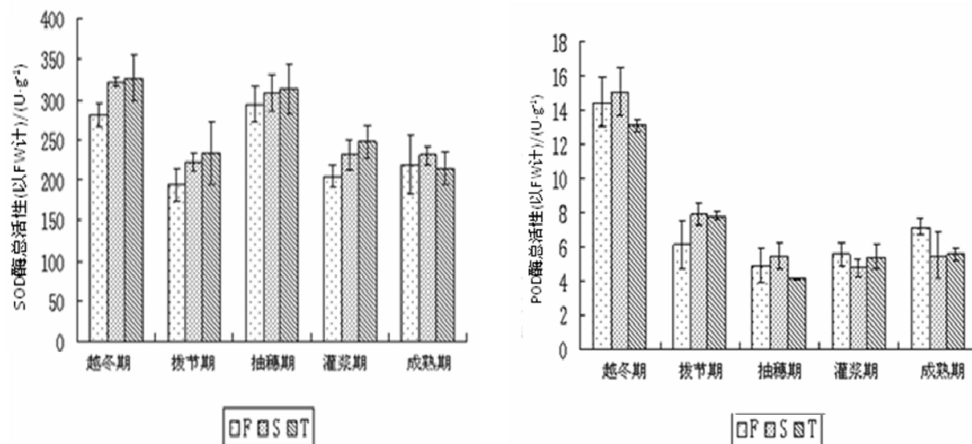


图 3 再生水灌溉下冬小麦不同生育期 SOD/POD 活性的比较

Fig. 3 SOD (left) and POD (right) content change at different stage of winter wheat with reclaimed water irrigation

表 4 盆栽试验冬小麦产量构成因素的影响  
Table 4 Effects on yield components of winter wheat with pot experiments

处理	主茎穗长/cm	穗质量/g	单株穗数/(穗·株 <sup>-1</sup> )	有效穗粒数/(粒·穗 <sup>-1</sup> )	千粒重/g	单株产量/(g·株 <sup>-1</sup> )
对照(F)	7.93±0.38 ab	2.26±0.46 b	3.50±0.91 a	39.20±5.87 a	43.61±0.38 d	5.98 a
二级再生水(S)	7.51±0.64 c	2.52±0.40 c	3.25±0.74 a	39.47±6.02 b	45.25±0.22 c	5.81 a
三级再生水(T)	7.76±0.36 abc	2.54±0.36 ab	3.43±0.84 a	39.73±4.38 a	45.60±0.52 c	6.21 a

低,平均为 43.61 g,二级再生水处理和三级再生水处理没有明显差异,基本都在 45 g 左右。从单株产量来看,三级再生水表现出一定的增产效果,增产达到 3.85%,而二级再生水产量则略有降低,3 种处理间的差异不显著。综合分析认为,再生水灌溉虽然没有明显的增产效果,但较对照基本不减产,可以保证实现正常的产量。

### 3 结论和讨论

华北是我国小麦主产区,且生长季和雨季交错,因此是主要的灌溉作物之一,实现再生水冬小麦安全回用,对于缓解用水矛盾具有一定的实践意义。本研究表明:再生水灌溉在小麦株高、叶面积、叶绿素含量上表现出一定的促进作用,但开花前的光合日变化上没有明显差异,产量的结果佐证了生理指标的变化,即再生水灌溉的小麦没有明显的增产效果,但可以保证不减产。以往对污水灌溉的盆栽试验表明,污水灌溉对冬小麦茎叶的生长发育有一定的促进作用,并能提高小麦产量,同时指出对冬小麦适量施用氮肥仍然很有必要<sup>[12-13]</sup>。相对而言,再生水含有营养物质要比污水少,一般二级再生水去除了废水中呈胶体和溶解状态的有机污染物,有机物的去除率可达 90%以上,出水中的 BOD<sub>5</sub> 和悬浮固体质量浓度均在 30 mg·L<sup>-1</sup> 以下,三级再生水较二级再生水进一步去除水中的氮、磷等营养物质、有机物和悬浮固体,这可能也是本研究中再生水增产效果不明显的原因之一。

以往污水的研究结果认为,污灌后小麦体内活性氧清除系统遭到破坏,根和叶的 POD、SOD 活性均大大降低,其中 SOD 对环境胁迫最敏感<sup>[14]</sup>。另有研究认为,在污灌逆境条件下,小麦根系出现一种适应性表现,短期胁迫可激活 SOD 活性,但随后 SOD 活性则迅速下降<sup>[15]</sup>。本研究表明,再生水中的杂质物质可以激发小麦自身的 SOD 酶活性,尤其生育前期的酶活性提高明显,后期逐渐减弱,而 POD 仅在越冬阶段有一定的升高,其他时期没有明显的变化,结果说明再生水灌溉还是激发了小麦自身的抗氧化酶防御系统,且 SOD 活性对逆境的敏感性高于 POD。综合评价认为,再生水灌溉可以促进冬小麦的生长,并可以实现正常的产量水平,如果在保证环境和食用安全的前提下,可以考

虑应用到生产中,具体的灌溉方式和灌溉水平还需要进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 师荣光, 刘凤枝, 赵玉杰, 等. 中国城市再生水安全回用农业的对策研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(8): 2355-2361.  
SHI Rongguang, LIU Fengzhi, ZHAO Yujie, et al. Research on safe utilization of reclaimed municipal wastewater in agriculture in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(8): 2355-2361.
- [2] 李晓娜, 刘桂英, 武菊英, 等. 再生水灌溉对禾本科牧草产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 81-83.  
LI Xiaona, LIU Guiying, WU Juying, et al. Effects of reclaimed water irrigation on yield and WUE of four gramineous grasses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2009, 28(6): 81-83.
- [3] 黄冠华, 杨建国, 黄权中. 污水灌溉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 Guanhua, YANG Jianguo, HUANG Quanzhong. 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.
- [4] 廖日红. 北京市再生水综合利用策略研究[J]. 水利发展研究, 2004, 1: 32-34.  
LIAO Rihong. Studies on the strategy of Beijing reclaimed water comprehensive use[J]. Water Resources Development Research, 2004, 1: 32-34.
- [5] 王殿芳, 谷庆宝, 韩梅, 等. 北京地区城市污水处理现状及污水排放对区域水环境的影响[J]. 北京石油化工学院学报, 2003, 11(3): 55-60.  
WANG Dianfang, GU Qingbao, HAN Mei, et al. Status of urban waste water treatment in Beijing area and impacts of sewage discharge on regional water environment[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2003, 11(3): 55-60.
- [6] 周军, 杜伟, 张静慧, 等. 北京市再生水行业的现状与发展[J]. 中国建设信息: 水工业市场, 2009, 9: 12-14.  
ZHOU Jun, DU Wei, ZHANG Jing-hui, GAN Yi-ping, et al. Current status and development of Beijing reclaimed water industry[J]. information of China construction: water-industry market, 2009, 9: 12-14.
- [7] 郭茹, 贾海峰, 井艳文, 等. 污水回用大势所趋: 关于北京市污水回用的思考[J]. 北京水利, 2001, 5: 42-44.  
GUO Ru, JIA Haifeng, JING Yanwen, et al. Discussion on waste water reuse in Beijing[J]. Beijing Water Resources, 2001, 5: 42-44.
- [8] 师荣光, 王德荣, 赵玉杰, 等. 城市再生水用于农田灌溉德水质控制指标[J]. 中国给水排水, 2006, 22(18): 100-104.  
SHI Rongguang, WANG Derong, ZHAO Yujie, et al. Water quality control indexes of reclaimed municipal waste water for farm land irri-

- gation[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(18): 100-104.
- [9] 李远华. 灌区高效用水. *中国农村水利水电*, 2003, 8: 19-22.  
LI Yuanhua. High efficiency water use in irrigation district[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2003, 8: 19-22.
- [10] 郭晓维, 赵春江, 康书江, 等. 水分对冬小麦形态、生理特性及产量的影响[J]. *华北农学报*, 2000, 15(4): 40-44.  
GUO Xiaowei, ZHAO Chunjiang, KANG Shujiang, et al. Effects of water treatments on the configuration, physiological characteristics and yield of winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreall, sinica*, 2000, 15(4): 40-44.
- [11] 刘洪禄, 马福生, 许翠平, 等. 再生水灌溉对冬小麦和夏玉米产量及品质的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 82-86.  
LIU Honglu, MA Fusheng, XU Cuiping, et al. Effect of irrigation with reclaimed water on quality and yield of winter wheat and summer corn[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(3): 82-86.
- [12] 冯绍元, 齐志明, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对冬小麦生长发育影响的田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(03): 11-14.  
FENG Shaoyuan, QI Zhiming, HUANG Guanhua, et al. Effects of fresh water and sewage irrigation on growth of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(03): 11-14.
- [13] 齐志明, 冯绍元, 黄冠华, 等. 清、污水灌溉对夏玉米生长影响的田间试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 36-39.  
QI Zhiming, FENG Shaoyuan, HUANG Guanhua, et al. Experimental study on effects of irrigation water quality on plant growth of summer corn[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(2): 36-39.
- [14] 刘登义, 王友保, 张徐祥, 等. 污灌对小麦幼苗生长及活性氧代谢的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1319-1322.  
LIU Dengyi, WANG Youbao, ZHANG Xuxiang, et al. Effect of sewage irrigation on wheat growth and its activate oxygen metabolism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(10): 1319-1322.
- [15] 张永清, 苗果园, 张定一. 污灌胁迫对春小麦抗氧化酶活性及根系与幼苗生长的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(4): 662-665.  
ZHANG Yongqing, MIAO Guoyuan, ZHANG Dingyi. Effect of stress from sewage irrigation on Antioxidant Enzymes activity and root and seedling growth of spring wheat[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(4): 662-665.

## Effects of reclaimed wastewater irrigation on winter-wheat growth and production

JU Hui, LI Kang, JIANG Shuai

Institute of Environment and Sustainable Development on Agriculture, CAAS//

Key Laboratory of Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China

**Abstract:** Reclaimed water production has been significantly enhanced with technology improvement in China. Safe utilization of reclaimed water will provide new pathway for agriculture water supply and benefit for society sustainable development. The research studies winter-wheat (*Triticum aestivum*) growth and production response to reclaimed water irrigation (Secondary effluent, Tertiary effluent) using pot treatments. The results show that irrigation with reclaimed water can significant increase the height, leaf area and chlorophyll content of winter wheat, especial during the reproduction period, but no much improvement on photosynthesis process before anthesis stage. The SOD antioxidase increase much compared with CK during the whole growth period, especial winter-growing period which SOD content is about 15% higher than CK, the SOD content gradually decreases after anthesis. POD anti-oxidase show no much change among treatments. Each plant yield has no much difference between reclaimed water irrigation and regular treatment.

**Key words:** reclaimed water; winter wheat; irrigation; growth; yield