

# 冬小麦再生水灌溉时水分与氮素利用效率的研究

黄冠华, 查贵锋, 冯绍元, 齐志明

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 农田水氮利用效率的研究可为农田灌溉和施肥提供相应的科学依据。该文用田间实验研究再生水灌溉条件下冬小麦水分与氮素的利用效率。田间试验设置了高、中、低 3 个不同灌水水平下的清水灌溉加施肥、再生水灌溉加施肥和再生水灌溉不施肥(仅施底肥)9 个处理, 试验结果表明: 灌水量、灌溉水质、施肥量对冬小麦株高的影响很小; 叶面积指数随灌水量的减少而减小; 再生水灌溉加施肥条件下的产量最高。不同灌溉水量条件下, 冬小麦再生水灌溉的耗水规律与清水灌溉的耗水规律十分接近, 且累积耗水量随灌溉水量的增大而增加; 水分利用效率与灌溉水质和施肥无关, 仅与灌水量有关, 且随灌溉水量的增加而减少。氮的利用效率受灌水量、灌溉水质、施肥量的影响较小。

**关键词:** 再生水灌溉; 需水规律; 水分利用效率; 氮利用效率

中图分类号: S273.5; S513

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0065-04

## 0 引言

水氮的利用效率研究是农田水肥管理的基础。再生水灌溉给农田带入了一定量的营养物质(如 N, P, K 和其它微量元素)、盐分和有机物质, 它们都可能在一定程度上影响土壤——植物系统氮的迁移转化特征。国外学者<sup>[1-4]</sup>对污水灌溉条件下的氮平衡、氮的利用率等方面进行一系列的研究工作, 目前我国的研究多为污水与再生水(经过二级处理的出水)灌溉的可行性, 以及对土壤、作物及环境的影响研究<sup>[5-9]</sup>, 对污水灌溉条件下草地需水特征与氮的利用、玉米的水氮利用等开展了一些初步研究工作<sup>[10-12]</sup>。本研究以冬小麦为对象, 以田间小区试验为手段, 研究不同再生水灌溉水平下, 冬小麦水分与氮的利用效率。

## 1 材料与方法

试验地点为北京市水利所农业节水中心试验站(位于北京市通州区永乐店)。试验地地处北京市污水排放区, 其土壤质地为壤土见文献<sup>[12]</sup>, 供试冬小麦品种为北京 8 号, 编号为 8866, 播种时间和收获时间分别为 2001 年 9 月 22 日和 2002 年 6 月 10 日。

### 1.1 试验处理

试验共设有 9 个处理, 分别为再生水高水灌溉(灌水量  $1\ 250\ m^3/hm^2$ )施肥处理( $500\ kg/hm^2$ ) (HME)、不施肥处理(HNE), 再生水中水灌溉(灌水量  $833\ 33\ m^3/hm^2$ )施肥处理(MME)、不施肥处理(MNE), 再生水低水灌溉(灌水量  $416\ 67\ m^3/hm^2$ )施肥处理(LME)、不施肥处理(LNE), 清水高水、中水、低水灌溉加施肥(HMT、MMT、LMT)。试验灌溉所用的清水为当地的地下水, 再生水为高碑店污水处理厂的二级处理出水。

水中的主要化学成分如表 1。

表 1 灌溉用清水与再生水的成分

Table 1 Chemical properties of secondary treated sewage effluent and fresh water used in experiments

化学成分/ $mg \cdot L^{-1}$	清水(井水)	再生水
pH 值	7.05	7.17
EC/ $\mu S \cdot cm^{-1}$	1112	1149
$K^+$	0.70	25.71
$Na^+$	85.39	119
$Ca^{2+}$	40.66	75.83
$Mg^{2+}$	23.95	25.52
P	0.12	0.82
B	0.01	0.01
$NH_4^+$	0.05	0.45
$NO_3^-$	1.28	9.01
SAR*	3.70	4.25

\* SAR= 钠吸附比。

灌水时间为底墒水(9 月 29 日)、越冬水(11 月 24 日)、返青拔节期(4 月 2 日)、抽雄期(5 月 16 日)和灌浆期(5 月 26 日), 灌水方式为地面灌溉。施肥为播前底肥  $500\ kg/hm^2$  复合肥(N, P, K 分别占 8%, 8%, 8%)、返青拔节期和抽雄期追施尿素为  $500\ kg/hm^2$  (含 N 46.7%), 施肥时间与灌水时间相同。灌溉时由再生水带入田间氮的量分别是高水  $33\ 62\ kg/hm^2$ 、中水  $23\ 55\ kg/hm^2$ 、低水  $13\ 69\ kg/hm^2$ 。每处理 2 个重复, 共有 18 个田间试验小区, 面积为  $2\ m \times 3\ m$ 。

### 1.2 试验观测

株高、叶面积指数: 每 20 d 测一次; 地上干物质质量: 将植株分为茎、叶、穗等 3 部分, 烘干(100~105 杀青 1 h 后维持 75 烘烤 24 h)后测其干质量; 作物产量: 包括籽粒产量、千粒重。植株氮: 采用硫酸过氧化氢消煮法测定。

土壤水分: 每个小区中央埋设有中子仪测管(长 2 m), 测定深度为 10、20、30、40、50、70、90、120、150、180 cm。此外在 5~10 小区中利用负压计(MW—2 型, 中国地质科学院水文地质研究所(河北正定)研制)测定土壤剖面基质势, 测定深度、负压计埋设深度同中子仪

收稿日期: 2003-01-16 修订日期: 2003-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(50279025); 中国—以色列农业合作研究基金项目(SIARF2001-05); 国家重点发展规划研究项目(G1999045706)资助

作者简介: 黄冠华, 博士, 教授, 中国农业大学东区 151 信箱 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083



测定。中子水分观测仪(CPN 503DR, Compell 公司)每5 d 观测一次,灌水前后、降雨前后各加测一次。负压计观测每天上午8:00 观测一次。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面积指数、株高与产量

不同处理冬小麦的叶面积指数随着灌水量的减少

具有减小的趋势,同一灌水水平下,叶面积指数大小依次为 $MT > ME > NE$ 。返青到拔节期(4月10日~5月13日)是冬小麦株高变化最大的时期出苗后225 d 左右株高达到或接近最大值(约为66 cm)。在相同的时间,不同处理冬小麦株高差异较小。说明在本试验条件下无论是灌水量、灌溉水质,还是施肥与否对冬小麦株高的影响较小,但对叶面积指数有一定的影响。

表2 不同处理小麦株高及叶面积指数的变化

Table 2 Leaf area index and plant height of winter wheat versus time

处理	日期/月-日									
	04-12		04-22		05-13		05-24		06-10	
	叶面积指数	株高/cm	叶面积指数	株高/cm	叶面积指数	株高/cm	叶面积指数	株高/cm	叶面积指数	株高/cm
清水灌溉 施肥	HMT	1.399	32.90	3.701	46.18	3.211	66.20	2.393	66.58	1.756
	MMT	1.227	31.63	3.371	50.50	3.044	67.50	2.579	65.84	1.841
	LMT	1.489	34.78	3.451	52.05	2.461	68.58	2.804	68.40	2.080
再生水灌溉 施肥	HME	1.932	34.95	4.426	53.72	4.619	63.47	3.992	68.35	2.654
	MME	1.305	36.23	3.724	50.86	3.010	62.30	2.581	67.84	1.772
	LME	1.258	34.30	2.229	52.60	2.385	56.98	1.630	60.39	1.625
再生水灌溉 不施肥	MNE	0.954	34.89	2.649	48.16	2.383	65.60	1.928	66.64	1.589
	HNE	1.341	29.73	2.742	51.34	2.835	58.60	1.935	62.65	1.746
	LNE	0.942	30.91	1.399	49.69	2.245	59.85	1.609	63.72	1.382

冬小麦的产量如图1所示,在同一灌水水平下,ME处理的产量最高,且远远高于MT和NE两种处理,MT处理的产量最低。从平均角度看,在同一灌溉水量下,ME处理的产量比MT处理的产量高18%左右,而NE处理的产量比MT处理的产量高5.8%。

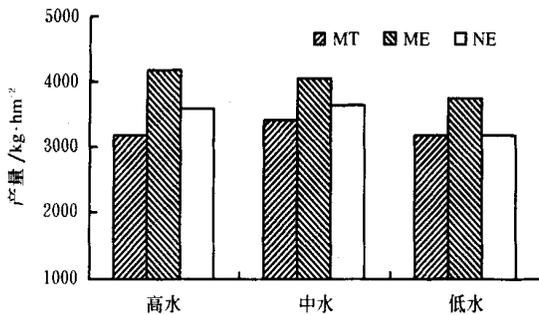


图1 不同灌水与施肥处理条件下冬小麦产量的比较

Fig. 1 Comparison of grain yield of winter wheat under different irrigation and fertilizer conditions

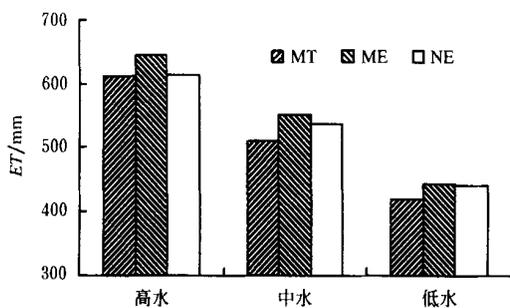


图2 不同灌水与施肥处理条件下冬小麦全生育期耗水量的比较

Fig. 2 Comparison of cumulative evapotranspiration of winter wheat under different irrigation and fertilizer conditions

### 2.2 需水特征

#### 2.2.1 全生育期耗水量

小麦全生育期内的耗水量如图2所示。从图中可以看出,冬小麦的耗水量受灌水量的影响很大,随着灌水量的减少,耗水量也大幅减少。高灌水、中灌水、低灌水之间的差异达到100~200 mm;灌水水质和施肥对耗水量的影响较小。

#### 2.2.2 水分利用效率

表3列出了不同处理的累计耗水量、地上部分干物质量 $Y_d$ (包括茎、叶、穗)、籽粒产量 $Y$ 、以 $Y_d$ 和 $Y$ 为基础的水分利用效率 $Y_d/ET$ 和 $Y/ET$ 。从表中可以看出,冬小麦耗水量随灌溉水量的增加而增加,不同灌水处理的地上部分干物质量遵循中灌水处理>高灌水处理>低灌水处理。在相同的灌水量条件下,不同施肥与灌水水质水分利用效率 $Y/ET$ 、 $Y_d/ET$ 都十分接近,但水分利用效率 $Y/ET$ 、 $Y_d/ET$ 随着灌水量的增加而降低,说明水分利用效率 $Y/ET$ 、 $Y_d/ET$ 与灌溉水质和施肥无关,仅与灌水量有关。

### 2.3 作物吸氮

#### 2.3.1 作物对氮的吸收

小麦全生育期内的吸氮量如图3所示。从图中可以看出,除再生水灌溉加施肥处理外,清水灌溉加施肥和再生水灌溉不施肥条件下,作物的吸氮量随着灌水量的减少而减少。但不同处理作物的吸氮量差异不明显。

表4是冬小麦总吸氮量在各部分器官的分布状况,从表中可以看出,单位质量的干物质中含氮量分布为籽粒>根>茎。不同处理同一器官单位重量的含氮量都非常接近,但施肥处理比不肥处理要略高。

表 3 不同处理产量与水利用效率

Table 3 Yield and water use efficiency of different treatments for winter wheat

处理	ET/mm	干物质产量 $Y_d$ /kg·hm <sup>-2</sup>	籽粒产量 $Y$ /kg·hm <sup>-2</sup>	水分利用效率 WUE	
				$Y_d/ET$ /kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup>	$Y/ET$ /kg·hm <sup>-2</sup> ·mm <sup>-1</sup>
HMT	610.73	16003.40	3186.00	26.20	5.22
MMT	510.38	16850.63	3420.67	33.02	6.70
LMT	419.60	15512.22	3183.00	36.97	7.59
HME	645.48	16092.19	4175.67	24.93	6.47
MME	550.07	16576.37	4054.33	30.13	7.37
LME	443.34	17072.69	3743.00	38.51	8.44
HNE	613.34	16546.45	3599.33	26.98	5.87
MNE	535.53	16524.19	3639.67	30.86	6.80
LNE	440.91	14258.50	3183.67	32.34	7.22

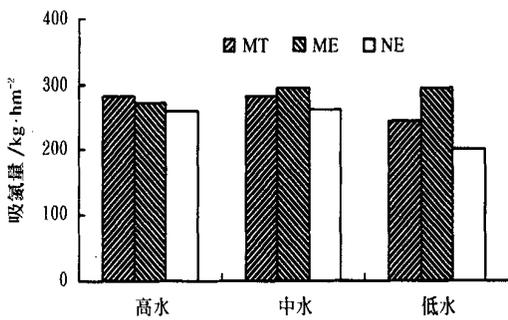


图 3 不同灌水与施肥处理条件下冬小麦植株吸氮量的比较

Fig. 3 Comparison of nitrogen uptake by winter wheat under different irrigation and fertilizer conditions

表 4 不同处理下作物各器官对氮的吸收

Table 4 N absorption in different parts of winter wheat for different treatments

处理	吸收量 /kg·(100·kg) <sup>-1</sup>		
	根	茎和叶	籽粒
HMT	1.27	0.72	2.97
MMT	1.34	0.64	2.95
LMT	1.31	0.68	2.64
HME	1.13	0.63	2.97
MME	1.26	0.69	2.87
LME	1.33	0.75	2.93
HNE	1.10	0.63	2.79
MNE	0.98	0.57	2.73
LNE	0.89	0.52	2.58

2.3.2 氮的利用效率

由表 5 可得, 除再生水灌溉加施肥处理外, 氮的利用效率, 随着灌水量的减少有所增加, 再生水灌溉不施肥处理的氮的利用效率是最高的。

表 5 不同处理氮的利用效率

Table 5 N use efficiency of different treatments for winter wheat

处理	总吸氮量 /kg·hm <sup>-2</sup>	氮利用效率 NUE	
		$Y_d/N$ /kg·hm <sup>-2</sup> ·(kg·hm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>	$Y/N$ /kg·hm <sup>-2</sup> ·(kg·hm <sup>-2</sup> ) <sup>-1</sup>
HMT	287.71	55.62	11.07
MMT	288.73	58.36	11.85
LMT	251.33	61.72	12.66
HME	277.82	57.92	15.03
MME	301.24	55.03	13.46
LME	300.30	56.85	12.46
HNE	264.83	62.48	13.59
MNE	264.85	62.39	13.74
LNE	203.64	70.02	15.63

3 结论与讨论

不同的灌溉水平、灌水水质和施肥水平对小麦株高的影响较小, 这一结果与污水灌溉对玉米株高影响的结果是一致的<sup>[12]</sup>。叶面积指数有随着灌水量的减少而变小的趋势, 尤其是对于再生水灌溉加施肥处理这种趋势更加明显。在相同灌水量条件下, 再生水灌溉加施肥处理的冬小麦地上部分干物质产量与籽粒产量分别高于其它处理的结果, 且在其它条件相同的情况下, 中灌水

水平的产量分别高于高、低灌水水平处理的产量, 因此当地采用的常规灌水方法和施肥的条件下, 就提高产量而言, 在利用再生水时, 宜采用中灌水量水平的灌溉策略。

冬小麦的累计耗水量随灌水量的增加而增大, 而与灌溉水质和施肥水平无关, 但水分利用效率则随灌水量的增加而减小。在本试验的冬小麦生长期总降雨量为 198.3 mm, 低灌水量水平的灌水量为 250 mm, 二者之和基本满足作物需水的要求<sup>[13]</sup>, 因此从提高水分利用效率和节约用水的角度而言, 可在生产实践中采用低灌水量的灌溉策略。此外, 再生水灌溉条件下作物的耗水规律与清水灌溉作物的耗水规律基本相同, 这一结果和夏玉米与草坪草的研究结果<sup>[10-12]</sup>是一致的, 所以可以采用与清水灌溉管理相似的办法来实施冬小麦的再生水灌溉管理。

冬小麦的吸氮量、氮素在各部位的分布以及氮素的利用效率随灌水水平、施肥水平、和灌水水质的变化较小。究其原因, 一是如前所述本试验低灌水量和降雨量之和基本满足冬小麦生长的需要, 二是随底肥和灌溉水带入的氮素总量也可满足冬小麦生长的要求<sup>[14]</sup>, 因此对作物的吸氮量、氮素在各部位的分布以及氮素的利用效率的影响较小。从氮素的高效利用而言, 在再生水灌溉条件下, 采用仅施用 500 kg/hm<sup>2</sup> 复合底肥的措施即可满足作物生长的要求。

由于再生水中包含有各种化合物, 尤其是含有一定量的盐分等物质, 在短期内其对作物和土壤的影响难

于体现,但长期的再生水灌溉将带来诸如土壤盐分累积并进而影响作物生长等负面效应,这些都是进一步值得深入研究的课题。

#### [参 考 文 献]

- [1] Feigin A, Bielrai H, Dag Y, et al. The nitrogen factor in the management of effluent-irrigated soils[J]. Soil Science, 1978, 125(4): 248- 254
- [2] Feigin A, Vaisman I, Bielrai H. Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II Nutrient availability in soil[J]. Journal of Environmental Quality, 1984, 13(2): 234- 238
- [3] Feigin A, Ravinna I, Shalhevet J. Irrigation with Treated Sewage Effluent[M]. Springer-verlag Berlin: Heidelberg, Germany, 1991
- [4] Lund L J, Page A L, Nelson C O, et al. Nitrogen balances for an effluent irrigation area[J]. Journal of Environmental Quality, 1981, 10: 349- 352
- [5] 马吉珍. 污水灌溉、污泥施用对耕地及农作物的影响[J]. 山西水利科技, 1996, 114: 96- 98
- [6] 姜翠玲, 冬自强, 刘 凌, 等. 污水灌溉土壤及地下水三氮的变化动态分析[J]. 水利科学进展, 1997, 8(2): 183- 187
- [7] 贾玉章, 赵久清, 封佃富, 等. 浅议大同市区污水灌溉对农业生态环境的影响[J]. 山西水利科技, 1998, 2: 92- 96
- [8] 孙正风, 王进包, 马京军. 宁冬污水灌溉对土壤和农产品质量的影响[J]. 宁冬农林科技, 1999, 4: 7- 11
- [9] 杨 飞, 蒋丽娟. 浅议污水灌溉带来的问题及对策[J]. 节水灌溉, 2000, 2: 23- 25
- [10] 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
- [11] 杨建国, 黄冠华, 黄权中. 污水灌溉条件下草坪草需水规律与灌溉制度初步研究[J]. 草地学报, 2003, 4
- [12] 查贵锋, 黄冠华, 冯绍元, 等. 污水灌溉时夏玉米水分与氮素利用效率的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 63- 67.
- [13] 陈玉民, 郭国双, 王广兴, 等. 中国主要作物需水量与灌溉[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995
- [14] Tucker T C, Hauck R D. Removal of nitrogen by various irrigated crops[A]. In: Pratt P F (ed) Management of Nitrogen in Irrigated Agriculture[C]. Dep Soil Environ Sci Univ Cal Riverside, 1978, 135- 167.

## Water and nitrogen use efficiency for winter wheat under the condition of irrigation with treated sewage effluent

Huang Guanhua, Cha Guifeng, Feng Shaoyuan, Qi Zhiming

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** To investigate water and nitrogen use efficiency for winter wheat irrigation with treated sewage effluent, an experiment was conducted in Yongledian irrigation experimental station during the winter wheat growing season with silt loamy soil. Winter wheat (BEIJING8—8866) was used as test crop. There were three irrigation levels were used, high 125 mm, moderate 83 mm and low 42 mm. Three different treatments under each irrigation level were applied respectively. Two fertilizer application levels with 1000 kg urea+ 500 kg compound fertilizer (with 8% N, P and K respectively) per hectare for high level and 500 kg compound fertilizer per treatments for low level were used respectively. Only treatments irrigated with treated sewage effluent contained both fertilizer levels. Thus made total of 9 treatments. Results indicated that the influence of irrigation rate, fertilizer level and quality of irrigation water on crop height was small; both leaf area index and yield increased with increasing irrigation rate and amount of fertilizer applied. The cumulative evapotranspiration increased while water use efficiency (WUE) decreased with increasing irrigation rate, and WUE was independent of fertilizer level and the quality of irrigation water. Total nitrogen uptake by plant and nitrogen use efficiency (NUE) were independent of irrigation rate, fertilizer level and the quality of irrigation water.

**Key words:** irrigation with treated sewage effluent; crop water requirement; water use efficiency (WUE); nitrogen use efficiency (NUE)