

夏玉米污水灌溉时水分与氮素利用效率的研究

查贵锋, 黄冠华, 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: 用田间实验研究污水灌溉条件下夏玉米水分与氮素的利用效率。试验设置了高、中、低 3 个不同灌水水平下的 9 个对比处理, 结果表明: 灌水量、灌溉水质、施肥量对夏玉米叶面积指数、株高和产量的影响很小; 不同灌溉水量条件下, 污水灌溉夏玉米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, 仅随灌溉水量的增加而减少。清水灌溉处理玉米的吸氮量高于污水灌溉处理玉米的吸氮量; 氮的利用效率与灌水量和施肥无关, 仅与灌溉水质有关, 且污水灌溉氮的利用效率高于清水灌溉氮的利用效率。

关键词: 污水灌溉; 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(2003)03-0063-05

1 引言

污水资源化利用是干旱缺水地区和国家长期关注和重视的问题。应用再生水进行农业灌溉, 在世界各地已有几十年的历史。统计资料表明, 中国每年要排放 580 亿 t 污水, 其中约有 40 亿 t 被用于灌溉, 其灌溉面积在 300 万 hm^2 左右; 北京市郊每年供灌溉再次利用的污水量达 2 200 万 t, 约占其污水排放总量的 27%, 污灌面积约 8 万 hm^2 [1]。

利用污水进行灌溉具有以下优点: 它不仅提供了灌溉所需的水资源, 缓解干旱缺水地区水的供需矛盾, 而且也为农业生产提供了大量的营养物质(N, P, K 和其它微量元素) [2~4], 促进作物的生长, 减少农业的投入, 同时也解决了城市地区污水进行深度处理(三级以上处理)的必要。

污水灌溉也可能存在以下一些不利的影 响: 一是提供大量的营养元素对作物生长产生一定的促进作用; 二是导致土壤中盐分累积造成作物根系受到反渗透的影响; 三是土壤导水和储水性能降低, 进而影响作物的需水特征。国内外学者关于清水灌溉条件下作物耗水规

律、水分与养分利用效率等方面开展了长期的大量研究工作 [5~9]。在污水灌溉方面, 国外学者 [2, 3, 10, 11] 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, 但对作物耗水规律及水分利用效率的研究还不多见。目前我国的研究多为污水灌溉对土壤、作物及环境的影响研究 [12~15], 对污水灌溉条件下草地需水特征与氮的利用研究开展了一些初步研究工作 [16], 因此开展污水灌溉条件下作物耗水规律及水分与养分利用效率的研究, 可为污水灌溉管理提供相应的科学依据。

本文研究以田间小区试验为基础, 研究不同污水灌溉水平时, 夏玉米生长条件下水分与氮的利用效率。

2 材料与方法

试验地点为北京市水科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, 试验所用污水为高碑店污水处理厂的出水和下游村镇的生活污水。试验地土壤质地为壤土(其理化性状见表 1), 供试玉米品种为“屯玉 1”, 播种时间和收获时间分别为 2001 年 6 月 13 日和 2001 年 9 月 22 日。

表 1 试验区土壤的理化性状

Table 1 Physical and chemical characteristics of the tested soil

土层/cm	粘粒/%	粉粒/%	砂粒/%	总碳/%	总氮/%	$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	质地
0~20	17.18	57.04	26.94	1.648	0.086	1.071	20.218	粉壤土
20~40	16.35	59.50	24.14	1.385	0.052	0.412	36.153	粉壤土
40~80	15.17	62.42	22.42	1.445	0.038	1.029	26.394	粉壤土

2.1 试验处理

试验共设有 9 个处理, 分别为污水高水灌溉(灌水

量 $1.083 \text{ } 33 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 施肥 ($500 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 尿素) 处理 (HME)、不施肥处理 (HNE), 污水中水灌溉(灌水量 $833.33 \text{ m}^3/\text{hm}^2$)、施肥处理 (MME)、不施肥处理 (MNE), 污水低水灌溉(灌水量 $500 \text{ m}^3/\text{hm}^2$) 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, 污水为通惠河支流——凤港减河的污水(由高碑店污水处理厂的二级处理出水与其下游河道周边的生活污水混合而成)。水中的主要化学成分如表 2。

收稿日期: 2003-01-09 修订日期: 2003-04-04

基金项目: 中国—以色列农业合作研究基金项目(SIARF-05); 国家重点发展规划研究项目(G1999045706); 国家自然科学基金项目资助(50279052)

作者简介: 查贵锋, 硕士研究生, 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

通信作者: 黄冠华, 博士, 教授, 北京市 中国农业大学东区 151 信箱, 100083



表 2 灌溉用水成分

Table 2 Chemical properties of effluent and fresh water used in experiments

化学成分/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	井水	污水
pH	7.05	7.17
$\text{EC}/\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1}$	1112	1149
K^+	1.09	42.11
Na^+	87.61	154.6
Ca^{2+}	58.71	86.4
Mg^{2+}	52.97	39
P	0.035	1.83
B	0.13	0.21
NH_4^+	0.184	13.68
NO_3^-	7.74	5.76
SAR*	1.99	3.46

* SAR= 钠吸附比。

灌水时间分别为播前水(6月13日)、拔节期(7月16日)、抽雄期(8月9日)和灌浆期(9月9日),灌水方式为地面灌溉。分别在播前、拔节期和抽雄期各施肥一次,施肥时间同灌水时间。污灌时由污水带入田间氮元素的量分别是高水 $41.20 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、中水 $31.69 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 、低水 $22.18 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。每处理 2 个重复,共有 18 个田间

试验小区,面积为 $2 \times 3 \text{ m}^2$ 。

2.2 试验方法

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 摄氏度杀青 1 h 后维持 75 烘烤 8 h)后测其干质量;作物产量:包括籽粒产量、干粒重;根系:采用取根器(型号 XY-2,内径为 10 cm)分层(每层深度 15 cm,自地表至 90 cm 深)取样测定。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(ZY-2 型,河北正定水文地质研究所研制)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,负压计每天观测一次,时间为上午 8:00。

3 结果分析

3.1 叶面积指数、株高与产量

表 3 不同处理玉米叶面积指数与株高的变化

Table 3 Leaf area index and plant height of summer corn versus time

处理		日期/月-日									
		07-14		07-28		08-17		08-28		09-08	
		叶面积 指数	株高 /cm								
清水 灌溉	施肥										
	HMT	1.21	43.04	4.72	103.90	5.08	216.45	4.88	222.65	4.94	223.90
	MMT	1.17	41.33	5.08	103.85	5.08	224.50	4.69	220.55	4.92	222.80
	LMT	1.26	43.07	4.58	107.60	5.09	229.90	5.07	230.75	4.84	228.45
污水 灌溉	施肥										
	HME	1.00	39.95	4.32	97.20	5.01	222.50	4.96	222.15	4.64	221.35
	MME	1.18	41.65	4.63	109.10	5.09	221.65	5.02	225.95	4.20	223.20
	LME	1.18	40.43	4.54	101.15	4.85	215.55	4.54	222.35	4.43	224.70
	不施肥										
	HNE	0.89	40.47	4.62	111.95	5.16	224.05	4.73	225.85	5.39	232.85
	MNE	1.27	42.32	4.40	109.55	5.21	234.90	5.37	234.40	4.64	232.90
	LNE	1.14	44.20	4.26	109.20	5.17	230.70	5.25	233.00	4.86	233.90

玉米的叶面积指数在出苗后 45d 左右达到或接近最大值,但株高则在出苗后 65 d 左右达到或接近最大值。不同处理相同的时间玉米的株高与叶面积指数差异较小,说明在本试验条件下无论是灌水量、灌溉水质,还是施肥与否对玉米叶面积指数和株高的影响很小。

玉米的产量如图 1 所示,对于玉米而言,无论是哪种水质与施肥处理,中等灌水条件下的产量分别高于其他两种灌溉水量的情况,且 HMT、HME 处理的产量分别高于 LMT、LME 处理的产量,但 NE 处理的产量则呈现相反的规律。除低灌水条件下,LME 的产量低于 LNE 的产量外,在同一种灌溉水量条件下玉米的产量与水质和施肥的关系为 MT 的产量高于 ME 的产量,且 MT 与 ME 的产量高于 NE 的产量。从平均角度看,MT 的产量比 ME 的产量高 3% 左右,而 ME 比 NE 仅

增产 0.5%。就本试验的情况看,清水灌溉与污水灌溉之间的产量差异性不显著,玉米产量随灌溉水水质、施肥、灌水量的变化较小。

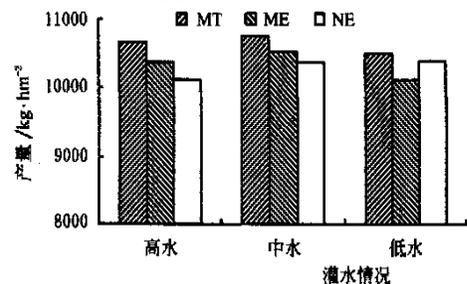


图 1 不同灌水与施肥处理条件下夏玉米产量的比较

Fig. 1 Comparison of grain yield of summer corn under different irrigation and fertilizer conditions

3.2 需水特征

3.2.1 全生育期耗水量

玉米全生育期内的耗水量如图 2 所示。从图中可以看出, 玉米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。高水、中水、低水之间的差异达到 100~ 250 mm, 灌水水质对耗水量的影响不明显。

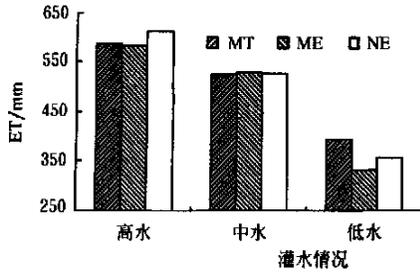


图 2 不同灌水与施肥处理条件下夏玉米全生育期耗水量的比较

Fig. 2 Comparison of cumulative evapotranspiration of summer corn under different irrigation and fertilizer conditions

3.2.2 水分利用效率

表 4 列出了不同处理的耗水量、干物质量 Y_d (包括根、茎、叶、穗、花)、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, 玉米耗水量和干物质量随灌溉水量的增加而增加。在不同灌水量条件下, 无论是清水灌溉, 还是污水灌溉, 无论是污水灌溉施肥还是污水灌溉不施肥, 以籽粒产量为基础的水分利用效率 Y/ET 都十分接近, 水分利用效率 Y/ET 随着灌水量的增加而降低, 说明水分利用效率 Y/ET 与灌溉水质和施肥无关, 仅与灌水量有关。清水灌溉条件下, 以干物质量为基础的水分利用效率也随着灌水量的增加而降低, 对于污水灌溉而言, 高灌水处理 (HE) 的水分利用效率 Y_d/ET 略高于中灌水处理 (ME) 的情况, 但 HE 和 ME 处理的水分利用效率 Y_d/ET 明显低于灌

水处理 LE 的结果

表 4 不同处理产量与水利用效率

Table 4 Yield and water use efficiency of different treatments for summer corn

处理	ET/mm	干物质量 Y_d /kg · hm ⁻²	籽粒产量 Y /kg · hm ⁻²	水分利用效率 WUE	
				Y_d/ET /kg · hm ⁻² · mm ⁻¹	Y/ET /kg · hm ⁻² · mm ⁻¹
HMT	587.81	26012.7	10665	44.25	18.1
MMT	523.50	26691.9	10738	50.99	20.5
LMT	392.42	23485.2	10485	59.85	26.7
HME	582.76	25734.9	10358	44.16	17.8
MME	529.09	25458.6	10522	48.12	19.9
LME	331.57	24197.7	10113	72.98	30.5
HNE	613.16	23661.9	10102	38.59	16.5
MNE	525.70	25173.6	10368	47.89	19.7
LNE	355.39	26091.6	10382	73.42	29.2

3.3 作物吸氮

3.3.1 作物对氮的吸收

玉米全生育期内的吸氮量如图 3 所示。从图中可以看出, 对不施肥处理 (NE), 不同灌水量条件下作物的吸氮量十分接近; 对于施肥处理 (ME、MT), 作物吸氮量随灌水量的减少而减少。清水灌溉处理玉米的吸氮量明显高于污水灌溉处理玉米的吸氮量。各处理总的吸氮量和已有的研究^[18]基本相似。

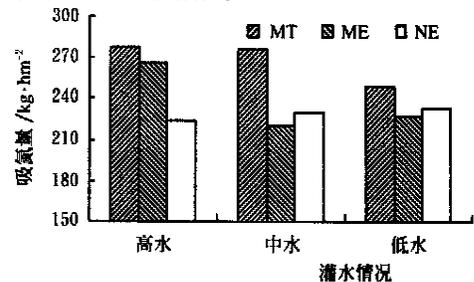


图 3 不同灌水与施肥处理条件下夏玉米植株吸氮量的比较

Fig. 3 Comparison of nitrogen uptake by summer corn under different irrigation and fertilizer conditions

表 5 不同处理下作物各器官对氮的吸收

Table 5 N absorption in different parts of summer corn for different treatments

处理	根	叶	茎	花	籽粒	
	/kg · (100 · kg) ⁻¹					
清水灌溉	HMT	0.995	1.420	0.523	0.996	1.363
	MMT	1.092	1.180	0.449	0.868	1.360
	LMT	1.150	1.233	0.518	0.958	1.367
污水灌溉	HME	0.944	1.509	0.482	0.357	1.398
	MME	0.786	1.063	0.404	0.830	1.253
	LME	0.964	0.861	0.459	0.955	1.403
	HNE	0.643	1.272	0.304	0.896	1.333
	MNE	0.572	1.301	0.371	0.844	1.217
	LNE	0.627	1.172	0.271	0.442	1.361

表 5 是夏玉米总吸氮量在各部分器官的分布状况, 从表中可以看出, 单位质量的籽粒中含氮量是玉米各部分含氮量最高的, 其后依次为叶、根、花、茎。且无论是清

水灌溉还是污水灌溉, 有无施肥, 灌水高低, 同一器官单位质量的含氮量都非常接近, 但污水灌溉比清水要高。说明只有灌水水质对各器官单位中的含氮量有影

响。

3.3.2 氮的利用效率

表 6 是关于不同处理以籽粒产量 Y 和以干物质量 Y_d 为基础的氮的利用效率 Y/N 和 Y_d/N 。从表中可以

看出, 清水灌溉的氮利用效率 Y/N 和 Y_d/N 都低于污水灌溉的氮利用效率。但在相同灌溉水质、不同的施肥和不同灌水量条件下氮的利用效率基本相同, 说明氮的利用效率与灌水量和施肥无关, 仅与灌溉水质有关。

表 6 不同处理产量与氮的利用效率

Table 6 Yield and N use efficiency of different treatments for summer corn

处理	总吸氮量 $N/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	干物质量 $Y_d/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	籽粒产量 $Y/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	氮利用效率 $NUE/\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})^{-1}$	
				Y_d/N	Y/N
HM T	277.55	26012.7	10665	93.72	38.43
MM T	275.85	26691.9	10738	96.76	38.93
LM T	248.67	23485.2	10485	94.44	42.16
HME	266.58	25734.9	10358	96.54	38.86
MM E	220.25	25458.6	10522	115.59	47.77
LME	227.08	24197.7	10113	106.56	44.53
HNE	223.58	23661.9	10102	105.83	45.18
MNE	230.25	25173.6	10368	109.33	45.03
LNE	232.39	26091.6	10382	112.28	44.67

4 结论与讨论

1) 污水灌溉对作物生长影响。试验研究结果表明无论是灌水量、灌溉水质, 还是施肥与否对玉米叶面积指数、株高和产量的影响较小。就灌水量而言, 由于夏玉米的生长季节与华北地区的降雨季节处在同一时期, 在本试验期间总降雨量为 278 mm, 而最大灌水量为 432 mm, 最小灌水量为 233 mm, 即使是最小灌水量处理其灌水量与降雨量之和也足以满足作物需水的要求。就灌溉水质而言, 随灌溉水带入田间的 N、P、K 量与施肥量相比较小, 如高灌水条件下随污水进入田间有效 N 量仅占施肥处理总 N 量的 5.66% 左右, 占不施肥处理 (仅施底肥) 总施氮量的 15% 左右, 因此其对作物产量的效应相对较小。此外, 污水灌溉不施肥处理随底肥和灌溉水带入的 N 量已和前述作物的吸氮量相接近, 并达到作物生长需要量的要求^[17]。

2) 污水灌溉对作物水分利用效率的影响。夏玉米的耗水量与水分利用效率仅随灌溉水量的变化而变化, 这是由于如前所述在本试验中即使是低灌溉水的条件下, 灌溉水和降雨仍可以满足作物生长的要求, 而未对作物的生长和产量产生胁迫的影响, 因此灌水越多作物的耗水量越大, 其水分利用效率越低。从提高水分利用效率和节约用水的角度而言, 应该减少现有的灌溉水量。由于污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, 如果仅从作物耗水量的角度考虑, 可以采用与清水灌溉管理相似的办法来实施污水灌溉管理。

3) 污水灌溉对氮素利用效率的影响。氮的利用效率与灌水量无关而与灌溉水质有关, 即污水灌溉氮的利用效率高于清水灌溉氮的利用效率。但清水灌溉作物的吸氮量高于污水灌溉的结果, 这与已有的研究结果^[17]是相反的, 其机理还有待进一步分析探讨。

由于灌溉污水的水质随时间地点的变化差异较大,

加之污水各种污染物之间相互作用的机制十分复杂, 如污水中的盐分等氮素在土壤中的迁移转化和作物对氮的吸收利用均有不同程度的影响, 因此污水灌溉条件下作物水分与养分利用效率的研究还需要从不同的侧面进行深入的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 董克虞, 杨春惠, 林春野. 北京市污水农业利用区划的研究 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994, 51~ 125
- [2] Feigin A, Biebrai H, Dag Y, et al. The nitrogen factor in the management of effluent-irrigated soils [J]. Soil Science, 1978, 125: 4, 248~ 254
- [3] Feigin A, IRavinna, J Shalhevet. Irrigation with treated sewage effluent [M]. Springer-verlag Berlin: Heidelberg, Germany, 1991.
- [4] Achari M S, Dhakshinamoorthy M, Arunachalam G. Studies on the influence of paper mill effluents on the yield, availability and uptake of nutrients in rice [J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1999, 47: 2, 276~ 280
- [5] Shamasarkar F C, Shamasarkar, S D, et al. Assessment of drip and flood irrigation on water and fertilizer use efficiencies for sugarbeets [J]. Agri Water Manag, 2001, 46: 241~ 251.
- [6] Thompson T L, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: I. plant response [J]. Soil Sci Soc Am, 2000, 64: 406~ 411.
- [7] Thompson T L, Doerge T A, Godin R E. Nitrogen and water interactions in subsurface drip-irrigated cauliflower: I. II. Agronomic Economic and Environmental Outcomes [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 412~ 418
- [8] Meyer R D, Marcum D B. Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen [J]. Agron J, 1998, 90: 420~ 429.
- [9] 李韵珠, 王凤仙, 黄元仿. 土壤水分和养分利用效率几种定

- 义的比较[J]. 土壤通报, 2000, 3(4): 150~ 155
- [10] 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
- [11] Feigin A, Vaisman I, Bielbrai H. Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II. Nutrient availability in soil [J]. *Journal of Environmental Quality* 1984, 13: 2, 234~ 238
- [12] 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
- [13] 孙正风, 王进包, 马京军. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响[J]. 宁夏农林科技, 1999, (4): 7~ 11.
- [14] 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
- [15] 姜翠玲, 夏自强, 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.
- [16] 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.
- [17] Tucker T C, Hauck R D. Removal of nitrogen by various irrigated crops. In: Pratt P F. (ed) Management of nitrogen in irrigated agriculture[J]. *Dep Soil Environ Sci, Univ Cal Riverside*, 135~ 167.

Water and nitrogen use efficiency for summer corn under condition of irrigation with sewage effluent

Zha Guifeng, Huang Guanhua^{*}, Feng Shaoyuan, Qi Zhiming

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

Abstract: One of the most important advantages of irrigation with sewage effluent is that it can provide the abundant nutrients for crop growth. For investigating the water and nitrogen use efficiency when irrigation with sewage effluent, an experiment was conducted in field with silt loamy soil and the summer corn (TUN YU -1) was used as test crop. Three irrigation levels with large irrigation rate of 108 mm, moderate irrigation rate of 83 mm and small irrigation rate of 58.3 mm respectively were set, during the summer corn growing season 4 irrigations were applied. Two fertilizer levels with 1500 kg urea/hm² for high level and 500 kg urea/hm² for low level were used respectively. Only irrigation with sewage effluent treatments contained both fertilizer levels. All the treatments totally are 9. Results indicate that the influence of irrigation rate, fertilizer level and irrigation water on crop height, leaf area index and yield is small. The cumulative evapotranspiration increases with the increasing of irrigation rate, but on the other hand the water use efficiency (WUE) decreases with the increasing of irrigation, and WUE is independent of fertilizer level and irrigation water quality. Nitrogen uptake by summer corn of irrigation with well water is higher than that of irrigation with sewage effluent, but the nitrogen use efficiency (NUE) of irrigation with sewage effluent is higher than that of irrigation with well water, and NUE is independent of the fertilizer level and irrigation rate.

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