

变饱和带条件下污水灌溉对土壤氮素 运移和冬小麦生长的影响

齐学斌^{1,3}, 李 平¹, 亢连强¹, 樊向阳¹, 乔冬梅^{1,2}, 赵志娟¹, 樊 涛¹, 黄仲冬¹

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003; 2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100083;
3. 西北农林科技大学, 杨凌 712100)

摘要: 为了研究地下水浅埋区污水灌溉对土壤环境及作物生长的影响, 设置地下水埋深(2、3m 和 4m)和灌水水量($900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 2 个因素, 对冬小麦全生育期土壤氮素和冬小麦生长发育指标进行试验, 试验在地中渗透仪中进行。结果显示: 灌水后, 不同处理土壤中硝态氮含量均显著增加, 灌水水平越高, 土壤中硝态氮含量增加越多; 灌水后, 灌水水平 B_1 ($900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 不同潜水埋深地下水硝态氮分别增加 34.67%、24.94%、20.88%; 灌水水平 B_2 ($1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 不同潜水埋深地下水硝态氮分别增加 58.42%、38.98%、27.21%。潜水埋深越浅, 地下水中硝态氮的浓度增加越大, 这也就表明由于淋溶和硝化作用产生的硝态氮造成浅层地下水污染的风险越大。污水灌溉对冬小麦的生长发育指标和产量有促进作用; 相同灌水水平 (B_1 和 B_2), 地下水埋深影响冬小麦生长发育指标的大小顺序为: $2\text{m} > 3\text{m} > 4\text{m}$ 。

关键词: 变饱和带; 污水灌溉; 氮素运移; 冬小麦; 影响

文章编号: 1000-0933(2008)04-1635-11 中图分类号: S-3 文献标识码: A

Impact of depth of groundwater table on nitrogen dynamics in soil under sewage irrigation

QI Xue-Bin^{1,3}, LI Ping¹, KANG Lian-Qiang¹, FAN Xiang-Yang¹, QIAO Dong-Mei^{1,2}, ZHAO Zhi-Juan¹, FAN Tao¹, HUANG Zhong-Dong¹

1 Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Science, Xinxiang 453003, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100083, China

3 Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1635 ~ 1645.

Abstract: Irrigation with industrial and domestic sewage has become increasingly common in most areas in China that are short of fresh water. Unlike fresh water, sewage is rich in nutrients, and irrigation with sewage will therefore give rise to a change in nitrogen dynamics in soils. In this paper we present an experimental study of the impact of groundwater table on the movement and transformation of nitrogen in soil under sewage irrigation. The experiment was carried out in a lysimeter, and the groundwater table was controlled at depth from 2 m to 4 m. The experimental crop was winter wheat and was irrigated with sewage at $900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ and $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ respectively. The results indicated that the nitrate concentration in

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2006AA100205-6); 国家科技支撑计划资助项目(2006BAD17B02); 欧盟合作资助项目(023168 SAFIR)

收稿日期: 2007-04-25; **修订日期:** 2007-12-29

作者简介: 齐学斌(1963 ~), 男, 陕西户县人, 研究员, 主要从事农业水资源优化配置与调控技术, 劣质水安全高效利用研究. E-mail: qxb6301@yahoo.com.cn

Foundation item: The project was financially supported by National 863 program (No. 2006AA100205-6), Nation key technology R & D program (No. 2006BAD17B02), EC program (No. 023168 (SAFIR))

Received date: 2007-04-25; **Accepted date:** 2007-12-29

Biography: QI Xue-Bin, Professor, mainly engaged in optimal technology of agricultural water resource, safe and high efficiency production techniques using low quality waters. E-mail: qxb6301@yahoo.com.cn

both soil and groundwater increased substantially after the sewage irrigation. The increase of nitrate concentration in groundwater depends on the depth of groundwater table and the amount of irrigation. When irrigated at $900\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, the nitrate concentration in the groundwater increased 34.67%, 24.94% and 20.88% for groundwater depth at 2 m, 3m and 4 m, respectively; whilst when the amount of irrigation increased to $1200\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, the associated nitrate concentration in the groundwater increased 58.42%, 38.98%, 27.21%, respectively. The sewage used in our experiment provided more nutrients than what the crop needed. As a result, the risk of groundwater being polluted by nitrogen increases when groundwater becomes shallow. Since the crops adsorb the nutrients supplied by the sewage, for a given sewage, there should be a critical groundwater depth beyond which the risk of groundwater being polluted becomes negligible.

Key Words: variably saturated soils; sewage irrigation; nitrogen transport and transformation; winter wheat; groundwater table

我国是世界上水资源严重短缺的国家之一,缺水已成为制约国民经济持续稳定发展的主要因素。为了确保农业生产,许多地方都在自发、被动地利用劣质水进行灌溉,据 2004 年资料统计,全国仅污水灌溉面积已达 361.8万 hm^2 ,占有效灌溉面积的 6.4%,这种被动、不规范的劣质水利用方式,在缓解农业用水供需矛盾的同时,也对作物、土壤及地下水环境带来诸多影响。

关于污水灌溉对冬小麦生长发育的影响,冯绍元等^[1,2]对不同水质(清、污水)、不同灌水量(高、中、低)和不同施肥量(中、无)处理下,重金属在夏玉米和冬小麦作物体中残留特征进行了田间试验研究。齐志明等^[3]进行了夏玉米污水灌溉时水分与氮素利用效率研究。孟雷等^[4]进行了污水灌溉对冬小麦根长密度和根系吸水速率分布的影响研究。乔丽等^[5]经过样本分析得出二级处理水用于农业灌溉基本可以忽略重金属的影响,研究重点应集中在养分和盐分含量的增多所引起的生态效应。

利用经处理的污水灌溉蔬菜国外开展了不少研究,如 G A AlNakshabandi, M M Saqqar 等^[6]于 1993 年在约旦安曼附近应用经过稳定塘处理和经氯消毒的再生水进行茄子生长的田间试验,并以清水灌溉作对照,对茄子的营养物质含量、重金属含量及微生物学性质、产量等进行评价。O. Al-Lahaam, N M El Assi^[7]在约旦进行了清水与再生水不同混合比例对西红柿品质影响的大田试验研究。A Pollice, A Lopez^[8]等在意大利应用三级处理的再生水浇灌茴香和西红柿,并以井水为对照,研究不同水质对蔬菜果实的影响。以色列对地表滴灌和地下滴灌进行了对比试验,研究发现,灌溉系统对病菌的存在范围影响很大,灌溉系统不同,病菌的存在范围也不同,地表滴灌后蛔虫卵存在于地表,地下滴灌后蛔虫卵存在于地表下 40cm 范围^[9]。

污水灌溉带来的土壤及地下水环境污染问题已为世界所关注,其影响主要表现在污染物在土壤中的残留、累积和对地下水的污染。Smith 等^[10]研究了二级处理水灌溉(喷灌)4a 和 17a 的大型绿地土壤重金属的变化,结果表明,与清水灌溉相比,再生水灌溉土壤中的重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn)的累积量未超出正常范围,且与土壤的背景值无明显差异。Eeizi^[11]研究了伊朗 Isfahan 城郊区再生水灌溉小麦和苜蓿的重金属累积状况,结果表明,再生水灌溉后作物体中的重金属比清水灌溉略高,但未出现重金属累积污染现象。另外,污水中含有大量营养元素,特别是氮,污灌后由于淋溶和硝化作用产生的硝态氮会造成浅层地下水的严重污染,硝态氮的淋溶主要受灌水量、潜水埋深、土壤含水量及土壤中残留的硝态氮等因素的制约。地下水埋深较浅($<5\text{m}$),土壤水和地下水有双向交换作用^[12],地下水埋深的不同,势必影响到氮素在土壤-地下水系统中的运移。目前国内外相关研究主要侧重于分析氮素在土壤中迁移转化过程^[13~15],但对污灌造成的地下水 NO_3^- 污染研究较少,对不同潜水埋深条件下污水灌溉对土壤及地下水中氮素运移的影响研究文献就更少。

浅层地下水埋深的变化除影响氮素运移外,也对作物生长产生一定的影响,Cavazza 等^[16]研究发现,当地下水埋深为 1.25m 时,冬小麦产量最高,地下水埋深大于 1.25m 时,如果不进行人工灌溉,冬小麦产量会降低。杨建锋等^[17]在试验过程中将地下水水位控制在 0.3~1.8m 之间,得出冬小麦生长发育的最优地下水水位为 1.5m,当地下水埋深小于 0.6m 时,冬小麦产量锐减。巴比江等^[18]通过 6 种地下水水位控制和对照处理

(自然地下水位)冬小麦试验得出,地下水埋深为 1.5m 时冬小麦产量最高。目前研究主要针对清水灌溉条件下不同潜水埋深对作物产量的影响,而对污水灌溉条件下不同潜水埋深对作物不同生育阶段各生育指标影响的详细尚未见报道。

浅层潜水埋深的变化对污水灌溉氮素运移及作物生长发育究竟有何影响?本文进行了变饱和带条件下污水灌溉对冬小麦叶面积指数、株高、干物质量、产量以及土壤及地下水中氮素运移的试验研究。

1 材料与方法

1.1 设计与处理

田间试验在中国农科院农田灌溉研究所洪门地中蒸渗仪试验场进行,试验作物为冬小麦,试验共设 6 个处理,考虑因素 A 为潜水埋深,分 A_1 (2m)、 A_2 (3m)、 A_3 (4m) 3 个水平;因素 B 为灌水量,分 B_1 ($900 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、 B_2 ($1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$) 2 个水平,污水灌溉田间试验布置详见表 1。

表 1 污水灌溉试验设计
Table 1 Trail design of sewage irrigation

因素 Factor	处理 Treatment					
	$A_1 B_1$	$A_1 B_2$	$A_2 B_1$	$A_2 B_2$	$A_3 B_1$	$A_3 B_2$
潜水埋深 A Groundwater level (m)	2	2	3	3	4	4
灌水量 B Irrigation amount ($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	900	1200	900	1200	900	1200

灌溉采用畦灌,污水取自新乡市污水处理厂,其成分见表 2。灌水日期分别为底墒水(2005 年 10 月 13 日)、返青水(2005 年 12 月 30 日)、拔节水(2006 年 3 月 22 日)、抽穗期水(2006 年 4 月 19 日)。2006 年 3 月 22 日结合灌水施肥($\text{N}: 330 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{P}: 112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, $\text{K}: 112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。全生育期内其它管理措施相同。冬小麦播种时间和收获时间分别为 2005 年 10 月 19 日和 2006 年 6 月 5 日。

表 2 污水成分表
Table 2 Main pollutants and their concentrations in sewage water (mg/L)

取样日期 Date of sampling	pH	EC ($\text{ds} \cdot \text{m}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$
2005-10-13	7.75	1.98	25.13	0.20
2005-12-30	7.68	2.00	23.18	0.25
2006-03-22	7.81	1.96	31.51	0.08
2006-04-19	7.63	2.03	25.37	0.14

1.2 试验观测内容与方法

(1) 定期记录作物生长发育状况,遇病虫害及倒伏等情况随时记录。同时记录冬小麦全生育期有效降雨资料,总有效降雨量为 96.9mm。每 10d 观测 1 次株高、群体密度、叶面积、地上干物质重量(分茎、叶、穗),成熟后测产考种。群体密度测定:沿作物生长行方向,取 1m 长,统计小麦株数,再除以 1m 行所占的面积,得出单位面积株数。叶面积指数(绿叶面积)测定:取 5 株小麦,用直尺测量,算出单株叶面积,再除以植株所占的面积。降雨量采用自动气象站(英国 SKYE MINIMET)测量。

(2) 土壤中硝态氮($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、铵态氮($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、土壤含水量测定 分别于灌水前、灌水后第 1 天、灌水后第 2 天、灌水后第 5 天、灌水后第 10 天土钻取土,取样深度分别为 5、10、15、20、30、40、60、80、100、120、140、160、180、200cm,共计 14 个土样。土壤中硝态氮、铵态氮浸提方法:称取鲜土样 10g,加入 1mol/l CaCl_2 溶液 50ml,振荡 0.5h 后,静置 1h,取上清液。硝态氮及铵态氮含量测定,采用流动分析仪(德国 BRAN LUEBBE AA3)测定。土壤含水量采用烘干法测定。

(3) 土壤溶液及地下水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、pH 及 EC 测定 分别于灌水前、灌水后第 1 天、灌水后第 2 天、灌水后第 5 天、灌水后第 10 天分层抽取土壤溶液及地下水溶液,抽取深度分别为 15、30、50、70、100、150、200、

250、300、350、400、450cm, 潜水埋深 2、3、4m 抽取水样分别为 7、10、12 个。水样中 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 采用流动分析仪测定, pH 值采用酸度计 (PHS-1) 测定, 电导率采用电导仪 (DDS-11A) 测定。

2 结果与分析

2.1 对株高的影响

不同地下水埋深冬小麦株高随时间变化如图 1、图 2 所示。灌水量相同时, 不同地下水埋深株高变化顺序为: 2m > 3m > 4m (图 1); 相同地下水埋深条件下, 低水处理的株高大于高水处理 (图 2)。低灌水量时各处理之间冬小麦株高的差异达到极显著水平 ($p = 0.01$); 高灌水量时, 地下水埋深 2m、3m 和 4m 处理间株高差异达显著水平 ($p = 0.05$)。地下水埋深相同同时不同灌水量处理株高间的差异不显著。表明不同地下水埋深对冬小麦株高的影响较大。

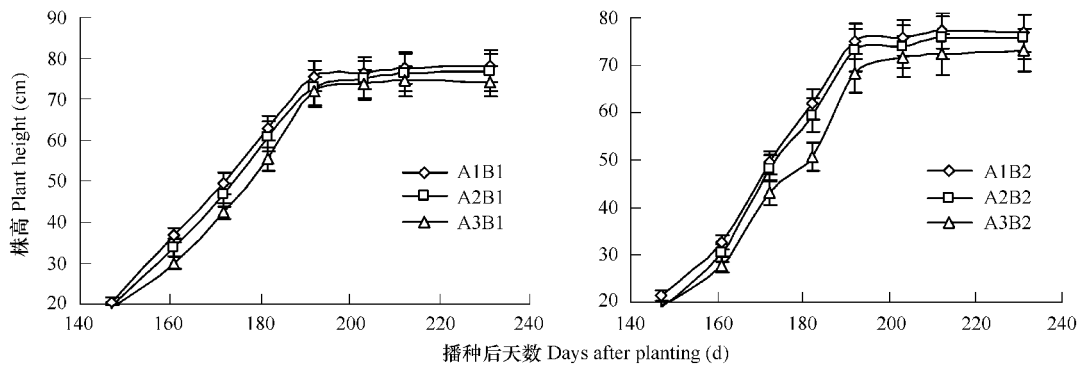


图 1 不同地下水埋深相同灌水量冬小麦株高

Fig. 1 Plant height of winter wheat with the same irrigation amount under different groundwater table

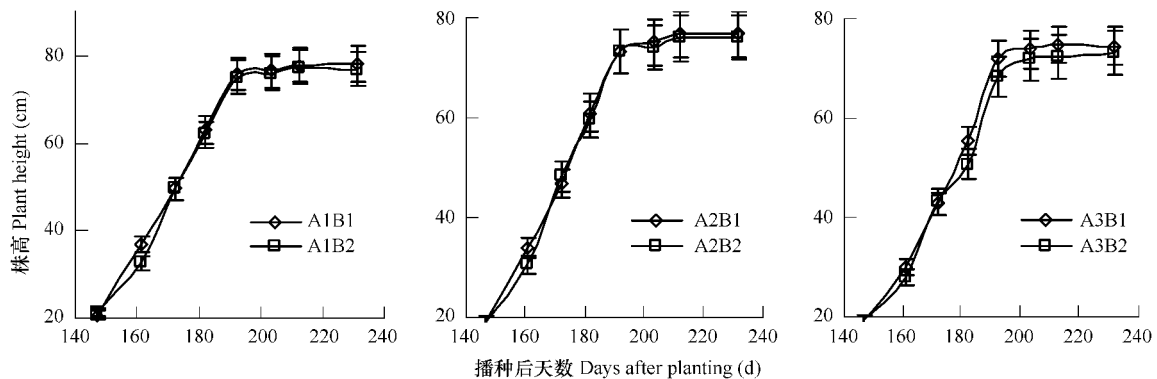


图 2 不同灌水量相同地下水埋深冬小麦株高

Fig. 2 Plant height of winter wheat with the same groundwater table under different irrigation amount

2.2 对叶面积指数的影响

冬小麦叶面积指数采用量测法, 公式如下:

$$LAI = D \times A$$

式中, LAI 为作物群体的叶面积指数; D 为群体密度; A 为单株叶面积;

$$D = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i / L_i) \right) / P$$

式中, n 为样段数; L_i 为每个样段的长度; S_i 为长度为 L_i 的样段小麦株数; P 为行间距;

$$A = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n (L_{ij} \times W_{ij} \times K) \right]$$

式中, n 为所取植株样本的个数; m 为每个植株的叶片数; $K=0.7$ 为长宽之积的折算系数; L_{ij} 为第 i 株第 j 片叶的长度; W_{ij} 为第 i 株第 j 片叶的宽度。

冬小麦的叶面积指数随时间变化如图 3 所示。从图中可以看出, 各处理叶面积指数都表现出在播种后 140d 到播种后 170d 为快速增长阶段, 到 172d 时达到最大值, 以后逐渐递减。对比不同地下水埋深各处理可以看出, 相同灌水量条件下, 叶面积指数大小顺序为: 地下水埋深 2m > 3m > 4m, 这是由于地下水埋深越小, 在毛管吸力和蒸腾拉力的作用下, 土壤水分运移越活跃, 越有利于冬小麦对水分和养分的吸收利用, 因而导致了 2m 地下水埋深处理的冬小麦叶面积指数最大。对比不同灌水平可以看见(图 4), 相同地下水埋深条件下, 低水处理的叶面积指数大于高水处理, 低灌水量时各处理之间冬小麦叶面积指数间的差异达到极显著水平 ($p=0.01$); 高灌水量时, 地下水埋深 2、3m 和 4m 处理叶面积指数间差异不显著。表明不同地下水埋深对冬小麦叶面积指数的影响较大。

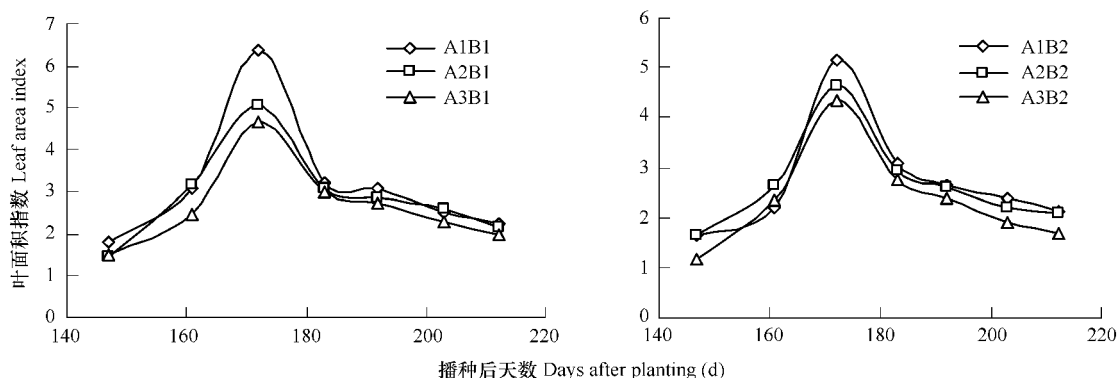


图 3 不同地下水埋深相同灌水量冬小麦叶面积指数

Fig. 3 Leaf area index of winter wheat with the same irrigation amount and different groundwater table

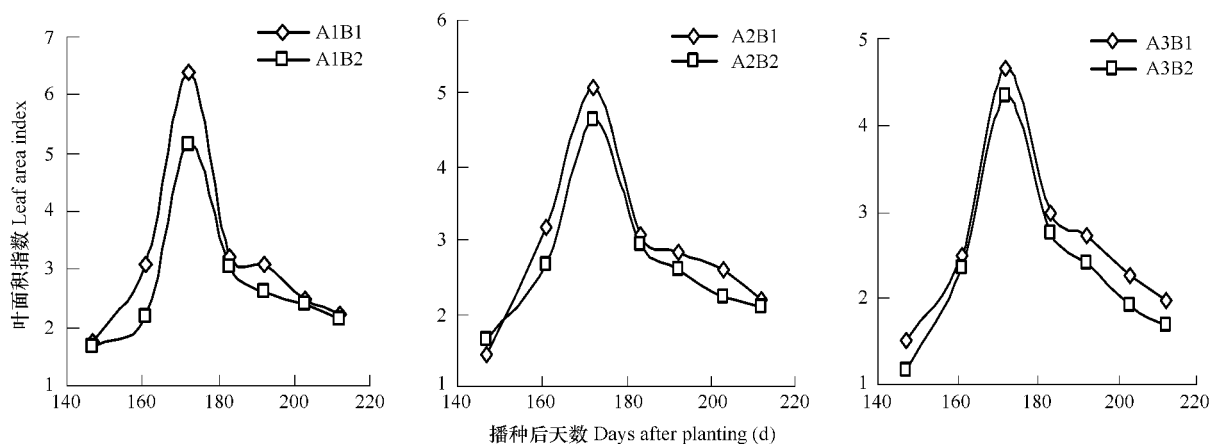


图 4 相同地下水埋深不同灌水量冬小麦叶面积指数

Fig. 4 Leaf area index of winter wheat with different irrigation amount and the same ground water table

2.3 对群体密度的影响

冬小麦的群体密度随时间变化如图 5、图 6 所示。从图中可以看出, 在播种后第 180 天之前, 各处理之间的群体密度差别较大。自冬小麦返青起, 群体密度迅速下降, 是由于播种密度大造成冬小麦群体密度过大, 随着养分和水分的竞争, 部分小麦逐渐死亡。对比不同地下水埋深, 低水和高水处理的冬小麦群体密度由大到小顺序为: 地下水埋深 2m > 3m > 4m; 对比不同灌水量(图 6), 低水处理的群体密度大于高水处理。低灌水量时各处理之间冬小麦群体密度间的差异达到极显著水平 ($p=0.01$); 高灌水量时, 地下水埋深 2、3m 和

4m 处理间群体密度间的差异不显著。灌水量相同时,地下水埋深为 2m 和 3m 的低水与高水 2 个处理群体密度间差异达到极显著水平($p = 0.01$),而地下水埋深为 4m 的 2 个处理群体密度间差异达到显著水平($p = 0.05$)。表明地下水埋深和灌水量都对冬小麦群体密度有影响。

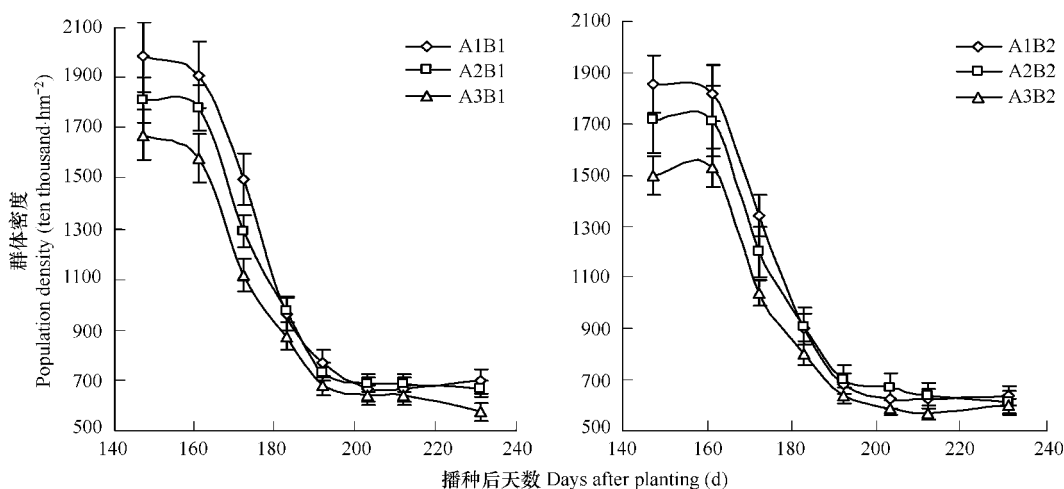


图 5 不同地下水埋深相同灌水量冬小麦群体密度

Fig. 5 Plant density of winter wheat with the same irrigation amount under different groundwater table

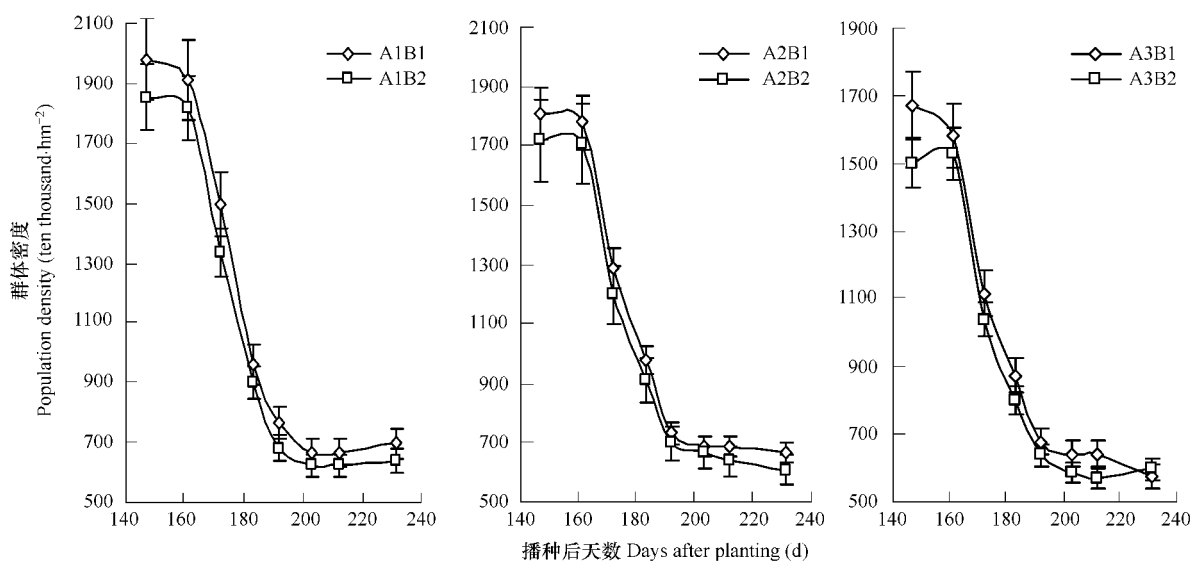


图 6 相同地下水埋深不同灌水量冬小麦群体密度

Fig. 6 Plant density of winter wheat with different irrigation amount under the same groundwater table

2.4 对于物质质量的影响

由表 3 可以看出,冬小麦低水处理地下水埋深为 2m 的干物质积累量最大,低水处理地下水埋深为 4m 最小。2m 地下水埋深时,低水处理的干物质积累量大于高水处理,而 3m 和 4m 地下水埋深与 2m 相反。灌水量相同时,低水处理的干物质积累量由大到小的顺序为:埋深 2m > 埋深 3m > 埋深 4m,高水处理的干物质积累量由大到小的顺序为:埋深 2m > 埋深 4m > 埋深 3m,由方差分析可知,灌水量相同时各处理之间差异达到显著水平($p = 0.05$),说明地下水埋深对冬小麦的干物质质量影响较大。

2.5 对产量的影响

各处理冬小麦实际产量(以下简称产量)见表 3。灌水量相同时,地下水埋深是影响冬小麦产量的主要因

素。高水处理中,3m 地下水埋深的产量最大,其次为 4、2m。低水处理的产量随地下水埋深增大而减小,低水 2m 地下水埋深的产量最大,低水 4m 地下水埋深的产量最小。相同地下水埋深条件下,各处理产量的对比结果为:低水 2m 埋深 > 高水 2m 埋深,高水 3m 埋深 > 低水 3m 埋深,高水 4m 埋深 > 低水 4m 埋深。由方差分析可知,灌水量相同时各处理之间差异达到显著水平($p=0.05$)。从水分利用效率看,地下水埋深相同时,低水处理的水分利用效率都大于高水处理;相同灌水量条件下,低水处理中 2m 地下水埋深的水分利用效率最大,高水处理中 3m 地下水埋深水分利用效率最大。

表 3 不同处理干物质质量、实际产量、灌溉水利用效率表
Table 3 Dry matter and Actual Yield and WUE of different treatments

试验处理 Experiment treatment	干物质产量 Dry matter yield(kg·hm ⁻²)	实际产量 Actual yield(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 WUE (kg·m ⁻³)
A ₁ B ₁	19404.70a	8573.10a	1.63
A ₁ B ₂	18556.25b	7388.73b	1.19
A ₂ B ₁	15177.68c	7314.80c	1.52
A ₂ B ₂	18550.42a	7912.73c	1.27
A ₃ B ₁	14963.29c	7115.13a	1.48
A ₃ B ₂	16951.75b	7603.13b	1.22

表中小写字母相同表示在 0.05 水平上差异显著性 The same small letters in the table indicate difference significant at 0.05 level; 下同 the same below

2.6 土壤中硝态氮的变化

灌水前后不同灌水量和潜水埋深 0 ~ 200cm 土层土壤 NO₃⁻-N 含量变化详见表 4、表 5。由表 4、表 5 知,灌前各土层中 NO₃⁻-N 含量维持在 3 ~ 10mg·kg⁻¹,灌后 10d 后,0 ~ 200cm 土层中 NO₃⁻-N 的平均含量均显著增加,灌水水平 B₁,不同潜水埋深 0 ~ 200cm 土层灌水后硝态氮含量平均增加了 11.65、24.57、25.07 mg·kg⁻¹;灌水水平 B₂,不同潜水埋深 0 ~ 200cm 土层灌水后硝态氮含量平均增加了 18.88、42.57、48.84 mg·kg⁻¹。相同潜水埋深对比分析表明,灌水水平越高,0 ~ 200cm 土层土壤 NO₃⁻-N 增加越多;相同灌水水平对比分析表明,潜水埋深越深,0 ~ 200cm 土层土壤 NO₃⁻-N 增加越多。

表 4 灌水前后各处理 0 ~ 2m 土层 NO₃⁻-N 含量平均值
Table 4 The nitrate average values of different soil layer before and after sewage irrigation(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	平均 Average				
	灌前 BI	灌后 1d AI	灌后 2d AI	灌后 5d AI	灌后 10d AI
A ₁ B ₁	4.90d	5.10c	4.68e	12.54b	16.55a
A ₂ B ₁	5.27d	4.79e	7.23c	14.08b	29.84a
A ₃ B ₁	7.78d	6.84e	9.41c	21.61b	32.85a

BI: before irrigation, AI: after irrigation;下同 the same below

表 5 灌水前后各处理 0 ~ 2m 土层 NO₃⁻-N 含量平均值
Table 5 The nitrate average values of different soil layer before and after sewage irrigation(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	平均值 Average				
	灌前 BI	灌后 1d AI	灌后 2d AI	灌后 5d AI	灌后 10d AI
A ₁ B ₂	9.10c	4.94e	7.28d	18.64b	27.99a
A ₂ B ₂	4.61d	3.48e	9.19c	11.49b	47.18a
A ₃ B ₂	5.08e	5.83d	9.55c	12.38b	53.92a

2.7 土壤中铵态氮的变化

不同处理灌水前后土壤中 NH₄⁺-N 含量随土层深度分布见图 7 ~ 图 9。由以下图可知,灌水后,灌溉水中

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 大部分被土壤吸附,少量的 NH_4^+ 离子可通过大孔隙向下渗漏,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速增大;灌灌后第 2 天,由于土壤的交替吸附及硝化作用等因素,土壤的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量迅速下降;灌灌后第 5 天,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 基本转化完;灌灌后第 10 天,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量基本维持在灌前水平。总的来说,不同潜水埋深污水灌溉对土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量影响并不明显。

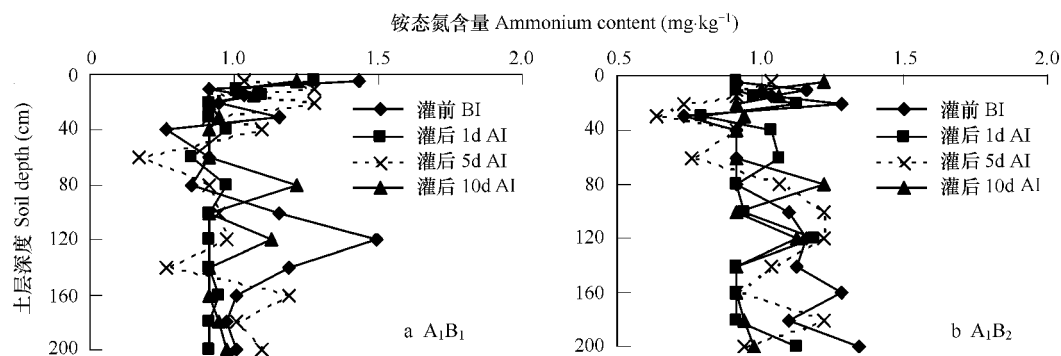


图 7 潜水埋深 2m 不同灌水水平灌水前后土壤铵态氮的变化

Fig. 7 Soil ammonium change of different irrigation under groundwater depth 2m

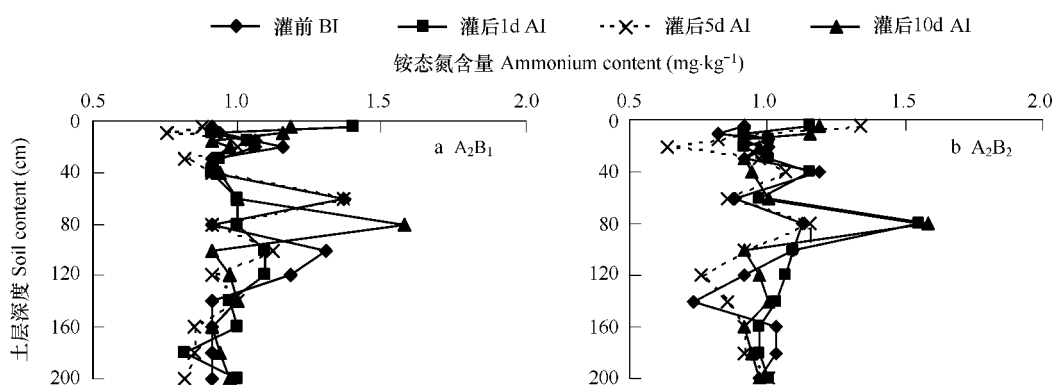


图 8 潜水埋深 3m 不同灌水水平灌水前后土壤铵态氮的变化

Fig. 8 Soil ammonium change of different irrigation under groundwater depth 3m

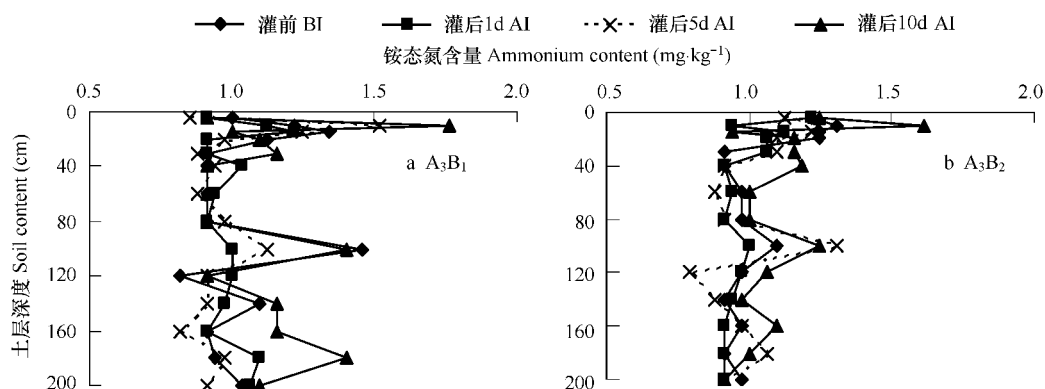


图 9 潜水埋深 4m 不同灌水水平灌水前后土壤铵态氮的变化

Fig. 9 Soil ammonium change of different irrigation under groundwater depth 4m

2.8 土壤溶液及地下水中硝态氮的变化

灌水前后,不同潜水埋深土壤溶液及地下水中 NO_3^- -N 浓度随土层深度分布见图 10。灌溉后,6 种处理土壤溶液及地下水中 NO_3^- -N 浓度分别增加了 5.50、53.92、16.84、21.61、11.64、17.88 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。相同潜水埋深,灌水水平越高,土壤溶液及地下水中 NO_3^- -N 浓度增加越多,反之,土壤溶液及地下水中 NO_3^- -N 浓度增加越少。这就表明:灌水定额越大,土壤溶液及地下水中 NO_3^- -N 增加越多。灌水水平 B_1 ,不同潜水埋深条件下地下水 NO_3^- -N 分别增加了 34.67%、24.94%、20.88%。灌水水平 B_2 ,不同潜水埋深条件下地下水 NO_3^- -N 分别增加 58.42%、38.98%、27.21%,见表 6。相同灌水水平,潜水埋深越深,地下水中 NO_3^- -N 的浓度增加越小;潜水埋深越浅,地下水中 NO_3^- -N 的浓度增加越大,地下水中 NO_3^- -N 的变化规律与土壤 NO_3^- -N 的变化趋势相反,也就是说,土壤中 NO_3^- -N 变化趋势验证了地下水中 NO_3^- -N 的改变。同时也表明:灌水水平相同,潜水埋深越浅,由于淋溶和硝化作用产生的 NO_3^- -N 造成浅层地下水污染的风险越大。

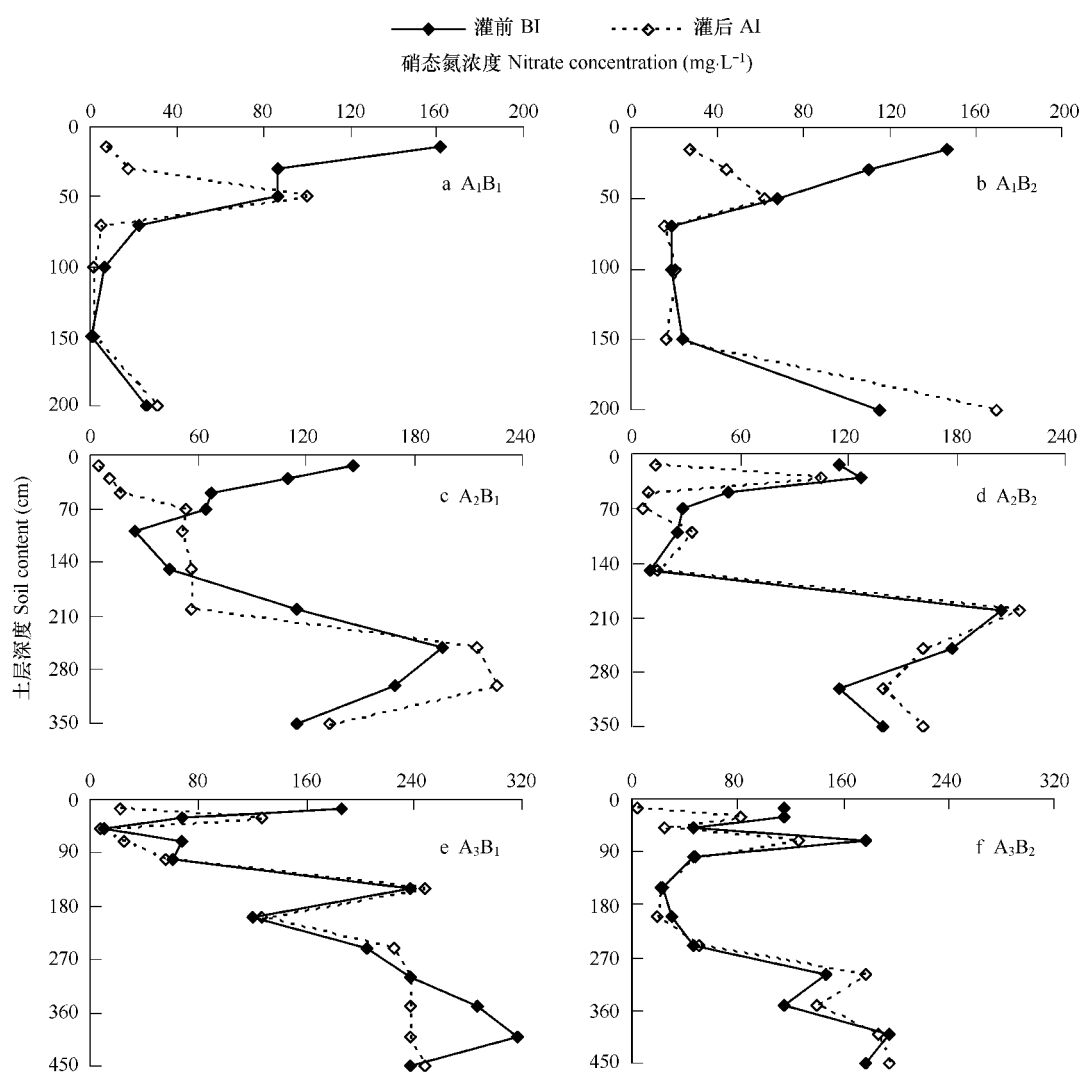


图 10 各处理灌水前后土壤溶液及地下水硝态氮分布

Fig. 10 Soil solution and groundwater nitrate distribute before and after irrigation

3 结论和讨论

污水灌溉对冬小麦的生长发育有促进作用,尤其对叶面积指数、干物质积累量和产量的影响较大。表明污水灌溉补充了土壤中的营养元素,对冬小麦叶片生长有促进的作用。相同灌水量和施肥条件下,地下水埋

深 2m 对促进冬小麦的各生育指标的增长最有利。其原因是由于各处理的土质与作物相同,灌水后土壤的下渗通量可以认为是相同的,随着土壤水下渗、作物根系吸水和土面蒸发,根区储水量逐渐变小,下渗通量转变为向上的补给通量,即地下水通过毛管上升作用向根区补水,地下水埋深越小,在毛管吸力和蒸腾拉力的作用下,土壤水分运移越活跃,越有利于冬小麦对水分和养分的吸收利用,埋深为 2m 地下水通过毛管向根区补水的距离短,地下水较容易被作物吸收利用,因而导致了 2m 地下水埋深处理的冬小麦叶面积指数最大^[19]。

表 6 灌水前后不同处理地下水硝态氮含量

Table 6 Groundwater nitrate concentration change before and after irrigation

处理 Treatment	A1B1		A2B1		A3B1	
	Date 3. 17	Date 3. 31	Date 3. 17	Date 3. 31	Date 3. 17	Date 3. 31
地下水 Groundwater (mg·L ⁻¹)	26.01b	31.51a	115.18b	133.02a	236.63b	248.27a
处理 Treatment	A1B2		A2B2		A3B2	
	Date 3. 17	Date 3. 31	Date 3. 17	Date 3. 31	Date 3. 17	Date 3. 31
地下水 Groundwater (mg·L ⁻¹)	115.18b	169.10a	139.56b	161.17a	177.42b	195.29a

表中小写字母相同表示在 0.05 水平上差异显著性 The same small letters in the table indicate difference significant at 0.05 level

不同地下水埋深、不同水质和不同灌水水量对冬小麦抽穗前的群体密度影响较大;相同地下水埋深条件下,低水处理比高水处理更能促进冬小麦的叶面积指数及株高的增长。2m 地下水埋深条件下,低水处理比高水处理更能促进冬小麦干物质积累量和产量的增加。这是由于当地下水埋深较浅时,高水处理有可能使作物根区土壤含水量过大,使小麦产生渍害,从而影响了小麦生长^[19]。

污水灌溉后,各土层中硝态氮的含量均显著增加。相同灌水水平对比分析表明,潜水埋深越深,0~200cm 土层土壤 NO₃⁻-N 平均含量增加越多;潜水埋深越浅,地下水中硝态氮浓度增加越大,由于淋溶和硝化作用产生的 NO₃⁻-N 造成浅层地下水污染的风险越大。地下水中 NO₃⁻-N 的变化规律很好地验证了土壤 NO₃⁻-N 的变化趋势。相同潜水埋深对比分析表明,灌水水平越高,0~200cm 土层土壤 NO₃⁻-N 增加越多,地下水中硝态氮浓度增加越大。其原因是由于硝态氮的淋溶主要受灌水量、地下水埋深、土壤含水量及土壤中残留的硝态氮等因素的制约。地下水埋深较浅(<5m),土壤水和地下水有双向交换作用^[12],地下水埋深的不同,势必影响到氮素在土壤-地下水系统中的运移。灌水后,灌溉水中 NO₃⁻-N 随水运移到各个土层,各土层中硝态氮的含量均显著增加;地下水埋深较浅,100~200cm 土壤含水量一直保持较高水平,土水势能较高,不利于灌溉水向较深土层运移,也减少硝态氮向下层土壤淋洗;反之,地下水埋深较深,虽然土壤水与地下水由毛管力作用存在双向交换,但不足以影响 100~200cm 土层土壤含水量,0~200cm 土层土水势梯度较大,有利于土壤水向下层运移,土壤水中 NO₃⁻-N 随土壤水运移到土壤下层,增加了硝态氮向下层土壤的淋洗。因此,相同灌水水平,潜水埋深较大条件下有利于硝态氮向下层土壤迁移;相同潜水埋深条件下,灌水水平较高,硝态氮向土壤下层淋溶风险较高。

References:

- [1] Feng S Y, Qi Z M. Field Experimental study on the residue of heavy metal in summer corn. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(6): 9-13.
- [2] Feng S Y, Shao H B. Field Experimental study on the residue of heavy metal in wheat crop. *Transactions of the SCAE*, 2002, 18(4): 113-115.
- [3] Qi Z M, Feng S Y, Huang G H. Experimental study on effects of irrigation water quality on plant growth of summer corn. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, (22): 36-38.
- [4] Meng L, Zuo Q. Effects of reclaimed wastewater irrigation on distributions of root-length-density and root-water-uptake-rate in winter wheat. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(4): 25-29.
- [5] Qiao L, Gong H L, Zhao W J. Research on application of reclaimed water for agriculture irrigation. *Water Saving Irrigation*, 2005, (4): 13-15.
- [6] G A Al-Nakshabandi, M M Saqqar, M R Shatanawi, etc. Some environmental problems associated with use of treated wastewater for irrigation in Jordan. *Agricultural Water Manage*, 1997, (34): 81-94.

- [7] O·AI-Lahham, N M ElAssi, M Fayyad. Impact of treated wastewater irrigation on quality attributes and contamination of tomato fruit. *Agricultural Water Management*, 2003, (16): 50—65.
- [8] A Pollice, A Lopez, G Laera, etc. Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. *Science of the Total Environment*, 2004, 324: 201—210.
- [9] Armon R, Gold D, Brodsky M, Oron G. Surface and subsurface irrigation with effluents of different qualities and presence of *Cryptosporidium* in soil and on crops. *Water. Science and Technology*, 2002, 46(3): 115—122.
- [10] Smith C L, Hopmans P, Cook F J. Accumulation of Cr, Pb, Cu, Ni, Zn and Cd in Soil Following Irrigation with Treated Urban Effluent in Australia. *Environmental Pollution*, 1996, (94): 317—323.
- [11] Ragab R, Pearce G, Kim J C, etc. Proceeding of International Work shop on Wastewater Reuse Management. Seoul, Korea: 2001: 137—146.
- [12] Lei Z D, Yang S X, Ni G H, etc. Water continuum feature in response to the type of groundwater level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, (2): 1—6.
- [13] Bergstrom L. Nitrate leaching and drainage from annual and perennial crops in tile-drained plots and lysimeters. *Journal of Environmental Quality*, 1987, (16): 11—18.
- [14] Lord E. Modeling of nitrate leaching: nitrate sensitive areas. *Aspects of Applied Biology*, 1992, (30): 19—28.
- [15] Ge L, Aly E. A lumped parameter model for nitrogen transformation in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 1998, 34(2): 203—212.
- [16] Cavazza L, Rossi Pissa P. Effect of water table depth and water logging on crop yield. *Agricultural Water Management*, 1988, 14(1): 29—34.
- [17] Yang J F, Wan S Q. Crop developing influence of groundwater. *Water Saving Irrigation*, 2002, (2): 36—38.
- [18] Ba B J, Zheng D W, Jia Y M. Influence of water table on the soil water variation and crop yield of winter wheat field. *Water Saving Irrigation*, 2004, (5): 5—9.
- [19] Kang L Q, Qi X B, Ma Y G, etc. Effects of reclaimed water irrigation on winter wheat growth under different groundwater tables. *Transactions of the SCAE*, 2007, 23(6): 95—100.

参考文献:

- [1] 冯绍元, 齐志明. 重金属在夏玉米作物体中残留特征的田间试验研究. *灌溉排水学报*, 2003, 22(6): 9—13.
- [2] 冯绍元, 邵洪波. 重金属在小麦作物体中残留特征的田间试验研究. *农业工程学报*, 2002, 18(4): 113—115.
- [3] 齐志明, 冯绍元, 黄冠华. 清、污水灌溉对夏玉米生长影响的田间试验研究. *灌溉排水学报*, 2003, (22): 36—38.
- [4] 孟雷, 左强. 污水灌溉对冬小麦根长密度和根系吸水速率分布的影响. *灌溉排水学报*, 2003, 22(4): 25—29.
- [5] 乔丽, 宫辉力, 赵文吉. 再生水农业灌溉的研究. *节水灌溉*, 2005, (4): 13—15.
- [12] 雷志栋, 杨诗秀, 倪广恒, 等. 地下水埋深类型与土壤水分动态特征. *水利学报*, 1992, (2): 1—6.
- [17] 杨建锋, 万书勤. 地下水对作物生长影响研究. *节水灌溉*, 2002, (2): 36—38.
- [18] 巴比江, 郑大玮. 地下水埋深对冬小麦田土壤水分及产量的影响. *节水灌溉*, 2004, (5): 5—9.
- [19] 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. *农业工程学报*, 2007, 23(6): 95—100.