

Y 938318

分类号：
密 级：

单位代码：10019
学 号：s041014

中国农业大学

学位论文

不同污灌年限土壤对玉米生长 影响的试验研究

**Experimental Study on Growth of Maize under
Different Sewage Irrigation Years Soil**

研 究 生：胡 盛 年

指 导 教 师：任树梅 教授

申请学位门类级别：工 学 硕 士

专 业 名 称：农业水土工程

研 究 方 向：水土资源与环境

所 在 学 院：水利与土木工程学院

2006年06月

摘要

为研究再生水灌溉利用对作物和土壤的影响，特针对北京历史污灌区土壤进行了理化分析和对夏玉米进行了盆栽试验研究，主要研究内容有：（1）历史污灌区土壤理化性质分析与适耕性评价；（2）历史污灌区土壤污染物在栽培条件下的迁移转化特征；（3）再生水灌溉对盆栽玉米生长的生物学特性影响。结果表明：

1. 污灌区各土层土壤容重均较大，土壤总孔隙率都低于作物生长适宜的程度。各污灌区土壤中 Na^+ 、 Cl^- 、EC 值并不太高，但均有随着深度的增加而增加的趋势。各区土壤 pH 值大于或接近 8.5，这有可能使土壤发生碱化。

2. 不同污灌年限土壤对夏玉米生长有一定的影响。污灌近30年的大兴区和污灌近40年的朝阳区玉米长势较好，但污灌近50年的石景山区玉米生长缓慢，各生物学指标与其他处理存在明显差异，说明石景山区土壤已经受到一定程度的污染。不同污灌年限土壤没有对玉米品质产生明显的影响。

3. 再生水能促进通州区玉米的生长。再生水灌溉对各污灌区玉米的某些生长指标产生明显的不利影响，但对产量和品质影响不大，所以可以利用再生水灌溉污灌区。

关键词：不同污灌年限土壤，再生水，盆栽试验，夏玉米

Abstract

The summer corn potted experiment was carried and the different sewage irrigation years soil of Beijing was analyzed for treated sewage irrigation study. The content of experimentation includes:

(1)The physical and chemic analyse on soil irrigated with sewage for many years;(2)The influence of contamination in different sewage irrigation years soil on summer corn;(3) The influence of treated sewage irrigation on biology characteristic of summer corn. Experimental results indicated:

1.The density of different sewage irrigation years soil was larger.The porosity was too low to crop's growth. The value of Na^+ was not large,but it increased along with increase of depth.So did Cl^- and EC.The value of pH was close to 8.5 and would depress the soil quality.

2. The soil of Daxing district (irrigated with sewage for 30 years approximately) promoted the growth of summer corn, The soil of Chaoyabng district (irrigated with sewage for 40 years approximately) promoted the growth of summer corn,too.But the corn painted in Shijingshan district (irrigated with sewage for 50 years) grewed slowly.It indicated the soil of Shijingshan district had been polluted seriously. The different sewage irrigation years soil had slight effect on quality of summer corn.

3.Irrigating with treated sewage promoted the growth of summer corn plantted in Tongzhou soil and restrained the summer corn plantted in different sewage irrigation years soil.Because the treated sewage had slight effect on quality and yield of summer corn,so we can irrigate with treated sewage instead of clean water.

Key words: Different sewage irrigation years soil, Treated sewage, Potted experiment, Summer corn

独创性声明

本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下(或我个人.....)进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得中国农业大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生签名: 胡益年

时间: 2006年06月19日

关于论文使用授权的说明

本人完全了解中国农业大学有关保留、使用学位论文的规定,即:学校有权保留送交论文的复印件和磁盘,允许论文被查阅和借阅;学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容,可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后应遵守此协议)

研究生签名: 胡益年

时间: 2006年06月19日

导师签名: 任树梅

时间: 2006年6月19日

第一章 绪论

1.1 研究背景

我国是一个水资源不足的农业大国,人均水资源占有量不足世界的1/4,居世界第109位,被联合国列为13个缺水国家之一。首都北京市水资源紧缺情况也极为严重,人均水资源占有量不足 300m^3 ,仅为全国人均值的1/8,世界人均值的1/30,远低于国际公认的人均 1000m^3 的缺水下限^[1]。20世纪80年代以来的连续干旱,北京境内降水不足,境外来水大幅度减少,更加剧了水资源紧缺的形势,多年来只能靠超采地下水来维持供需平衡。北京市农业用水占50%左右,是第一用水大户,为节约水资源,多年来进行了长期的农业节水的研究与示范推广,大力发展节水灌溉,并取得了很大成效。截止到2000年底,北京市已有节水灌溉面积 27万hm^2 ,占全市总灌溉面积的70.4%。虽然农业用水由1980年 32亿m^3 下降到2001年 16亿m^3 ,但是,水资源的不足仍然制约了北京市国民经济特别是郊区农村经济的发展。据预测,到2010年遇平水年将缺水 11.82亿m^3 ,遇枯水年将缺水 16.41亿m^3 ^[1]。为了缓解水资源的供需矛盾,有关方面正在积极寻求开辟新水源的途径。再生水具有不受气候影响、不与临近地区争水、就地可取、稳定可靠、保证率高等优点,是一个潜在的新水源^[3]。根据《北京城市总体规划》,北京市于2010年将建成13座集中式污水处理厂,污水厂处理能力将达到 $335\text{万}/\text{d}$,年再生水可利用量为 12亿m^3 ^[2],再生水的合理有效利用无疑将对缓解北京市水资源紧缺状况起到重要作用。

随着北京市水环境治理力度的加大和市政污水处理基础设施建设的加快,污水处理率越来越高,再生水(污水处理厂处理达标水,一般为II级处理)量也越来越大。目前,北京市再生水利用于各行业进展较慢,尤其是应用于农田与城市绿地灌溉方面,利用量仅为处理量4%,具有较大的应用潜力。将再生水用于农田灌溉具有许多优点,一方面再生水中大多含有比较丰富的有机物质,他们在一定条件下分解,能为农作物提供可利用的氮磷等多种养分,作物增产效果明显,另一方面可替代抽取的地下水,减少地下水开采,延缓地下漏斗区的发展,并可将原来用于灌溉的地下水源用于饮用水源,体现水的优质优用,实现水资源质与量两方面的优化配置。

1.2 研究的目的和意义

再生水灌溉是一个世界性的尝试。利用再生水灌溉不仅能提供灌溉所需要的水资源,能缓解干旱缺水的供需矛盾,而且也为农业生产提供了一定的营养物质,促进作物生长^[3-6],但限于经济及技术原因,污水中污染物质并没有完全去除掉,再生水中丰富的N、P元素、较高的全盐含量、多种毒性痕量物质(重金属、有机污染物等)以及病原体可能会成为新的污染源,这些有害物质可能对作物品质和土壤造成不利影响^[7]。因此,进一步深入研究再生水灌溉利用对作物、土壤与水体水质影响,防止再生水灌溉引起新的面源污染,提出实现再生水安全灌溉利用的技术路线,是一项必要而紧迫的任务。

1.3 污水灌溉国内外研究进展

1.3.1 国内外污水灌溉的发展状况

我国污水灌溉开始于1957年,到目前已有40余年的历史。污水灌溉的发展过程主要随着工业及城市废污水排放量的增加及农业用水危机的加剧而增加的。大体经历了起步、稳定和快速发展三个阶段。

第一个阶段是从20世纪50年代末至60年代初,当时国内对环境问题认识不深,普遍认为污水灌溉既可为农业增加水肥资源,又可给工业废水找到出路,应当大力发展。由于当时废污水排放量不大,到1963年全国污灌面积仅有4.2万 hm^2 ,污灌对农村水环境的影响不明显。

第二个阶段是从60年代后期到70年代中期,环境问题逐步引起了社会的关注,人们普遍认为污水灌溉造成的水、土、粮污染开始产生怀疑。但由于废污水排放量日益增多,以及农业用水日渐紧张,许多大、中城市近郊和工矿区附近的农田越来越多地利用污水灌溉。到1976年全国污灌面积已增加到18.0万 hm^2 。

第三个阶段开始于70年代后期,随着国民经济的快速增长,城市及工业废污水排放量迅猛增加,污水灌溉面积也随之迅速扩大。1980年全国污灌面积已达133.3万 hm^2 ,1991年发展到306.7万 hm^2 ,年均增长11.5%。由于大部分废污水未经处理直接用于灌溉,不仅造成了部分农田严重污染,而且对农村水环境构成了威胁。

污水灌溉在世界历史中的发展大致也经历了发展、停滞和再发展3个阶段。目前污水灌溉比较发达的有以色列、澳大利亚、美国、日本等国家。美国在1962年污灌水量就已达 $3.68 \times 10^6 \text{m}^3$,目前已建成3400多个污水再利用工程,全国50个州中有45个州采用处理后的污水进行灌溉,同时开展了广泛研究,并制定了切实可行的卫生条例^[8]。苏联1957年污灌面积为 $1.15 \times 10^4 \text{hm}^2$,随后也是迅速发展,到1980年就超过 $7.0 \times 10^4 \text{hm}^2$,全国约50%的污水用于农田灌溉。继美国、苏联之后,世界上其它发达国家也积极开展了污水灌溉研究。尤其是以色列,由于水资源严重不足,自1972年制定了“国家污水再利用工程”计划后,开始了大规模污水再利用,该国91%的工业和生活污水由下水道收集,65%的污水经过了净化处理后回用于农业灌溉和园林灌溉^[9]。鉴于国内水资源紧缺形势,意大利也制订了农业用水应优先使用再生水的相关规定^[10]。位于地中海北部的塞浦路斯为解决国内水资源贫乏的状况,把再生水作为替代水源用来浇灌高尔夫球场、回灌地下,甚至用来灌溉蔬菜等作物^[11]。与发达国家相比,经济欠发达国家污水灌溉起步较晚。但随着城市发展,也开始重视污水灌溉。特别是在水资源严重短缺的北非和中东,不少国家如埃及、突尼斯、沙特阿拉伯、阿曼、科威特、巴林、摩洛哥、伊朗、苏丹等将污水视为较可靠的资源,利用污水灌溉公园、草坪、谷物、防护林,甚至灌溉蔬菜^[12]。为了改进农村生活环境和水质,日本从1997年开始实行农村污水处理计划,到目前为止,已建成约2000个污水处理厂,而且多数采用日本农村污水处理协会研制的JARUS小型污水处理系统,处理过的废污水各项指标都达到污水处理水质标准。处理后的污水水质稳定,多数是引入农田进行灌溉水稻或果园。捷克共和国小城镇中的居民比较多,从这些地区排出来的废污水经过物理净化或生化处理后即用于农田灌溉^[13]。当前的研究内容主要包括对有关灌溉标准及其他相关环境标准的研究和制定;发展有关的污水灌溉技术如

喷灌、滴灌等；污水灌溉下环境污染的机理研究等。目前的研究成果基本上多为经验性和纯理论的，距离指导实际的污水灌溉还有一定的距离。

1.3.2 国内外污水灌溉研究成果

近年来，中国科学院沈阳应用研究所科技人员在国家环保局的组织下，研究编写了《城市污水土地处理技术指南》；北京市农林科学院有关科技人员，在多年调查研究的基础上，编著了《北京市污水农业利用区划的研究》；农业部环保所、河海大学、水利部农田灌溉所等单位对污水灌溉进行了一些试验研究。主要研究进展如下：

(1) 土壤—植物系统对污水中有机污染物及金属、非金属元素的净化作用

污水中的有机污染物通常用 BOD、COD、SS、TN、TP 等指标来表示，这些指标在土壤—植物系统中下降，说明土壤—植物系统有净化效果。1990 年农业部环保所的试验结果表明：土壤—植物系统通过土壤吸持、作物吸收和地下淋溶的作用，对污水中的有机污染物有很强的净化能力 [14]。

目前，有机物污染物对土壤污染的研究主要侧重于污染机理和治理方法上，主要研究了吸收有机污染物的土壤物质类型、有机污染物进入土壤有机质的方式、土壤有机质成分对有机污染物吸收的影响、有机污染物对土壤有机质吸收量的影响以及有机污染物分配理论。有机污染物污染土壤的治理方法也是研究热点，长期连续的污水灌溉土壤对有机污染物的净化能力也会降低，应采取定期污水休灌等方式恢复土壤的净化能力。

对重金属污染的主要侧重于其在土壤—植物系统的分配规律研究以及土壤重金属污染的植物修复技术方面。重金属在作物体内的分布国内外进行了大量的研究。Cd 和 Zn 在小麦、玉米、水稻各器官的残留累积量中以根最高，茎叶居中，子粒中的含量远远低于根系中的含量，根对 Cd 和 Zn 的吸收量分别占总吸收量的 70%~80%，58%~68%，子实分别占 1%~10%，9%~25%。水稻和小麦等各器官对 Pb 和 As 富集的特点与镉相似：根>茎叶>子粒。资料表明，根对 Pb、As 的吸收量分别占总吸收量的 98% 和 88%~98%，子实占 0.01%~0.3% 和 0.02%~0.3%。但水田作物比旱地作物(花生)吸收累积的 As 高得多。小麦各器官对 Hg 吸收也呈现根>茎叶>籽粒的规律，其质量比率为 30:3:1^[15-18]。Cu 元素的富集情况与 Zn 相似，它的迁移能力居中，在同等浓度下，作物种类不同，其所吸收重金属的量也有差异。小麦，大豆易吸收土壤中的重金属，并向地上部迁移，其子实中重金属含量明显比其它作物体内的含量多。而玉米茎叶吸收重金属的能力较强，玉米是高秆作物，重金属向作物籽实的迁移能力较弱。水稻吸收重金属大部分累积在根部。作物吸收重金属所表现出的差异主要是由于不同作物其生理特性及遗传差异所致。

(2) 污灌对土壤污染及土壤肥力的影响

长期污灌会对土壤理化性质、土壤生物和土壤环境造成很大影响^[19-21]。由于土壤—植物系统对污水中有机污染物及金属元素具有较强的净化作用，所以在一定限度或痕量范围内不会造成土壤污染。现实的问题是，尽管国家颁布了《农田灌溉水质标准》，但实际上灌溉水质处于无人监管状态，灌溉部门没有按标准检验把关。一些地区长期进行超标污水灌溉，土壤中的有机污染物及重金属含量大大超过了土壤吸持及作物吸收能力，必然造成土壤污染。1982 年农业部门对 37 个污灌区的调查结果表明土壤重污染面积占 8.4%。对济南等污灌区的调查结果表明，污水灌区与

清水灌区的土壤养分并无明显差异。通过对济南北郊污水灌溉土壤动物群落的调查发现,土壤动物群落的结构和种群分布形式受到土壤污染的影响:土壤动物的群落结构衰退,多样性和均匀度下降,垂直分布出现逆分布型^[22]。

(3) 污灌对作物产量及品质的影响

污灌能否增产是人们普遍关心的问题。北京市利用城市混合性污水,适时定量地进行了小麦污水与清水灌溉的对比试验,结果表明,污水灌区比清水灌区增产 6.5% 和 8.7%^[23]。同时,他们指出,在利用城市污水灌溉作物时,除了应控制金属、非金属和有毒有害物质的含量外,还应适量控制有机污染物的浓度,并要避免大水污灌。粮食蔬菜品质一般指其营养成分,通常用蛋白质、氨基酸、维生素、纤维素、还原糖等含量的多少来表示。关于污灌对蛋白质含量的影响,目前有两种看法,一种是污灌降低了麦稻蛋白质含量,而且随着污灌年限的增加,麦稻品质逐年下降,另一种看法是,在一般情况下污水灌溉后粮食内蛋白质是增加的,只有在田间管理不当或污水水质特差的情况下可能引起粮食内蛋白质下降^[24]。对此尚需进一步研究。关于污灌对蔬菜的影响,有研究表明污灌会明显降低维生素 C 的含量,其它营养成分则有增有降,因此,他们主张不宜用污水灌溉蔬菜^[25]。山西大学周纪侃等^[26],对太原市南郊 4 种不同水质灌溉的 14 种蔬菜中 N、Fe、Zn、Mn 含量进行了测定,探讨污水灌溉对以上几种营养成分含量的影响,结果表明,水质对蔬菜含氮量有明显影响,Fe、Zn、Mn 的含量则主要取决于蔬菜品种。太原市水科所马吉珍^[27],研究了污水灌溉、污泥施用对农作物的影响,结果表明,污水灌溉和污泥施用会导致农作物有害物质含量的增加,直接威胁到人体健康。宁夏农业环境保护监测站孙正风等^[28],对污水灌溉后对农产品质量的分析研究表明,污水灌溉已造成农产品中部分有毒重金属积累升高的趋势。污灌研究从大规模的田间调查,后回到盆栽的定性定量研究,也从单一重金属元素的污染研究拓展到探索多种重金属元素的复合污染对作物的生理毒害,研究的作物也从林木、草坪草、蔬菜、经济作物扩展到粮食作物^[29]。宁夏农科院土肥所的马云瑞等^[30]利用污染综合指数为 23.3 的甜菜制糖工业污水进行春小麦和蔬菜的灌溉,结果表明,污灌使小麦减产,1/3 污水掺灌也使蔬菜减产。

(4) 有关污灌水源及污水灌溉技术的研究

目前污灌水源可分为城市混合污水、石化废水和工矿废水三类。根据 1982 年农业部对全国 37 个污灌区的调查结果,灌溉污水水质普遍不符合灌溉水质要求。从污灌区作物产量看,在城市混合污水和石业、淀粉行业、酿造发酵行业所排放的废水等。不可利用的污水有:医药、生物制品、化学试剂、农药、石油炼制、焦化和有机化工等行业的废水。有关污水灌溉技术,目前的研究资料很少,总的原则是:污水灌溉的灌水量、灌水次数及灌水时期不能象清水灌溉那样根据作物需水量来决定,应当充分考虑水质、土壤环境状况及作物种类等^[14]。根据北京污灌区(大部分是清污混合性灌区、轮灌或间歇污灌区)的试验研究结果,小麦每年污灌 2~4 次,占总灌水量的 35% 比较适宜,同时建议全国开展主要农作物污水灌溉技术的研究,提出不同污水类型、不同土壤条件下主要作物污灌方式、灌水次数、最佳灌溉时间及灌溉定额,实现适度科学的污水灌溉^[31]。

1.3.3 对历史污灌区评价

人们对历史污灌区展开了大量的调查研究。20 世纪 90 年代初期对上海污灌区的研究结果表明,上海市蔬菜受到重金属污染,尤以 Cd 和 Pb 污染为甚,而上海市宝山区菜区土壤也受到了不同

程度的污染^[32]。周锡爵等^[33]介绍了沈阳张士灌区Cd污染状况,对已污染的农田提出了几个需要解决的实际问题。王堪甲等^[34]研究了西安市污灌区农业生态环境问题,并提出了解决方法。王春等^[35]调查、评价了会理污灌区内水、土、作物的重金属污染状况。李其林等^[36]对重庆市近郊蔬菜基地土壤和蔬菜中重金属的质量现状进行了检测和评价。孙华等^[37]对江西省贵溪市污灌水田重金属污染状况进行了评价研究。朱桂珍^[38]对北京市东南郊污灌区土壤环境重金属污染现状进行了评价以及提出了防治对策。冀秉信^[39]对太原市污水灌溉现状进行了调查研究。王凯荣^[40]对我国农田污染现状及其治理对策进行了研究。古智生等^[41]对广东等地的污灌可行性进行了论证,并对广州市菜区土壤污染情况进行了评价。孙志强^[42]通过对石家庄市污水灌溉区的实地调查,研究污水灌溉对土壤肥力、作物籽粒重金属含量的影响。孙正风^[43]对宁夏三个污水灌区的灌溉水质、土壤、农产品质量进行分析评价研究,研究表明:污灌区污水以有机质类污染为主,其中盐分含量高,水质不符合农田灌溉水质标准,用其灌溉的土壤盐分有不同程度的增加,土壤环境质量有下降趋势,农作物中有毒有害重金属无超标现象,但在籽粒中有升高的趋势。徐震等^[44]在对天津市污灌区分布调查研究的基础上,得出由于长期污水灌溉的结果,土壤受到不同程度的重金属污染。澳大利亚James Cook大学和北京林业大学的胡先登、韩烈保^[45]通过对Queensland省Townsville镇的调查,提出了污灌区可持续发展的灌溉制度。李森照等^[46]在多年研究成果的基础上,出版了《中国污水灌溉与环境质量控制》一书,就中国污水灌溉做了较为全面的阐述。主要内容包括中国污水灌区的分布、污水灌溉类型和区划,以及污水灌溉对农田生物、地下水 and 地表水的影响和污染物的迁移;污染物在作物、土壤中的残留累积规律及其预测。

1.3.4 再生水灌溉利用研究成果

科研人员对再生水灌溉条件下土壤理化性状的开展了大量研究工作,可能由于污水来源或污灌历时不同,所得到的研究成果存在一定差异,有的研究表明污灌对土壤理化性状没有什么影响,大部分研究表明污灌能改善土壤有机质,提高土壤肥力,同时造成土壤盐碱化,土壤容重增加,孔隙度降低,并伴有土壤板结等现象发生^[47]。Yadav R.K.^[48]从空间变异性的角度,探讨了在一定土层范围内不同深度处土壤化学性质如土壤剖面中氮、磷、钠、钙、镁、电导及其土壤的pH的变化,结果表明除钙、镉外其它测定元素明显过量富集。Wang Z.等^[49]探讨了长期再生水灌溉条件下土壤质量的变化,表明在长期灌溉下可选择孔隙度、pH、EC、磷、镁、锌作为评价因子,与对照区(清水灌溉)相比其它土壤理化指标没有显著变化。

目前国内外对于采用再生水灌溉主要集中在农作物方面,利用再生水进行灌溉,不仅提供了灌溉所需的水源,也为农业生产提供了大量的营养物质,促进作物生长,减少农业投入,同时也解决了城市污水进行三级以上深度处理的必要。利用再生水进行灌溉不仅在一定程度上缓解了水资源的供需矛盾,但同时也有三个重要的问题困扰着再生水的广泛利用:(1)再生水中高的含盐量;(2)高的钠离子含量和pH值;(3)再生水中污染物浓度较高^[50-53]。冯绍元等^[23, 54]通过田间试验,分析了再生水灌溉对冬小麦和夏玉米生长发育的影响。结果表明,再生水对夏玉米的生长发育具有一定的抑制作用;再生水对夏玉米的产量和干物质量的影响要大于对株高和叶面积指数的影响;但再生水灌溉对冬小麦生长发育有一定的促进作用,尤其是对产量和叶面积影响最为明显;再生水灌溉可以提高17.6%~31.1%左右的冬小麦产量。黄冠华等^[55]研究了再生水灌溉条

件下夏玉米和冬小麦的水分与氮素利用效率,发现:再生水对夏玉米和冬小麦叶面积指数和株高的影响很小;不同灌溉水量条件下,再生水灌溉夏玉米和冬小麦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无关,仅随灌溉水量的增加而减少。氮的利用效率与灌水量和施肥无关,仅与灌溉水质有关,且再生水灌溉氮的利用效率高于清水灌溉氮的利用效率。孟雷和左强^[56]研究了经过二级处理的污水灌溉对冬小麦根长密度和根系吸水速率分布的影响,表明,若采用二级处理污水对冬小麦实施灌溉,将使得近地表处的根长密度有所增加,而下部土层中的根长密度分布则变化不大;污水灌溉能显著降低冬小麦的平均根系吸水速率,影响作物对土壤水分的吸收利用。关于利用再生水灌溉草坪,孙吉雄等^[57]对二级城市污水灌溉草坪的可行性进行了研究。周陆波等^[58]研究了再生水灌溉对草坪草生长的影响。崔超等^[59]就再生水绿地灌溉水质标准进行了比较研究。在国外有大量关于污水灌溉对草坪质量、草坪草生长、土壤和淋洗水质影响的研究结果^[60-64]。

1.4 本研究的主要内容

1.历史污灌区土壤理化性质的分析与适耕性评价

通过野外调查,采集不同污灌年限的土壤分析,确定不同污灌年限对土壤理化性质、盐分含量和重金属富集状况的影响,对北京市历史污灌区的污染现状进行分析与评价。

2.历史污灌区土壤污染物对盆栽玉米生长的生物学特性的影响

研究在长期污水灌溉下土壤中污染物(主要重金属和盐分)对盆栽玉米生长状况(株高、叶面积、干物质、光合强度、气孔导度等)、产量和品质(蛋白质、赖氨酸、糖分、纤维素等)的影响。

3.再生水灌溉对盆栽玉米生长的生物学特性的影响

研究再生水灌溉对盆栽玉米生长状况(株高、叶面积、干物质、光合强度、气孔导度等)、产量和品质(蛋白质、赖氨酸、糖分、纤维素等)的影响。

第二章 试验设计和观测内容

2.1 试验设计

2.1.1 野外调查

在石景山、朝阳、大兴踏勘确定污灌不同年限的土壤，挖土壤剖面，分层采样，用容重环采原状土样测土壤容重、孔隙率、田间持水量，用饱和导水率环刀采原状土样测土壤饱和导水率；并且分层取土带回实验室，风干后，过 2mm 筛，进行土壤粒径分析，并且测定土壤的化学性质，包括：有机质、全盐量、八大离子含量（阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ，阴离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} ）、各养分含量（N、P、K）、EC、CEC、PH 值等。

2.1.2 室外盆栽试验

本盆栽试验在中国农业大学水利与土木工程学院试验基地进行。供试材料为生育周期比较短的燕甜糯 818，购于中国农业科学院。采用盆的规格是：高 30.0cm，上底面直径 28.5cm，下底面直径 22.0cm，容积为 14132.3cm^3 。土壤经自然风干后过 2mm 的筛，然后按 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 的容重装盆，每盆装土 15.0kg。玉米于 2005 年 6 月 2 号播种，于 8 月 26 日收获。灌水下限为田间持水量的 65%，灌水上限为田间持水量的 85%^[51]，用称重法进行。盆上覆盖塑料薄膜。

本试验考虑两个因素，即灌水水质和不同污灌年限土壤。灌溉水质为再生水和清水两种，再生水采用高碑店污水处理厂提供的再生水（经过二级处理），其化学性质见表 2-1。与农田灌溉水质标准（GB5084-92）（见表 2-2）相比，再生水中含有较高的水溶氯、水溶钠和 EC，这将对土壤和作物产生一定的影响。清水采用中国农业大学的自来水。

表 2-1 再生水化学性质

检验项目	BOD ₅	COD _{Cr}	有机炭	水溶氯	水溶钠	水溶钾	水溶钙	水溶镁
单位	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹
结果	1.06	63.9	3.39	167	134	17.7	95.5	32.2
检验项目	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	铁	锰	硫化物	全盐	pH
单位	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	g·L ⁻¹	
结果	未检出	293	32.4	0.27	0.05	0.211	0.83	

不同污灌年限的土壤分别采样于北京市石景山区的衙门口、朝阳区的豆各庄乡、大兴区的北野厂灌区和通州区的永乐店镇。石景山衙门口污灌区自 20 世纪 50 年代开始使用北京首钢排出的未经处理的污水进行灌溉，直到 2003 年首钢将污水进行处理后循环使用，衙门口污灌区开始利用地下水进行灌溉。朝阳豆各庄乡污灌区自 60 年代开始使用通惠河的污水进行灌溉，近 5 年由于灌溉水源不足，且灌溉水质恶化，开始利用地下水灌溉。大兴北野厂污灌区自 70 年代开始使用黄村排泄的工业污水和生活污水进行灌溉，近 8 年开始利用污水和地下水交替灌溉的方式进行灌溉，通州区永乐店镇的土壤没有经过污水灌溉。采得的土样均为 0~40cm 的表层土，它们其他的理化性质见表 2-3。

表 2-2 农田灌溉水质标准 GB5084-92)

序号	项目	mg·L ⁻¹		
		水作	旱作	蔬菜
1	生化需氧量(BOD ₅)≤	80	150	80
2	化学需氧量(COD _{Cr})≤	200	300	150
3	悬浮物 ≤	150	200	100
4	阴离子表面活性剂(LAS)≤	5.0	8.0	5.0
5	凯氏氮 ≤	12	30	30
6	总磷(以 p 计)≤	5.0	10	10
7	水温(°C)≤	35	35	35
8	pH 值 ≤	5.5~8.5	5.5~8.5	5.5~8.5
9	全盐量 ≤	1000(非盐碱土地区)有条件的地区可以适当放宽		
10	氯化物 ≤	250	250	250
11	硫化物 ≤	1.0	1.0	1.0
12	总汞 ≤	0.001	0.001	0.001
13	总镉 ≤	0.005	0.005	0.005
14	总砷 ≤	0.05	0.05	0.05
15	铬(六价)≤	0.1	0.1	0.1
16	总铅 ≤	0.1	0.1	0.1
17	总铜 ≤	1.0	1.0	1.0
18	总锌 ≤	2.0	2.0	2.0
19	总硒 ≤	0.02	0.02	0.02
20	氟化物 ≤	2.0 (高氟区) 3.0 (一般地区)		
21	氰化物 ≤	0.5	0.5	0.5
22	石油灰 ≤	5.0	10	10
23	挥发酚 ≤	1.0	1.0	1.0
24	苯 ≤	2.5	2.5	2.5
25	三氯乙醛 ≤	1.0	0.5	0.5
26	丙烯醛 ≤	0.5	0.5	0.5
27	硼≤	1.0 (对硼敏感作物, 如马铃薯、笋瓜、韭菜、洋葱、柑桔等) 2.0 (对硼耐受性较强的作物, 如小麦、玉米、青椒、小白菜、葱等) 3.0 (对硼耐受性强的作物, 如水稻、萝卜、油菜、甘蓝等)		
28	粪大肠菌群数(个/L)≤	10000	10000	10000
29	蛔虫卵数(个/L)≤	2	2	2

表 2-3 土样理化参数表

样品名称	CEC /cmol·kg ⁻¹	有机质 /g·kg ⁻¹	水溶氯 /mg·kg ⁻¹	水溶钠 /mg·kg ⁻¹	EC /mS·m ⁻¹	pH	田间持水量	质地名称
朝阳	15.88	25.30	7.10	50.08	17.78	8.46	18.39%	粉壤土
石景山	12.73	14.59	25.78	71.83	16.00	8.58	18.58%	粉壤土
大兴	15.35	14.94	39.10	58.48	18.78	8.40	18.65%	粉壤土
通州	4.90	8.11	71.10	51.52	21.80	7.40	18.49%	粉壤土

试验设置 8 个处理, 见表 2-4。每个处理 13 个重复, 于夏玉米的六个关键生育期采样进行破坏性试验。六个关键生育期分别是: 三叶期、七叶期、拔节期、大喇叭口期、吐丝期和成熟期。

表 2-4 盆栽试验处理布置图

不同污灌年限土壤	灌水水质	处理
通州 ⁰	清水	通州清水灌溉
	再生水	通州再生水灌溉
大兴 ³⁰	清水	大兴清水灌溉
	再生水	大兴再生水灌溉
朝阳 ⁴⁰	清水	朝阳清水灌溉
	再生水	朝阳再再生水灌溉
石景山 ⁵⁰	清水	石景山清水灌溉
	再生水	石景山再生水灌溉

注: 通州⁰代表没有经过污水灌溉的通州处理, 大兴³⁰代表污灌约 30 年的大兴区处理, 朝阳⁴⁰代表污灌约 40 年的朝阳区处理, 石景山⁵⁰代表污灌的石景山区处理。

2.2 试验观测内容与方法

2.2.1 试验指标

1. 理化指标

土壤质地、饱和导水率、田间持水率、容重、孔隙率、八大离子含量(阳离子 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 阴离子 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-})、各养分含量(N、P、K)、EC、有机质、全盐量、CEC、pH 值;

2. 生物学指标

株高、叶面积、地上干物质、地下干物质、光合强度、蒸腾速率、气孔导度、单穗重、穗长、穗粗、单穗行数、行粒数、百粒重、单株产量、蛋白质含量、游离氨基态 N 含量、淀粉含量、可溶性糖含量、籽粒中重金属镉含量。

2.2.2 测量方法

1. 土壤理化指标

土壤质地: 采用比重计法; 容重: 用环刀法测定; 孔隙率: 采用排水法测定; 饱和导水率: 采用定水头法测定; 田间持水率: 容重环法测定。先在培养皿里泡 24h, 然后取出, 经过 2~3 天后(排除重力水), 测其含水量, 即得田间持水量。化学性质是将提取的土样过 1 mm 筛, 按 1:5 土水比与不含 CO_2 的蒸馏水混合, 充分振荡摇匀并过滤, 取上层清液进行测定。可溶性盐测定: CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 采用双指示剂滴定法测定; Cl^- 采用 AgNO_3 滴定法测定; SO_4^{2-} 采用 ETDA 间接滴定法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 采用 ETDA 络合滴定法测定; K^+ 和 Na^+ 由差减法计算; pH 用酸度计实测; EC 采用电导仪实测; 全盐量采用重量法测定。交换性盐基测定: K^+ 和 Na^+ 用醋酸钠浸提、火焰光度计法测定; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用醋酸钠浸提、ETDA 滴定法测定; CEC 由计算得到。

2. 生物学指标

- 1) 株高：用卷尺直接测量。玉米这样的高秆作物量至自然状态下的植株的最高点，每 10 天一次；
- 2) 叶面积：采用估算法得到，具体估算的公式为： $S=L \times B \times K$ ，式中 S 代表叶面积 (cm^2)，L 代表叶子的长度 (cm)，B 代表叶子的宽度 (cm)，K 代表拟合系数，取叶片拟合可得到 $K=0.75$ ；
- 3) 地上干物质：将地上部分（包括茎、叶、果穗）在 105°C 下杀青 2h，然后在 70°C 下烘 48h 得其干重；
- 4) 地下干物质：采用测地上干物重同样的方法测量地下干物质；
- 5) 单穗重：用天平直接称量鲜重；
- 6) 穗长：直接测量果穗基部至穗顶的长度；
- 7) 穗粗：用游标卡尺直接测量玉米穗最粗处的直径；
- 8) 百粒重：从净种子中随机取 3 个重复，每个重复 100 粒，各自称重，然后取其平均数；
- 9) 单株产量：收集单株玉米的所有籽粒直接称量，然后取其平均数；
- 10) 可溶性糖含量：采用碱性铜试剂法测定；
- 11) 蛋白质含量：采用凯氏定氮法；
- 12) 淀粉含量：采用凯氏滴定法；
- 13) 游离氨基态 N 含量：用荧光光度计测量；
- 14) 重金属 Cd 含量：采用 SB-110 原子荧光光度计检测；
- 15) 光合强度、蒸腾速率、气孔导度：用 CI-310 光合仪，于拔节期和乳熟期从 8:00~18:00 进行全天测量，每两小时测量一次；每个处理测定 1 片叶子（倒二叶），每个叶片取 3 个数值，然后取其平均值。

第三章 对北京典型历史污灌区土壤的理化性分析

3.1 北京市污水灌溉基本状况

我国污水灌溉面积已从 1963 年的 63 万亩发展到 1998 年的 5427 万亩, 约占全国总灌溉面积的 7.3%。从地域分布上, 约占全国污水灌溉面积 85% 的污水灌溉农田主要集中在北方水资源严重短缺的海、辽、黄、淮四大流域。大型污灌区主要分布在我国北方大中城市的近郊区, 如北京污水灌溉区。北京市自 20 世纪 50 年代初期就开始利用污水灌溉农田。从解放初期至今, 北京地区的污水灌溉的发展大体经历起步、快速、稳定、萎缩 4 个阶段: 1959 年以前为自发灌溉时期, 最初的面积仅仅为 1 万亩左右, 主要分布在石景山的衙门口地区; 1959~1988 年为迅速发展时期, 从 1959 年的 5.6 万亩发展到 1988 年的 120 万亩, 污灌农田年平均增长率为 3.9%; 1988-1995 稳定发展时期, 污灌农田的面积基本稳定在 120 万亩左右的水平; 1995 至今为污灌农田的萎缩期, 截止 2000 年, 污灌农田只剩下东南远郊的 40 万亩左右, 年污水灌溉量约 2.2 亿 m^3 , 占全市污水排放量的 27%。

根据污水来源和渠系位置可将北京市污灌区分为西郊、北郊和东南郊污灌区。西北郊分为三个子灌区, 东南郊污灌区划分为十个子灌区。其中东郊通慧河污灌区划分为七个子灌区, 南部凉水河污灌区划分为三个子灌区。从行政区划来看, 北京市污灌农田主要分布在通县、大兴、朝阳和丰台区。这 4 个区县共有污灌农田 111 万亩, 占全市污灌总面积的 92.5%。东郊污灌区主要引用高碑店污水厂污水灌溉, 南郊污灌区主要引用排放到凉水河的工业和生活污水灌溉, 西郊和北郊主要引用工业污水灌溉, 比如, 石景山首钢灌区, 由首钢排污口沿新开渠至莲花河一带, 污水主要源于首钢各钢铁、冶炼、焦化等工厂^[65]。

北京市灌溉污水大都集中在 4 月~11 月, 在此期间污水农用量占 50% 以上。干旱的 4 月、5 月、9 月、10 月正值北京春、秋作物播种生长季节, 由于降水少污水利用率达 70%~90%。北京市污灌农田可灌污水 2 次~4 次, 每亩平均污水用量为 175.0 m^3 , 大部分污灌农田采用清、污混灌、轮灌、间歇污灌或利用纳污水灌溉, 也有个别区是纯污水灌溉。

北京采用的大多是未经处理的污水进行灌溉, 长期灌溉将严重影响北京土壤环境, 现已不提倡采用未经处理的污水进行灌溉。而且随着社会经济的发展, 北京市每年排放的污水资源量逐年增加, 目前, 北京市区日污水排放量已达到 320 万 m^3 , 市区仅有高碑店、酒仙桥、北小河、方庄、清河等 5 座污水处理厂, 污水集中处理率仅为 47%, 污水处理能力有待进一步加强。

3.2 长期污灌对土壤理化性质的影响

利用污水灌溉不仅能提供灌溉所需要的水资源, 能缓解干旱缺水的供需矛盾, 为农业提供了稳定的水源, 减少了水体污染, 减轻了污水处理投资, 而且也为农业生产提供了一定的营养物质, 促进作物生长。但是, 由于污水中总固体含量较大, 盐分较高, 并含有丰富的微生物包括致病菌以及一定的重金属残留, 所以污灌同时也会带来很严重的环境问题。

3.2.1 污灌区土壤的重金属污染状况

北京地区开展污水灌溉的调查研究工作较早。北京西郊环境质量评价协作组的《北京西郊环境质量评价研究》中（1973~1977），就对北京西郊污水灌溉区，污水灌溉对土壤、地下水、作物和蔬菜的影响做了详细的论述。据《北京西郊环境质量评价研究》报道，在自上世纪 50 年代开始污水灌溉的一些地区表层土壤，重金属镉元素含量已达 0.4~0.8mg/kg，为当地本地值 0.08mg/kg 的十倍^[66]。朱桂珍^[38]通过对北京市东南郊污灌区土壤的现状检测与农业生活的调查，分析了东南郊污灌区土壤的环境质量状况。根据她 1999 年监测结果分析显示，北京东南郊通惠河、凉水河灌区土壤中重金属 Zn、Cd、Hg 的含量较 70 年代末期有明显增加，其中凉水河灌区土壤中 Hg、Cd 的含量平均为 0.552 和 0.187mg/kg，为 70 年代末期含量的 2.35 倍和 2.71 倍，其它重金属含量变化不大，个别点的土壤中的 Zn、Hg 有超标现象。但是，与北京褐土中各重金属元素的背景值相比，两灌区各重金属含量有了大幅度的增加。对于通惠河灌区，1999 年土壤中各重金属（除 As 外）含量比其背景值大 33.6%~1232%，对于凉水河灌区，土壤各重金属（除 As 外）含量比其背景值大 57.1%~1254%，但两个灌区土壤中 As 的含量有所降低，通惠河灌区和凉水河灌区分别比背景值低 12.53% 和 18.30%。总体看来，土壤中各项重金属含量普遍低于国家《土壤环境质量标准》（GB15618—1995）中二级标准限值（土壤 pH>7.5）（见表 3-1）。

表 3-1 二级标准限值 (pH>7.5)

重金属	Cu	Pb	Zn	Cd	Ni	Cr	Hg	As
标准值	100	350	300	0.6	60	350 水田 250 旱地	1	20 水田 25 旱地

3.2.2 污灌区土壤容重的现状分布特征

通过对石景山、朝阳、大兴等污灌区的野外调查，挖土壤剖面，分层采样，分层测量了各不同污灌年限土壤的容重、孔隙率、土壤中的有机质、盐分和 pH 值。这三个污灌区都集中在平原地区，成土母岩为洪冲积物，因水文地质条件较好，土壤类型以褐土为主，土壤容重在 1.2g/cm³~1.4 g/cm³ 之间，有机质含量为 0.8%~1.5%，pH 值为 7.0~8.6。由于本田间调查所涉及的污灌区污灌年限均较长，污灌前详细的土壤背景资料无法获得，以下只是对污灌区土壤现状以及其适耕性问题进行评价。

不同土层土壤容重变化情况详见图 3-1。从图中可以看出，不同污灌年限的污灌区土壤均是表层 0~10cm 土壤容重较小，下面几层土壤容重较大，而且比较均匀。同时在取样时发现，用污水灌溉之后的土壤，土壤表层的颜色较下层土壤都黑而且疏松，这可能是由于污水中含有一定量的有机质，较多的养分留在了土壤表层，对土壤表层起到了蓬松作用；与此同时，污水中的有机污染物、悬浮物等随着污水进入农田，并且在灌溉水的淋洗作用下，逐渐沉淀积累于土壤中，造成土壤孔隙堵塞、容重增加，个别地块容重达到 1.59g/cm³。污灌之后，土壤容重都较历史背景值有大幅提高，而且基本上都是 10~40cm 土层最高，这正好是作物根系主要分布的范围，绝大部分水分和养分要从此层土壤中吸收，土壤容重大，有效水量少，而且根系扎根困难，吸收养分也困难，对作物生长不利。

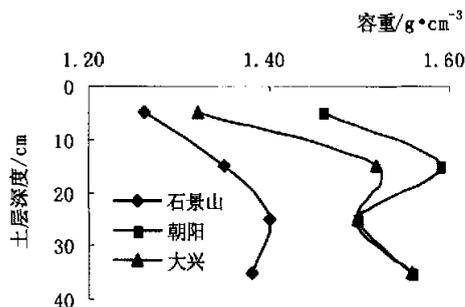


图 3-1 不同土层深度土壤容重变化图

3.2.3 污灌区土壤孔隙率的现状分布特征

不同地点不同土层土壤总孔隙率详见图 3-2。从图中可以看出，不同污灌年限的土壤均是表层土壤总孔隙率较大，下面几层总孔隙率较小。表层土壤总孔隙率较大，一方面是由于污水中含有一定量的有机物质，对土壤起到了蓬松作用；另外由于农耕过程中经常性的对土壤进行翻耕，也会增大土壤孔隙率，有利于作物生长。下层土壤总孔隙率较低，一方面是由于污水中含有的有机污染物、悬浮物等随水进入农田，逐渐沉淀积累于土壤中，造成土壤孔隙堵塞；另一方面是由于土壤经过长期耕作使得剖面中间出现犁底层或粘盘层，使土壤紧实。作物适宜的土壤孔隙率通常为 52%~55%，但调查的三个地点不同层土壤总孔隙率除 0~10cm 之外，均低于 50%，这说明利用污水灌溉对土壤物理性状有一定的恶化影响。同时，也说明如果对污水进行严格的处理，消除其中的有害物质及悬浮物质的必要性。

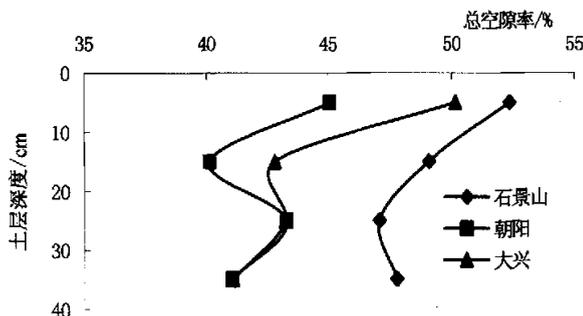


图 3-2 不同土层深度土壤总孔隙率变化图

3.2.4 污灌区土壤有机质的现状分布特征

不同土层土壤有机质含量详见图 3-3。从下图可以看出，不同污灌年限污灌区的土壤均为上层有机质含量高，越往下层有机质含量有所降低，20cm 以下的有机质含量与背景含量相当。这可能是由于污水中有机物质含量较高，而且有机物质被土壤表层截留，不易向下层移动。朝阳区各层土壤有机质含量均较高是由于所取剖面位于一奶牛厂附近，此处有机肥比较丰富。

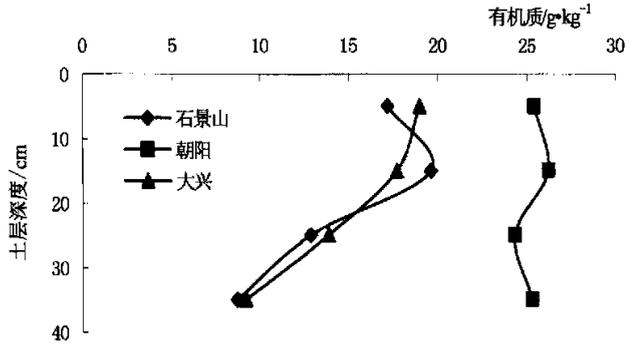


图 3-3 不同土层深度土壤有机质含量变化图

3.2.5 污灌区土壤盐分的现状分布特征

不同土层水溶 Na^+ 浓度和 EC 值详见图 3-4 和图 3-5。总体看来，各污灌区土壤中 EC 值和 Na^+ 浓度并不太高，但是均有随着深度的增加而增加的趋势。这可能是由于在灌溉水的淋洗作用下，盐分不断下移，从而上层土壤盐分积累并不严重。从图中可以看出，三个污灌区在 0~10cm 土层土壤溶液电导率也较高。这主要是由于表层水分蒸发较快引起的盐分的表聚现象。

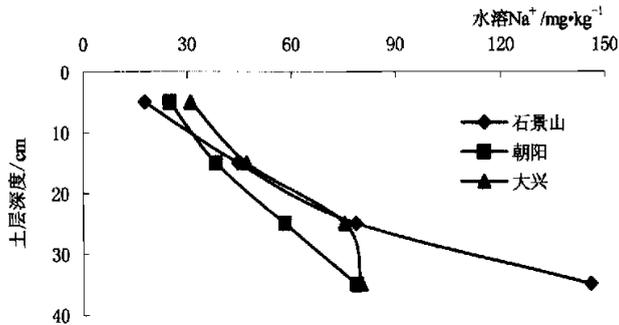


图 3-4 不同土层深度 Na^+ 值变化图

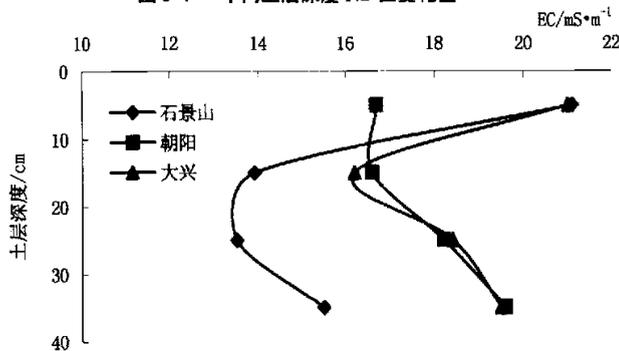


图 3-5 不同土层深度 EC 值变化图

3.2.6 污灌区土壤 pH 的现状分布特征

不同土层土壤 pH 值详见图 3-6。灌溉不同年限之后，土壤 pH 值有一定的规律性。石景山污

灌 50 年, 相比之下污灌时间最长, 在 10~40cm 土层的 pH 值都大于 8.5, 朝阳污灌约 40 年, 10~40cm 土层的 pH 值接近或大于 8.5, 大兴污灌时间最短, 20~40cm 土层的 pH 值接近 8.5。污水中由于含有高含量的 Na^+ , 因此灌溉之后有使土壤 pH 增加的趋势。石景山区水解 Na^+ 浓度较高, 所以 pH 较大。如果 $\text{pH} > 8.5$, 则有使土壤碱化的危险。通过对此三个污灌区的研究表明, 随着灌溉年限的增长, 土壤 pH 值大于或接近 8.5 的范围逐渐增加, 而且 pH 值也越来越大, 这说明长期超标的污水灌溉有可能使土壤碱化。

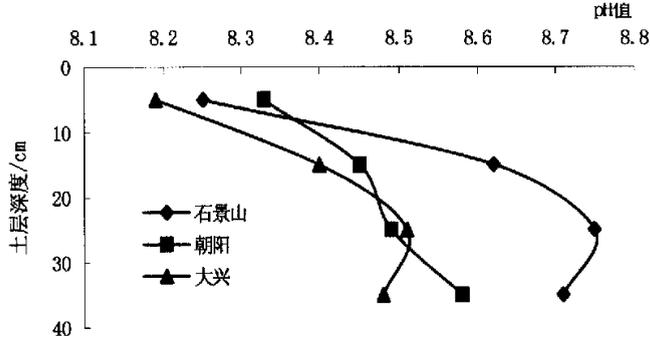


图 3-6 不同土层深度 pH 值变化图

3.3 长期污灌对作物的影响

长期污灌会对作物产生一定的影响。作物在污灌初期常有较明显的增产, 但是随着时间的推移, 污灌区的作物会受到很明显的影 响, 如污灌区出现水稻叶片脱黄, 后期贪青, 根系发育不正常, 籽粒无光泽、色暗, 蔬菜变味, 不易保存等现象; 使作物中重金属含量超标等。从北京市环保所王绍堂主持的国家“七五”攻关课题《高碑店污水系统综合防治研究》中, 王庆敏等人的试验结果表明: 污灌可能降低蔬菜营养品质。80 年代中期对北京某污灌区进行的抽样调查表明, 大约 60% 的土壤和 36% 的糙米存在污染问题。

北京长期污水灌溉地区生产的小麦、稻米籽粒中 Pb、Cd、Hg 等含量增加, 稻米籽粒内 Hg 有不同程度的超标现象。北京近郊蔬菜也遭受到一定程度的污染, 朝阳区和丰台区大白菜、黄瓜、芹菜、番茄等蔬菜的 Pb、Cd、Hg、As 的超标率为 10~20%^[67]。1998 年, 对北京四大蔬菜批发市场调查时发现, 土豆、大白菜、洋白菜等 10 种蔬菜重金属明显超标, 叶菜类蔬菜的硝酸盐含量超过世界卫生组织标准 1~3 倍。北京居民每日从蔬菜中摄取的 As 是世界卫生组织所规定的日摄取量的 120%。研究表明, 多数污染重金属在土壤中不为生物所分解, 可在生物体内累积和转化。土壤一旦遭受重金属污染就极难恢复, 因此应该特别关注 Cd、Hg、As、Pb 等重金属对土壤的污染, 这些元素在过量的情况下有较大的生物毒性, 可通过食物链对人体健康带来严重威胁。

3.4 本章小结

通过对北京地区不同污灌年限的污灌区进行资料收集和采样分析, 主要得出如下结论:

1. 目前污灌区土壤中重金属 Zn、Cd、Hg 的含量较 20 世纪 70 年代末期有明显增加, 个别点的土壤中的 Zn、Hg 有超标现象; 与各重金属元素的背景值相比, 各重金属含量有了大幅度的

增加。总体看来,土壤中各项重金属含量普遍低于国家《土壤环境质量标准》中二级标准限值。

2. 污灌区各土层土壤容重均较大,土壤总孔隙率都低于作物生长适宜的程度,这都有可能使根系扎根困难,不易吸收养分,对作物生长不利。

3. 各污灌区土壤 EC 值并不太高,但是均有随着深度的增加而增加的趋势。各污灌区均为上层土壤有机质含量高,越往下层有机质含量越低。

4. 随着灌溉年限的增长,土壤 pH 值大于或接近 8.5 的范围逐渐增加,而且 pH 值也越来越大,这说明长期超标的污水灌溉有可能使土壤发生碱化。

4. 污灌区作物和蔬菜遭受一定程度的污染,个别重金属含量超标。

第四章 不同污灌年限土壤对玉米生长的影响

4.1 不同污灌年限土壤对株高的影响

株高和光能的利用有密切的关系。植株过矮，叶片间距小，相互遮光严重。但若植株过高，则在水平方向上的投影过大，也不利于光能利用，所以合理的株高是衡量作物长势的一项重要指标。清水灌溉条件下，各区株高的变化情况详见图 4-1。

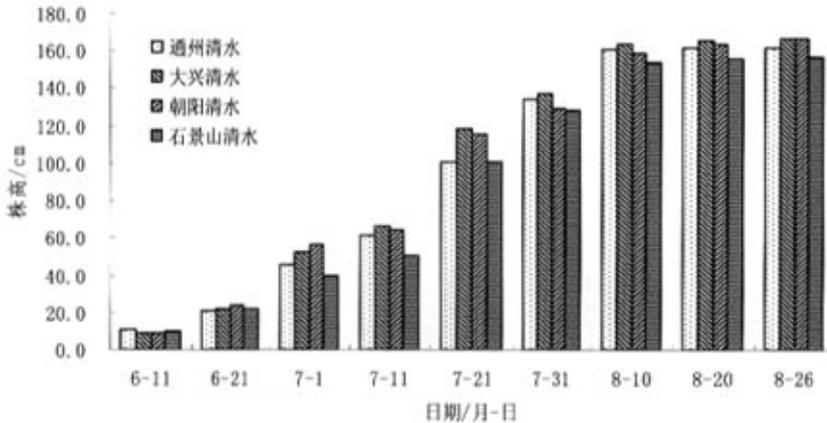


图 4-1 清水灌溉条件下各区夏玉米株高的变化趋势

通过图4-1可以看出，8月10日以前玉米生长较快，其后生长缓慢，并在拔节期和大喇叭口期有大幅度的增长，大喇叭口期的快速增长有可能是由于追肥引起的。表面上看来，大兴³⁰和朝阳⁴⁰的夏玉米长势较好，通州⁰次之，石景山⁵⁰最差。通过配对比较可看出（表4-1），大兴³⁰与通州⁰达到显著差异水平，大兴³⁰的玉米株高高于通州处理。这表明，污灌近30年的大兴区土壤中富集了一定的养分，能促进作物生长。石景山⁵⁰株高观测值普遍小于通州⁰（6月11日和6月21日石景山⁵⁰的株高观测值大于通州⁰是因为受播种的影响较大），更加小于大兴³⁰和朝阳⁴⁰。石景山⁵⁰与其他三个处理均达到显著性差异，这表明石景山区土壤对株高增长有一定抑制作用。朝阳⁴⁰与大兴³⁰、朝阳⁴⁰与通州⁰差异不明显。在7月1日以前，朝阳⁴⁰的株高观测值比大兴³⁰的大，其后大兴³⁰的株高观测值明显小于朝阳⁴⁰（sig.=0.042），这可能是因为在朝阳区取的土样中有机质含量较高，所以生育前期朝阳⁴⁰长势较好。朝阳⁴⁰生育后期生长速度减慢可能是因为土壤中的污染残留物对作物产生了抑制作用。

表 4-1 株高的配对比较结果

清水配对	统计量t	自由度	显著性概率	再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-2.611	8	0.031	通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-0.441	8	0.671
通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	-1.640	8	0.140	通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	1.133	8	0.290
通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	3.660	8	0.006	通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	4.805	8	0.001
大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	1.184	8	0.271	大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	1.220	8	0.257
大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	4.525	8	0.002	大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	5.056	8	0.001
朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	3.658	8	0.006	朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.208	8	0.058

再生水灌溉条件下，各区株高的变化情况详见图 4-2。

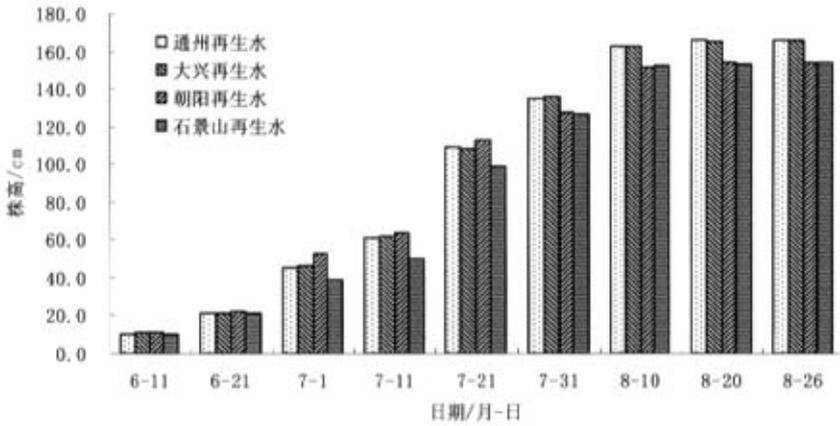


图 4-2 再生水灌溉条件下各区夏玉米株高的变化趋势

在清水灌溉条件下，大兴³⁰土壤在一定程度上能促进作物的生长，但是在再生水灌溉条件下，这种促进作用只是在玉米生育前期有所体现，后期表现出更多的是抑制作用，这可能是因为污灌区土壤中已经富集了大量的盐分，再利用再生水进行灌溉必然增加土壤的盐分，影响作物对养分的吸收，从而影响作物的生长。但是通过株高各处理的配对比较发现（见表 4-1），除了石景山⁵⁰的株高观测值显著小于通州⁰和大兴³⁰外，其他各处理之间均未达到显著差异。综合清水灌溉和再生水灌溉，表明石景山区土壤会严重影响玉米植株生长。

综合起来，通过对株高进行双因素方差分析（见表4-2）可得，不同污灌年限土壤对株高有一定得影响，并且于6月21日、7月1日、7月11日和7月31日到显著性水平。

表 4-2 株高的各目标因素效应检验表

方差来源	日期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	日期	自由度	统计量F	显著性概率
不同污灌年限土壤	6-11	3	0.324	0.810	灌溉水质	6-11	1	1.523	0.305
	6-21	3	9.264	0.050		6-21	1	4.167	0.134
	7-1	3	19.813	0.018		7-1	1	3.271	0.168
	7-11	3	56.043	0.004		7-11	1	1.819	0.270
	7-21	3	3.378	0.172		7-21	1	0.172	0.707
	7-31	3	41.652	0.006		7-31	1	0.783	0.441
	8-10	3	6.552	0.078		8-10	1	1.158	0.361
	8-20	3	2.928	0.201		8-20	1	0.471	0.542
	8-26	3	1.921	0.303		8-26	1	0.626	0.487

4.2 不同污灌年限土壤对叶面积的影响

当叶面积指数小时，叶子冠层截获的光能就少，地面直接照光面积较高，而叶面积指数较大时，地面光照面就会大幅度较少。由此可见，叶面积指数的大小是决定群体吸收光能效率的首要因素，所以叶面积也是体现作物生长的一个重要指标。清水灌溉条件下，各处理叶面积的变化情况详见图 4-3。

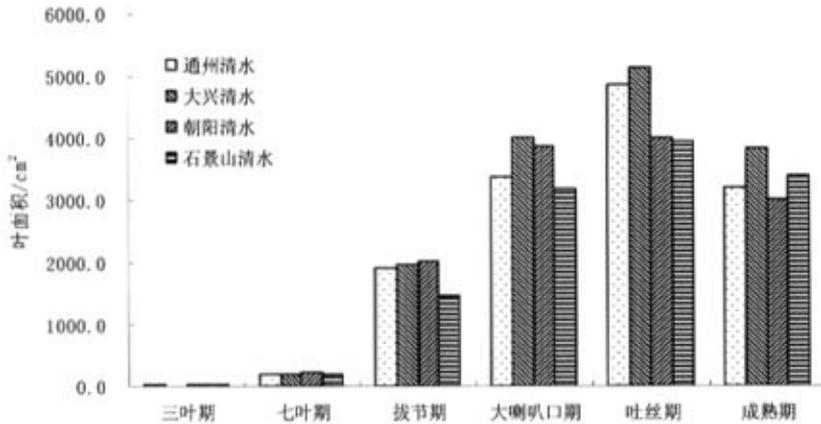


图 4-3 清水灌溉条件下各区夏玉米叶面积的变化趋势

通过图 4-3 可以看出，整个生育期叶面积的变化趋势呈抛物线形状，在吐丝期达到最大值，其后有所减小，说明后期叶片有所衰老。总体看来，大兴³⁰的叶片长势较好，七叶期以后（因为生育前期受播种的影响较大），大兴³⁰的叶面积观测值比石景山⁵⁰大 3.7%~35.2%，石景山⁵⁰最差，石景山⁵⁰在拔节期的叶面积观测值比通州⁰区小 23.5%。通过对各处理的叶面积配对比较结果可看出（表 4-3），大兴³⁰与石景山⁵⁰达到显著性差异，这表明大兴土壤对夏玉米叶片的生长有促进作用，相反石景山土壤对叶片的生长有很大的抑制作用。石景山土壤对玉米生长的产生抑制可能是因为石景山⁵⁰土壤中较高的水溶钠和 pH（见表 2-3）。土壤中 Na 含量比 Ca 和 Mg 含量高，就会引起土壤膨胀和分散，将导致土壤物理条件的退化，这反过来又破坏土壤结构，减少土壤孔隙度和导水率等。对于朝阳⁴⁰在大喇叭口以前，其叶面积观测值比通州⁰大，其后反却比通州⁰的小，这与株高表现出来的规律一致，同样可能是因为朝阳区土壤中含有较多的有机质，所以在生育前期能促进作物生长，等有机质消耗完之后，土壤中污染残留物对作物的抑制作用就表现得更加明显。

表 4-3 叶面积的配对比较结果

清水配对	统计量t	自由度	显著性概率	再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-2.140	5	0.085	通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-1.812	5	0.130
通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	0.369	5	0.727	通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	-0.690	5	0.521
通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	1.347	5	0.236	通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	2.076	5	0.093
大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	1.622	5	0.166	大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	1.499	5	0.194
大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.591	5	0.049	大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.525	5	0.053
朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	0.962	5	0.380	朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.069	5	0.093

再生水灌溉条件下，各区叶面积的变化情况详见图 4-4。从图中可以看出，大兴³⁰的叶面积长势最好，通州⁰次之，石景山⁵⁰最差，表现出了与清水灌溉条件下类似的规律。大兴³⁰的叶面积观测值比通州⁰大 2.0%~15.5%，石景山⁵⁰在拔节期后的叶面积观测值比通州区小 9.7%~27.8%。在再生水灌溉条件下，朝阳⁴⁰在吐丝期前生长良好，其叶面积观测值均高于通州⁰，但后期的叶面积观测值低于通州⁰和大兴³⁰，这在一定程度上说明朝阳⁴⁰的叶片衰老较快，而大兴³⁰在生育后期株高和叶面积都有较大幅度的增大，说明大兴土壤处理下的玉米有贪青现象。

通过上面的分析可以看出，超过一定期限的历史污灌区利用再生水灌溉会抑制植株和叶片生

长,比如石景山区,在这些历史污灌区不适宜利用再生水进行灌溉,建议尽量利用清水进行灌溉。

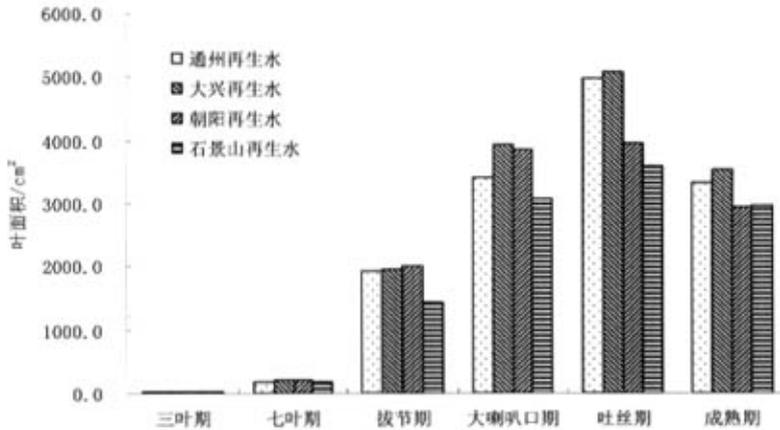


图 4-4 再生水灌溉条件下各区夏玉米叶面积的变化趋势

综合起来,通过对叶面积的双因素方差分析(见表4-4)可看出,不同污灌年限土壤对叶面积影响极其显著,除三叶期和成熟期外,其他各期均达到显著性水平,并且在拔节期和大喇叭口期达到极显著性水平。

表 4-4 叶面积的各目标因素效应检验表

方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率
不同污灌年限土壤	三叶期	3	0.563	0.676	灌溉水质	三叶期	1	2.699	0.199
	七叶期	3	23.653	0.014		七叶期	1	0.991	0.393
	拔节期	3	533.031	0.000		拔节期	1	0.432	0.558
	大喇叭口	3	117.282	0.001		大喇叭口	1	1.783	0.274
	吐丝期	3	46.710	0.005		吐丝期	1	1.015	0.388
	成熟期	3	5.690	0.094		成熟期	1	2.252	0.230

4.3 不同污灌年限土壤对干物重和根冠比的影响

绿色叶片利用光合作用合成的 90%以上的有机物质都形成干物质产量,干物质体现了作物利用光能合成有机物的能力。产量形成的具体表现为干物质的累积并在各个器官的分配,实际上反映了玉米器官在各生育时期的发生、发展和形成的动态过程,反映了各生育期的生长中心和从属关系以及它们之间的转移。

4.3.1 对地上干物重的影响

各处理地上干物重的变化规律与株高、叶面积稍微有些不同。通过图 4-5 可以看出,在清水灌溉条件下,朝阳⁴⁰的地上干物重较大,大兴³⁰次之,石景山⁵⁰较小。从七叶期开始,朝阳⁴⁰的地上干物重观测值比通州⁰大 31.4%~104.7%,大兴³⁰比通州⁰大 30.7%~63.5%,而石景山⁵⁰在拔节期、大喇叭口期和吐丝期的地上干物重观测值分别比通州⁰小 32.5%、26.7%和 11.7%,但在成熟期却比通州⁰高 5.1%,这是因为通州⁰处理有叶片被风吹断影响了干物重的积累的缘故。虽然朝阳⁴⁰的株高和叶面积在生育后期增长缓慢,以至出现其株高、叶面积观测值小于通州⁰的

情况,但是在苗期朝阳⁴⁰长势最好,植株长的非常粗壮,积累了更多干物质,从而朝阳⁴⁰的干物重一直高于其他处理。大兴³⁰在生育后期长势喜人,株高和叶面积都有大幅增长,所以其地上干物重与朝阳⁴⁰的差距在减少。这表明大兴³⁰和朝阳⁴⁰土壤对夏玉米干物质的积累有促进作用,相反石景山⁵⁰土壤不仅对株高和叶片的生长有抑制作用,对干物质的积累同样有抑制作用。这说明石景山区土壤已经受到污染,其所受污染程度有待进一步研究。

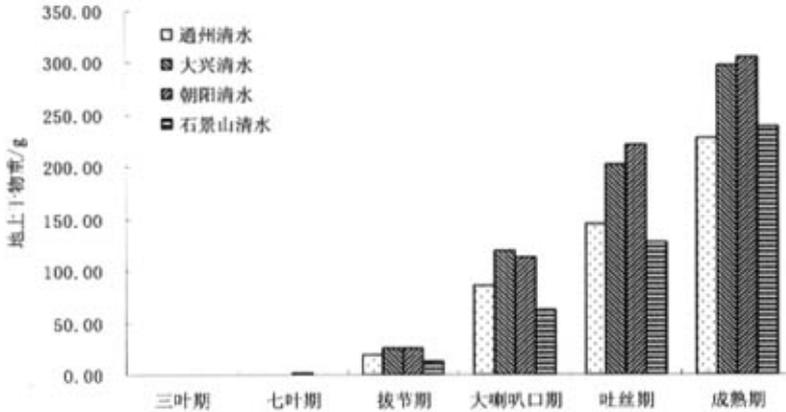


图 4-5 清水灌溉条件下夏玉米地上干物重的变化趋势

表 4-5 地上干物重的配对比较结果

清水配对	统计量t	自由度	显著性概率	再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-2.251	5	0.074	通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-1.664	5	0.157
通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	-2.094	5	0.090	通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	-1.857	5	0.122
通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	1.115	5	0.315	通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	1.841	5	0.125
大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	-0.939	5	0.391	大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	-2.472	5	0.056
大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.501	5	0.054	大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.440	5	0.059
朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.597	5	0.048	朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.460	5	0.057

在再生水灌溉条件下,各处理地上干物重的变化情况详见图 4-6。其变化规律与清水灌溉条件下类似。通过对不同灌溉水质和不同污灌年限的叶面积双因素方差分析(见表 4-6)可得,不同污灌年限土壤对地上干物重的影响极其显著,除吐丝期外,其他各期均达到显著性水平。

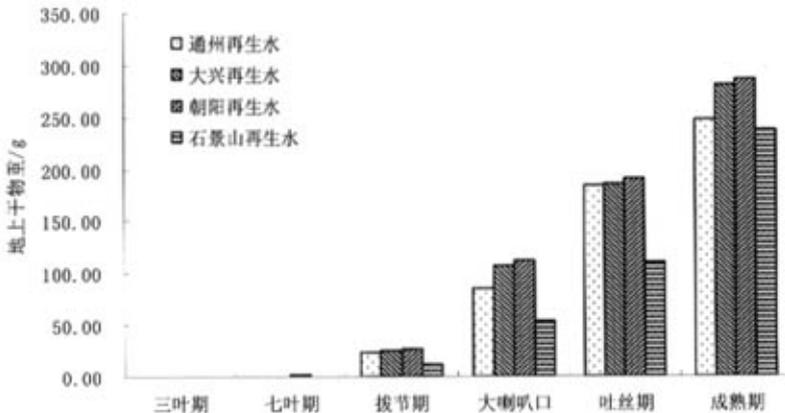


图 4-6 再生水灌溉条件下夏玉米地上干物重的变化趋势

表 4-6 地上干物重的各目标因素效应检验表

方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率
不同污灌年限土壤	三叶期	3	14.333	0.028	灌溉水质	三叶期	1	9.000	0.058
	七叶期	3	76.920	0.002		七叶期	1	0.299	0.623
	拔节期	3	23.354	0.014		拔节期	1	0.478	0.539
	大喇叭口	3	71.034	0.003		大喇叭口	1	3.437	0.161
	吐丝期	3	6.190	0.084		吐丝期	1	0.170	0.708
	成熟期	3	12.124	0.035		成熟期	1	0.195	0.689

4.3.2 对地下干物重的影响

清水灌溉条件下和再生水灌溉条件下的地下干物重的变化情况分别见图 4-7 和图 4-8。在清水灌溉条件下，石景山⁵⁰的地下干物重较小，拔节期、大喇叭口期、吐丝期、成熟期分别比通州⁰小 31.9%、37.3%、13.5%、34.4%。通过配对分析结果可得，在清水灌溉条件下，石景山⁵⁰的地下干物重显著小于与大兴³⁰、朝阳⁴⁰的地下干物重，大兴³⁰的地下干物重观测值比石景山⁵⁰大 3.8%~67.0%。在再生水灌溉条件下，通州⁰、大兴³⁰、朝阳⁴⁰的地下干物重观测值都显著高

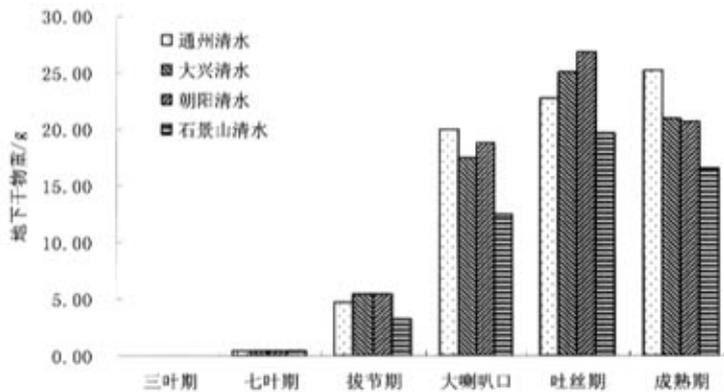


图 4-7 清水灌溉条件下夏玉米地下干物重的变化趋势

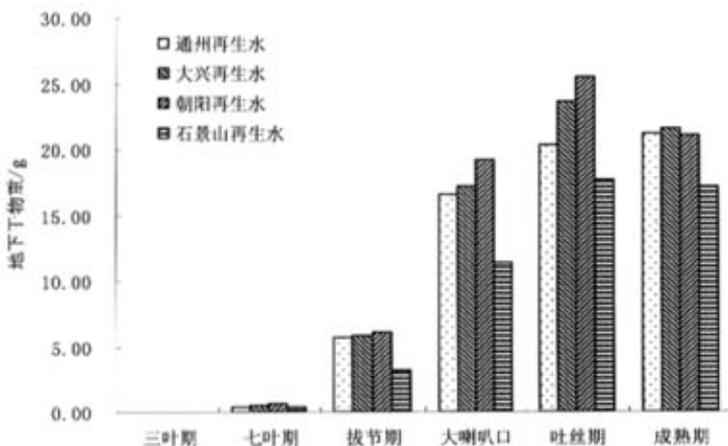


图 4-8 再生水灌溉条件下夏玉米地下干物重的变化趋势

于石景山⁵⁰。自七叶期起，通州⁰的地下干物重观测值比石景山⁵⁰大 25.4%~85.1%，大兴³⁰的地下干物重观测值比石景山⁵⁰大 12.8%~81.9%。经过多元统计分析可得，不同污灌年限土壤对地下干物重影响同样显著，在拔节期、大喇叭口期和吐丝期均达到显著性差异水平，在吐丝期达到极显著性水平。

表 4-7 地下干物重的配对比较结果

清水配对	统计量t	自由度	显著性概率	再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ —大兴 ³⁰	0.634	5	0.554	通州 ⁰ —大兴 ³⁰	-1.434	5	0.211
通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	0.099	5	0.925	通州 ⁰ —朝阳 ⁴⁰	-1.591	5	0.173
通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	2.251	5	0.074	通州 ⁰ —石景山 ⁵⁰	2.824	5	0.037
大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	-1.434	5	0.211	大兴 ³⁰ —朝阳 ⁴⁰	-1.469	5	0.202
大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.827	5	0.037	大兴 ³⁰ —石景山 ⁵⁰	2.891	5	0.034
朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.647	5	0.046	朝阳 ⁴⁰ —石景山 ⁵⁰	2.667	5	0.044

表 4-8 地下干物重的各目标因素效应检验表

方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率
不同污灌年限土壤	三叶期	3	1.000	0.500	灌溉水质	三叶期	1	0.600	0.495
	七叶期	3	8.739	0.054		七叶期	1	6.035	0.091
	拔节期	3	26.656	0.012		拔节期	1	5.167	0.108
	大喇叭口	3	15.313	0.025		大喇叭口	1	1.705	0.283
	吐丝期	3	181.331	0.001		吐丝期	1	57.150	0.005
	成熟期	3	5.473	0.098		成熟期	1	0.241	0.657

4.3.3 对根冠比的影响

玉米根冠比变化趋势见图 4-9。

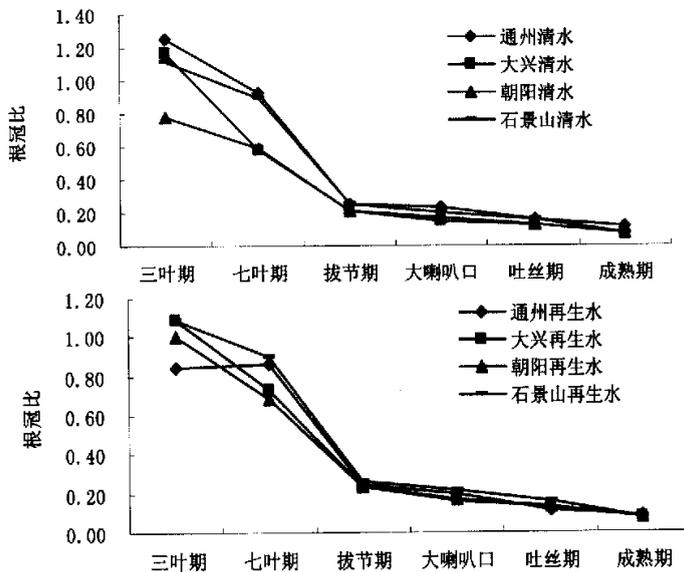


图 4-9 玉米根冠比的变化趋势

在清水灌溉条件下，通州⁰的根冠比较大，大兴³⁰和朝阳⁴⁰的根冠比较小，这可能是因为通州⁰土壤中含有较高的盐分，较高的盐分会对作物根系产生胁迫作用，从而促进根系的生长。污灌区根冠比较小可能是因为污灌土壤能加速作物根系衰老引起的。在再生水灌溉条件下，石景山⁵⁰的根冠比较大，这是因为石景山⁵⁰地上干物重较小引起的，可以看出石景山土壤对地上干物重抑制较大。大兴³⁰和朝阳⁴⁰的根冠比较小同样是因为它们的地上干物重较大引起的。经过多元统计分析可得（见表 4-9），不同污灌年限土壤对根冠比没有产生显著影响。

表 4-9 根冠比的各目标因素效应检验表

方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	生育期	自由度	统计量F	显著性概率
不同污灌年限土壤	三叶期	3	0.682	0.619	灌溉水质	三叶期	1	0.322	0.610
	七叶期	3	8.239	0.058		七叶期	1	0.797	0.438
	拔节期	3	6.333	0.082		拔节期	1	2.000	0.252
	大喇叭口	3	9.000	0.052		大喇叭口	1	0.070	0.809
	吐丝期	3	0.889	0.537		吐丝期	1	0.111	0.761
	成熟期	3	5.211	0.104		成熟期	1	0.158	0.718

4.4 不同污灌年限土壤对夏玉米生理特征的影响

4.4.1 对光合速率的影响

夏玉米各处理光合速率的全天变化情况见图 4-10。从图中可以看出，不同污灌年限土壤上夏

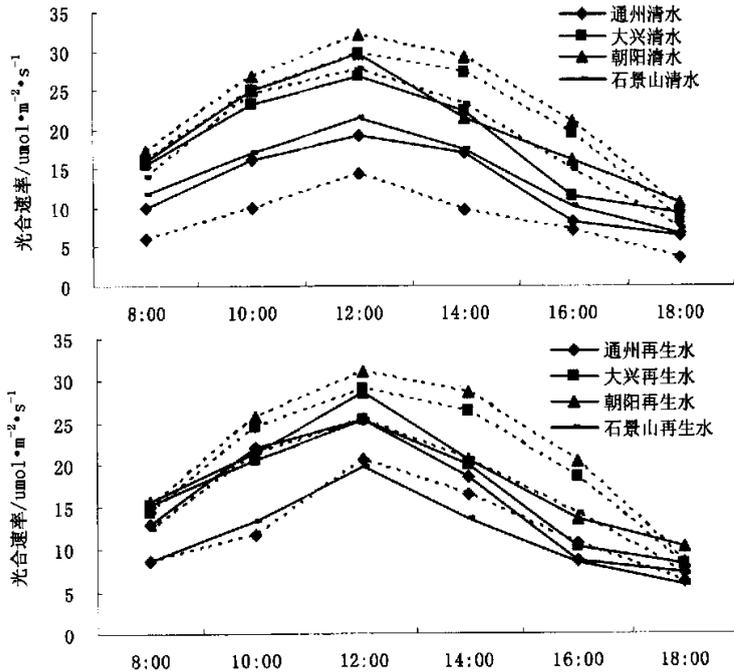


图 4-10 夏玉米各处理光合速率的全天变化情况

注：实线代表苗期，虚线代表乳熟期。

玉米的光合速率在上午和下午弱光条件下差异较小,中午强光下差异较大。在清水灌溉条件下,对于苗期的光合速率,朝阳⁴⁰>大兴³⁰>石景山⁵⁰>通州⁰,这与苗期的干物重的变化规律相似,因为光合作用是作物生产的基础,作物90%以上的干物质来自光合作用;对于乳熟期的光合速率,同样有朝阳⁴⁰>大兴³⁰>石景山⁵⁰>通州⁰,这就决定了在清水灌溉条件下,夏玉米的单株产量是朝阳⁴⁰最高,大兴³⁰次之,通州⁰最小。因为生育后期功能叶片的光合功能对玉米的丰产性起着至关重要的作用,很多研究结果表明,光合速率与子粒产量成正相关。在再生水灌溉条件下亦是如此。综合苗期和乳熟期对玉米光合速率进行配对分析(见表4-10),结果表明除通州⁰再生水处理和石景山⁵⁰再生水处理未达到显著性差异外,其他各配对之间均达到极显著性差异水平,这说明不同污灌年限对光合速率有一定的影响。

表 4-10 光合速率的配对比较结果

配对	统计量t	自由度	显著性概率	配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ 清—大兴 ³⁰ 清	-6.128	11	0.000	通州 ⁰ 清—大兴 ³⁰ 清	-6.128	11	0.000
通州 ⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-6.930	11	0.000	通州 ⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-6.930	11	0.000
通州 ⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	-3.600	11	0.004	通州 ⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	-3.600	11	0.004
大兴 ³⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-4.779	11	0.001	大兴 ³⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-4.779	11	0.001
大兴 ³⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	6.104	11	0.000	大兴 ³⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	6.104	11	0.000
朝阳 ⁴⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	9.125	11	0.000	朝 ⁴⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	9.125	11	0.000
通州 ⁰ 清—通州 ⁰ 再	-5.474	11	0.000	朝阳 ⁴⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 再	4.695	11	0.001
大兴 ³⁰ 清—大兴 ³⁰ 再	5.126	11	0.000	石景山 ⁵⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 再	6.209	11	0.000

4.4.2 对气孔导度的影响

夏玉米各处理气孔导度的全天变化情况见图4-11。从图中可以看出,不同污灌年限土壤上玉米的气孔导度在上午和下午弱光条件下差异较小,中午强光下差异较大,苗期的气孔导度和乳熟期的差异显著,苗期的气孔导度大于乳熟期的气孔导度。但无论是苗期还是乳熟期,在清水灌溉条件下,其气孔导度都是朝阳⁴⁰>大兴³⁰>石景山⁵⁰>通州⁰;在再生水灌溉条件下,对于苗期的气孔导度,朝阳⁴⁰>大兴³⁰>通州⁰>石景山⁵⁰,对于乳熟期,朝阳⁴⁰>大兴³⁰>石景山⁵⁰>通州⁰。这些变化规律与光合速率的变化规律相似。这说明光合速率与气孔导度有一定的关系。气孔作为二氧化碳和水进行交换的门户,其开放程度势必影响到细胞内二氧化碳的同化及水分的利用,所以气孔导度出现变化,光合速率和蒸腾速率相应的就会有所变化。综合苗期和乳熟期对气孔导度进行配对分析(见表4-11),分析结果显示所有配对均达到显著性差异水平,这说明不同污灌年限土壤对气孔导度影响显著。

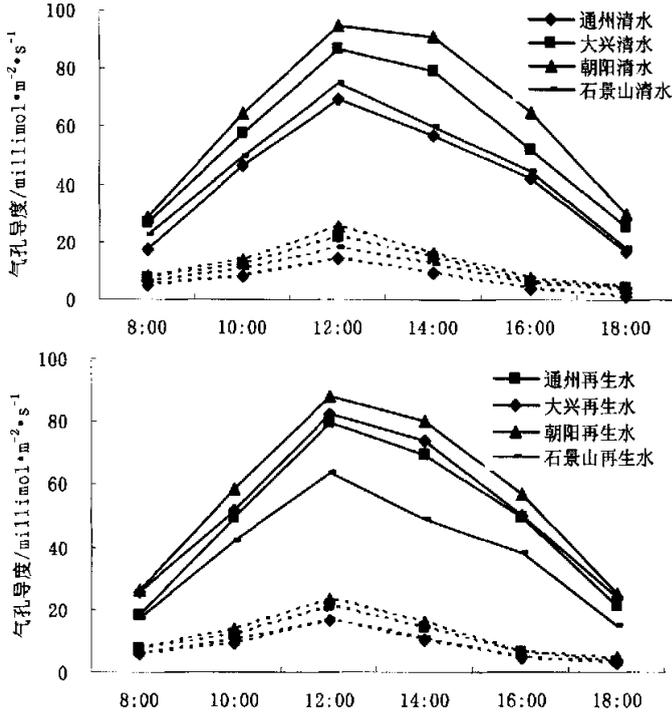


图 4-11 夏玉米各处理气孔导度的全天变化情况

注：实线代表苗期，虚线代表乳熟期。

表 4-11 气孔导度的配对比较结果

配对	统计量t	自由度	显著性概率	配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ 清—大兴 ³⁰ 清	-4.854	11	0.001	通州 ⁰ 清—大兴 ³⁰ 清	-5.213	11	0.000
通州 ⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-4.525	11	0.001	通州 ⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-6.506	11	0.000
通州 ⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	-7.805	11	0.000	通州 ⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	2.411	11	0.035
大兴 ³⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-3.543	11	0.005	大兴 ³⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 清	-3.630	11	0.004
大兴 ³⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	3.582	11	0.004	大兴 ³⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	3.675	11	0.004
朝阳 ⁴⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	3.733	11	0.003	朝 ⁴⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 清	3.859	11	0.003
通州 ⁰ 清—通州 ⁰ 再	-3.251	11	0.008	朝阳 ⁴⁰ 清—朝阳 ⁴⁰ 再	3.403	11	0.006
大兴 ³⁰ 清—大兴 ³⁰ 再	3.166	11	0.009	石景山 ⁵⁰ 清—石景山 ⁵⁰ 再	3.600	11	0.004

4.5 不同污灌年限土壤对产量的影响

清水灌溉条件下，各处理的室内各考种指标观测结果详见表 4-12。

表 4-12 清水灌溉条件下夏玉米各室内考种指标观测值

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数/行	行粒数/粒	百粒重/g	产量/g·株 ⁻¹
通州 ⁰ 清水	17.17	4.222	12.0	30.7	13.42	49.39
大兴 ³⁰ 清水	17.53	4.157	11.8	31.7	15.09	56.55
朝阳 ⁴⁰ 清水	17.97	4.264	13.0	33.0	14.82	63.58
石景山 ⁵⁰ 清水	17.87	4.263	12.0	32.3	14.17	54.98

通过上图可以看出,清水灌溉条件下各污灌区土壤处理下的穗长、行粒数、百粒重和产量均比通州⁰大。大兴³⁰的穗粗和穗行数与通州⁰差不多,但朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰的穗粗和穗行数比通州⁰大。对于总粒数,大兴³⁰、朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰分别比通州⁰多1.8%、16.6%和5.4%,对于百粒重,大兴³⁰、朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰分别比通州⁰大12.4%、10.4%和5.6%,从而对于单株产量,大兴³⁰、朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰分别比通州⁰高14.5%、28.7%和11.3%。这表明,在清水灌溉条件下,不同污灌年限土壤能不同程度的提高玉米产量,但是石景山⁵⁰产量分别比大兴³⁰和朝阳⁴⁰低2.8%和13.5%。这说明虽然一定期限内的历史污灌区土壤能提高玉米产量,但是这种提高不是绝对的,是有条件的,长时间的不加限制的污灌会改变土壤原来的结构和化学组成,从而造成作物减产。

再生水灌溉条件下,各处理的室内各考种指标观测结果详见表4-13。从表中可以看出各污灌区土壤对夏玉米增产的效果没有清水灌溉表现的那么明显,污灌区的某些指标还比通州⁰小。对于总粒数,只有朝阳⁴⁰比通州⁰大,其他两个处理都比通州⁰小,对于百粒重,大兴³⁰、朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰分别比通州⁰大4.4%、4.2%和2.5%,从这可以看出再生水灌溉能增加玉米的饱满度,提高百粒重。从而对于单株产量,大兴³⁰、朝阳⁴⁰分别比通州⁰高1.8%、16.4%,石景山⁵⁰反而比通州⁰低3.7%。这表明,在再生水灌溉条件下,不同污灌年限土壤不一定能提高玉米产量。

表 4-13 再生水灌溉条件下夏玉米各室内考种指标观测值

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数/行	行粒数/粒	百粒重/g	产量/g·株 ⁻¹
通州 ⁰ 再生水	17.93	4.230	11.3	33.0	14.54	54.38
大兴 ³⁰ 再生水	17.73	4.235	11.3	31.7	15.18	54.48
朝阳 ⁴⁰ 再生水	18.03	4.575	12.7	33.0	15.15	63.33
石景山 ⁵⁰ 再	16.93	4.119	11.3	31.0	14.91	52.38

通过多元统计分析表明(见表4-14),不同污灌年限土壤对穗行数影响显著,对其他指标的影响未达到显著性水平。

表 4-14 考种指标的各目标因素效应检验表

方差来源	变量	自由度	统计量	显著性概率	方差来源	变量	自由度	统计量	显著性概率
不同污灌年限土壤	穗长	3	0.520	0.698	灌溉水质	穗长	1	0.003	0.958
	穗粗	3	1.317	0.413		穗粗	1	0.446	0.552
	穗行数	3	41.727	0.006		穗行数	1	33.000	0.010
	行粒数	3	0.728	0.600		行粒数	1	0.111	0.760
	百粒重	3	5.218	0.104		总粒数	1	2.675	0.200
	产量	3	8.671	0.055		产量	1	0.000	0.993

4.6 不同污灌年限土壤对品质的影响

除了产量,品质也是人们普遍关心的问题。不同处理夏玉米各品质指标的测定结果如表4-15所示。可溶性糖含量采用碱性铜试剂法测定,蛋白质含量采用凯氏定氮法,淀粉采用凯氏滴定法,游离氨基态N含量用荧光光度计测量,重金属Cd采用SB-110原子荧光光度计检测。对于蛋白质含量各区的再生水处理都高于清水处理,而对于游离氨基态N含量再生水处理均低于清水处理,对于淀粉含量通州⁰的清水处理高于再生水处理,而各污灌土壤处理则是再生水处理高于清

水处理。通过对重金属 Cd 的检测,各处理均未检测出 Cd (Cd 检出下限为 0.01mg/kg)。这是因为污灌区土壤中的重金属主要富集在作物的根部,向上迁移能力比较弱。总体看来,各污灌区土壤对玉米品质没有产生明显的影响。

表 4-15 夏玉米的各品质指标

处理	游离氨基态 N/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性糖 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	淀粉 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	重金属 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
通州清	376.89	12.891	3.494	194.37	未检出
通州再	309.91	15.31	3.994	174.21	未检出
大兴清	418.17	13.983	3.829	198.15	未检出
大兴再	403.16	13.806	3.943	215.03	未检出
朝阳清	427.89	14.478	3.659	172.57	未检出
朝阳再	389.77	13.689	3.684	178.75	未检出
石景山清	520.11	12.068	3.35	193.49	未检出
石景山再	269.21	13.227	3.512	195.5	未检出

4.7 小结

通过上述分析主要可以得出以下结论:

1. 总体说来,不同污灌年限土壤对株高、叶面积、干重和各生理参数都有一定的影响,并在某些关键期达到了显著性水平。

2. 在清水灌溉条件下,大兴³⁰处理的玉米长势较好,株高、叶面积、干重和产量都比通州⁰处理大。朝阳⁴⁰的长势同样好于通州⁰,但石景山⁵⁰的玉米生长缓慢,各生物学指标与其他处理存在明显差异,说明石景山⁵⁰土壤已经受到一定程度的污染,对玉米生长产生了抑制作用,其所受污染程度有待更深入的研究。

3. 不同污灌年限土壤没有对玉米品质产生明显的影响。通过对重金属Cd的检测,各处理均未检测出Cd (Cd检出下限为0.01mg/kg)。

第五章 再生水灌溉对玉米生长的影响

5.1 再生水灌溉对株高的影响

不同处理夏玉米株高的变化趋势如图 5-1 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的株高方差分析表见表 4-2，不同污灌年限土壤的清水和再生水的配对比较结果见表 5-1。

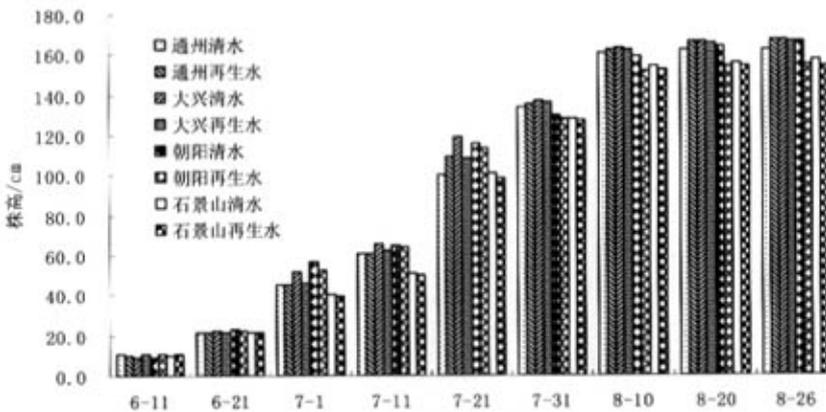


图 5-1 夏玉米各处理株高的变化趋势

表 5-1 株高的配对比较结果

清水和再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ 清水-通州 ⁰ 再生水	-2.265	8	0.050
大兴 ³⁰ 清水-大兴 ³⁰ 再生水	2.071	8	0.072
朝阳 ⁴⁰ 清水-朝阳 ⁴⁰ 再生水	2.662	8	0.029
石景山 ⁵⁰ 清水-石景山 ⁵⁰ 再生水	3.832	8	0.005

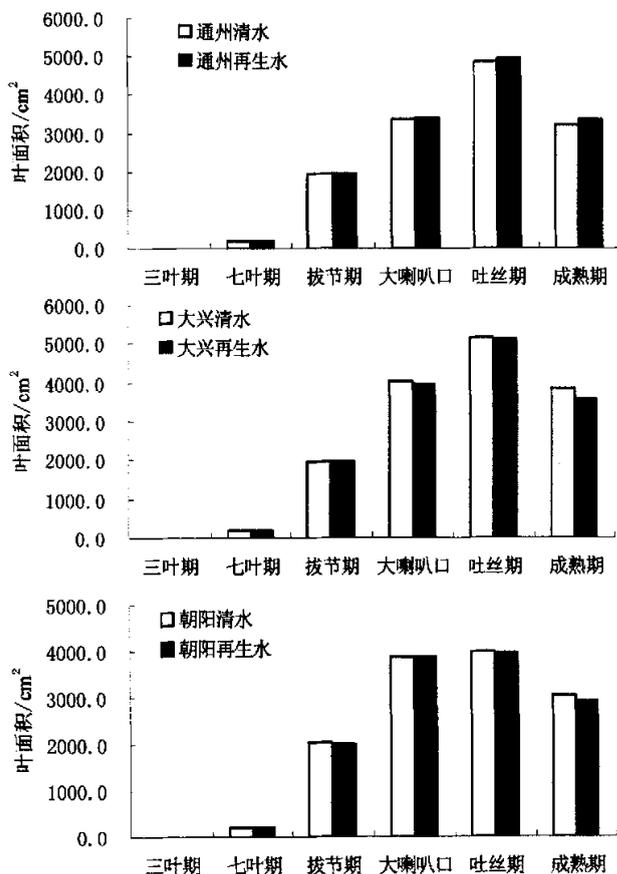
从图中可以看出对于通州⁰，再生水处理的株高观测值普遍比清水处理的大，这说明再生水中确实含有一定量的有利于作物生长的营养物质(如 N, P, K 和其它微量元素)。而对于各污灌土壤，再生水处理反而比清水处理小，这是因为再生水带来养分的同时也会带来一定量的污染物，这些污染物会加重污灌区土壤的污染程度，从而影响作物生长。通过对清水和再生水进行配对样本 T 检验发现，朝阳⁴⁰再生水处理的株高观测值显著小于清水水处理，石景山⁵⁰的清水处理与再生水处理同样存在显著差异，这表明再生水灌溉对朝阳⁴⁰和石景山⁵⁰玉米株高影响较大。但是方差分析结果显示，在显著性水平 $\alpha \leq 0.05$ 的情况下，再生水处理和清水处理之间不存在显著差异，这说明总体上再生水对株高影响和小，这是因为再生水对通州⁰的促进作用削弱了再生水对污灌土壤的抑制作用。但是通过对在各污灌土壤种植下的株高进行双因素方差分析发现(表 5-2)，再生水仅对 7 月 31 日的株高影响显著，不同污灌年限土壤对 6 月 21 至 7 月 31 号的株高影响显著。如此看来，再生水对各污灌土壤下的玉米株高影响同样不明显。

表 5-2 株高的双因素方差分析表

方差来源	日期	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	日期	自由度	统计量F	显著性概率
污灌土壤	6-11	2	0.178	0.849	灌溉水质	6-11	1	4.797	0.160
	6-21	2	19.111	0.050		6-21	1	12.250	0.073
	7-1	2	33.036	0.029		7-1	1	5.228	0.150
	7-11	2	76.619	0.013		7-11	1	2.430	0.259
	7-21	2	12.653	0.073		7-21	1	3.443	0.205
	7-31	2	1023.429	0.001		7-31	1	51.571	0.019
	8-10	2	8.796	0.102		8-10	1	2.541	0.252
	8-20	2	4.751	0.174		8-20	1	1.910	0.301
	8-26	2	3.307	0.232		8-26	1	2.259	0.272

5.2 再生水灌溉对叶面积的影响

不同处理夏玉米叶面积的变化趋势如图 5-2 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的叶面积方差分析表见表 4-4，不同污灌年限土壤的清水和再生水的配对比较结果见表 5-3。



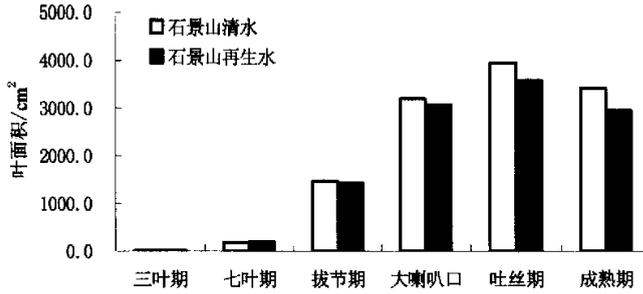


图 5-2 夏玉米各处理叶面积的变化趋势

表 5-3 叶面积的配对比较结果

清水和再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ 清水-通州 ⁰ 再生水	-2.181	5	0.081
大兴 ³⁰ 清水-大兴 ³⁰ 再生水	1.591	5	0.172
朝阳 ⁴⁰ 清水-朝阳 ⁴⁰ 再生水	1.823	5	0.128
石景山 ⁵⁰ 清水-石景山 ⁵⁰ 再生水	1.964	5	0.107

因为叶面积与株高具有一定的相关性，所以叶面积表现出来的规律与株高类似。通过配对 T 检验和方差分析，结果表明再生水对叶面积影响同样不显著。

5.3 再生水灌溉对干物重和根冠比的影响

5.3.1 对地上干物重的影响

夏玉米各处理地上干物重的变化情况如图 5-3 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的株高方差分析表见表 4-6，各处理的配对比较结果见表 5-4。

地上干物重的变化规律和株高、叶面积的变化规律相似。从观测数据上看，对于通州⁰，自七叶期起，再生水处理的地上干物重观测值比清水处理的大 9.0%~26.8%；而对于各污灌土壤，再生水处理的地上干物重普遍比清水处理的小。通过对清水和再生水进行配对样本 T 检验发现，再生水对地上干物重的影响秩序为：大兴³⁰处理>通州⁰处理>石景山⁵⁰处理>朝阳⁴⁰处理。方差分析结果显示，灌溉水质对各关键期的地上干物重的影响较小，其显著性概率都小于 0.05，这同样说明再生水灌溉没有对地上干物重产生明显影响。但是通过对大兴³⁰、朝阳⁴⁰、石景山⁵⁰的地上干重进行双因素方差分析发现，再生水灌溉仅对吐丝期的地上干重影响显著 (sig.=0.041)。

表 5-4 地上干物重的配对比较结果

清水和再生水配对	统计量t	自由度	显著性概率
通州 ⁰ 清水-通州 ⁰ 再生水	-1.628	5	0.164
大兴 ³⁰ 清水-大兴 ³⁰ 再生水	2.241	5	0.075
朝阳 ⁴⁰ 清水-朝阳 ⁴⁰ 再生水	1.553	5	0.181
石景山 ⁵⁰ 清水-石景山 ⁵⁰ 再生水	1.623	5	0.165

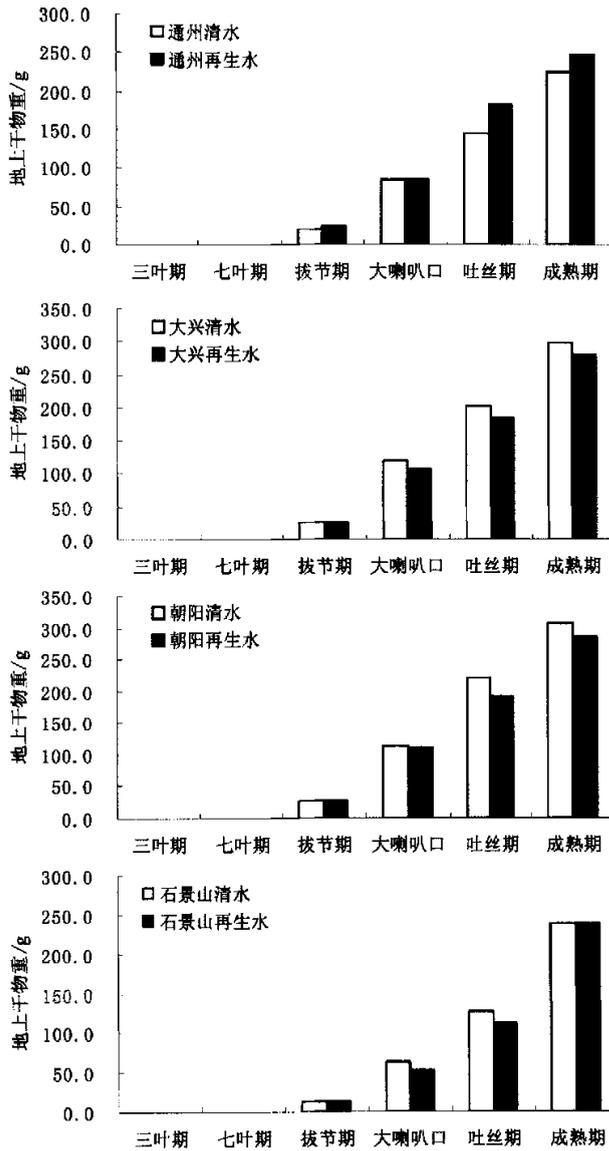


图 5-3 夏玉米各处理地上干物重的变化情况

5.3.2 对根冠比的影响

各处理根冠比的变化趋势如图 5-4 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的根冠比方差分析表见表 4-9。

对于地下干物重，其观测结果没有表现出明显的规律，但是通过分析根冠比变化动态图就会发现，各污灌区再生水处理的根冠比呈现出比清水处理的大的趋势，而且污灌时间越长，根冠比越大。这是因为轻微的盐分胁迫能促进根系生长，污灌时间越长的地方，盐分积累就越多，从而根冠比也就越大。但是通州⁰清水处理的根冠比比再生水处理的大，说明在清灌区利用再生水灌溉

能促进冠层的生长，对作物生长有利。经过多元统计分析可看出，不同污灌年限土壤对根冠比的影响比灌溉水质对根冠比的影响大。

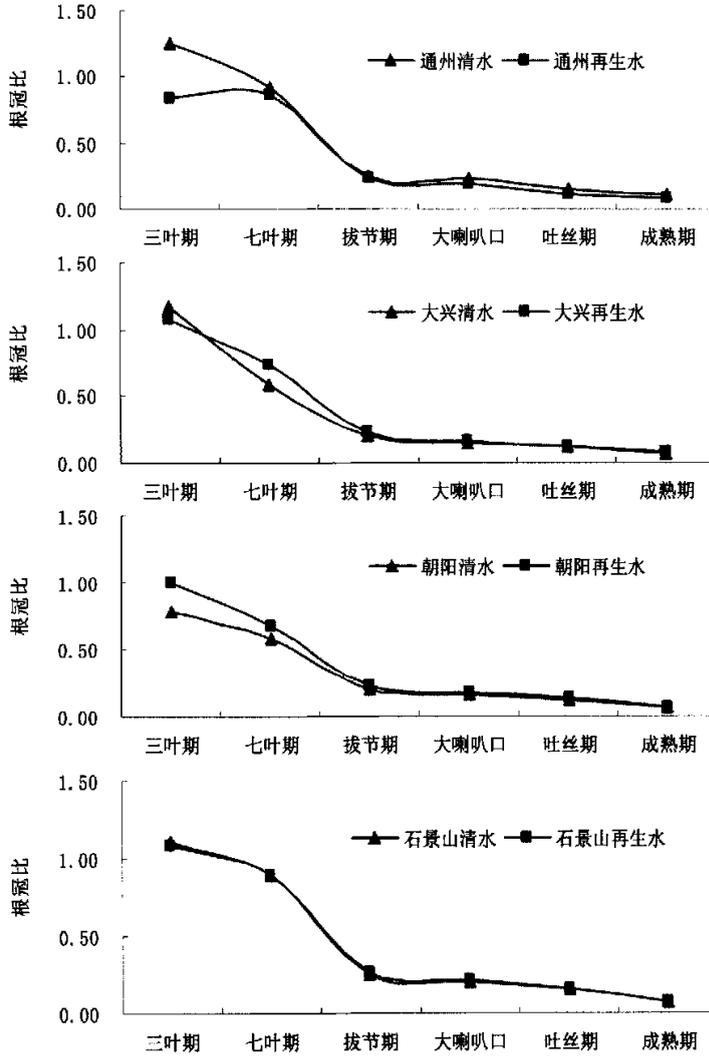


图 5-4 玉米各处理根冠比的变化趋势

5.4 再生水灌溉对夏玉米生理特征的影响

5.4.1 对光合速率的影响

夏玉米苗期和乳熟期的光合速率的全天观测值如表 5-5 和表 5-6 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的光合速率方差分析结果见表 5-7。

表 5-5 苗期光合速率的全天观测值

处理	umol·m ⁻² ·s ⁻¹					
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
通州 ⁰ 清水	9.90	16.24	19.30	17.10	8.20	6.40
通州 ⁰ 再生水	13.05	22.10	25.40	18.60	8.68	7.30
大兴 ³⁰ 清水	15.42	23.20	26.90	22.30	11.60	9.30
大兴 ³⁰ 再生水	15.24	20.60	25.25	19.97	10.20	8.15
朝阳 ⁴⁰ 清水	15.97	25.10	29.60	21.40	16.10	10.70
朝阳 ⁴⁰ 再生水	15.62	21.35	28.65	20.50	13.50	10.25
石景山 ⁵⁰ 清	11.69	17.15	21.50	17.50	10.20	6.75
石景山 ⁵⁰ 再	8.60	13.40	19.70	13.50	8.50	5.70

表 5-6 乳熟期光合速率的全天观测值

处理	umol·m ⁻² ·s ⁻¹					
	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
通州 ⁰ 清水	5.93	9.90	14.30	9.80	7.00	3.50
通州 ⁰ 再生水	8.67	11.80	20.50	16.40	10.67	6.10
大兴 ³⁰ 清水	16.10	25.00	29.65	27.20	19.40	8.40
大兴 ³⁰ 再生水	14.40	24.50	29.10	26.40	18.60	8.10
朝阳 ⁴⁰ 清水	17.35	26.90	32.20	29.30	21.10	10.00
朝阳 ⁴⁰ 再生水	15.10	25.70	31.10	28.60	20.40	8.50
石景山 ⁵⁰ 清	13.90	24.50	27.80	23.20	14.95	7.20
石景山 ⁵⁰ 再	12.30	21.35	25.35	20.50	14.20	7.10

表 5-7 光合速率的双因素方差分析表

方差来源	时间	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	时间	自由度	统计量F	显著性概率		
苗期	8点	3	4.819	0.114	乳熟期	8点	3	11.955	0.036		
	10点	3	2.285	0.257		10点	3	45.593	0.005		
	不同污灌年限土壤	12点	3	4.032		0.141	不同污灌年限土壤	12点	3	10.466	0.043
		14点	3	5.369		0.100		14点	3	11.773	0.036
		16点	3	18.822		0.019		16点	3	23.129	0.014
		18点	3	16.626		0.023		18点	3	4.879	0.113
灌溉水质	8点	1	0.008	0.932	灌溉水质	8点	1	0.369	0.586		
	10点	1	0.208	0.679		10点	1	0.500	0.530		
	12点	1	0.050	0.837		12点	1	0.074	0.804		
	14点	1	1.513	0.306		14点	1	0.085	0.789		
	16点	1	4.064	0.137		16点	1	0.103	0.769		
	18点	1	0.860	0.422		18点	1	0.041	0.853		

从表 5-5 和表 5-6 可以看出对于通州⁰, 两个关键期再生水处理的光合速率观测值都大于清水处理, 而且它们的配对结果(见表 4-11)显示均达到显著性水平; 而对于各污灌土壤, 再生水处理反而比清水处理小, 差异同样达到显著性水平。但通过对光合速率的双因素方差分析, 结果表明无论是苗期还是乳熟期, 再生水灌溉对玉米光合速率的影响都不显著, 这是因为再生水灌溉对通州⁰处理的促进作用在一定程度上抵消了再生水灌溉对污灌土壤的抑制作用。不同污灌年限土壤对光合速率有一定的影响, 而且对乳熟期的影响大于对苗期的影响。

5.4.2 对气孔导度的影响

夏玉米苗期和乳熟期的气孔导度的全天观测值如表 5-8 和表 5-9 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的气孔导度方差分析结果见表 5-10。

表 5-8 苗期气孔导度的全天观测值 millimol·m⁻²·s⁻¹

处理	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
通州 ⁰ 清水	17.20	46.40	69.60	57.20	42.00	16.76
通州 ⁰ 再生水	18.20	49.65	79.60	69.35	49.32	20.81
大兴 ³⁰ 清水	26.80	57.50	86.90	79.60	52.14	25.20
大兴 ³⁰ 再生水	25.60	51.60	82.20	74.00	50.00	23.88
朝阳 ⁴⁰ 清水	28.27	64.80	95.10	91.50	65.26	30.05
朝阳 ⁴⁰ 再生水	26.05	58.70	88.35	80.30	57.01	25.09
石景山 ⁵⁰ 清	22.16	49.95	74.90	60.20	44.94	18.06
石景山 ⁵⁰ 再	17.16	42.00	63.80	49.10	38.28	14.73

表 5-9 乳熟期气孔导度的全天观测值 millimol·m⁻²·s⁻¹

处理	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
通州 ⁰ 清水	5.20	8.30	14.45	9.20	3.77	1.30
通州 ⁰ 再生水	5.70	9.10	16.35	10.30	4.73	2.87
大兴 ³⁰ 清水	7.27	12.57	21.60	15.00	6.30	4.10
大兴 ³⁰ 再生水	7.40	11.85	21.10	13.97	6.17	3.50
朝阳 ⁴⁰ 清水	7.90	13.93	25.50	16.30	7.40	4.40
朝阳 ⁴⁰ 再生水	7.67	13.60	23.05	15.83	6.50	4.37
石景山 ⁵⁰ 清	6.40	10.40	17.80	12.40	5.63	3.50
石景山 ⁵⁰ 再	5.55	10.17	16.45	10.60	4.60	3.13

表 5-10 气孔导度的双因素方差分析表

方差来源	时间	自由度	统计量F	显著性概率	方差来源	时间	自由度	统计量F	显著性概率		
苗期	8点	3	14.272	0.028	乳熟期	8点	3	14.732	0.027		
	10点	3	8.012	0.061		10点	3	46.508	0.005		
	12点	3	4.784	0.116		12点	3	19.002	0.019		
	不同污灌年限土壤	14点	3	6.343		0.082	不同污灌	14点	3	21.586	0.016
		16点	3	5.835		0.091	年限土壤	16点	3	6.826	0.075
		18点	3	6.863		0.074	18点	3	3.979	0.143	
灌溉水质	8点	1	2.220	0.233	灌溉水质	8点	1	0.153	0.722		
	10点	1	2.750	0.196		10点	1	0.137	0.736		
	12点	1	0.470	0.542		12点	1	0.422	0.562		
	14点	1	0.509	0.527		14点	1	0.803	0.436		
	16点	1	0.483	0.537		16点	1	0.362	0.590		
	18点	1	0.503	0.529		18点	1	0.085	0.790		

光合速率、蒸腾速率与气孔导度有一定的关系。气孔作为二氧化碳和水分进行交换的门户，其开放程度势必影响到细胞内二氧化碳的同化及水分的利用，所以气孔导度同光合速率有相似的变化规律。通过双因素方差分析，结果表明无论是苗期还是乳熟期，再生水灌溉对玉米气孔导度的影响都不显著，不同污灌年限土壤对乳熟期的气孔导度影响很大，几乎全天都达到了显著水平。

上述玉米生理参数分析出来的结果同株高、叶面积和干重的结果类似，综合起来可以看出，再生水能促进清灌区玉米的生长，但是会抑制污灌区玉米的生长。

5.5 再生水灌溉对产量的影响

不同处理百粒重和单株产量的观测结果分别如图 5-5 和图 5-6 所示。不同灌溉水质和不同污灌年限的室内考种指标方差分析表见表 4-14。

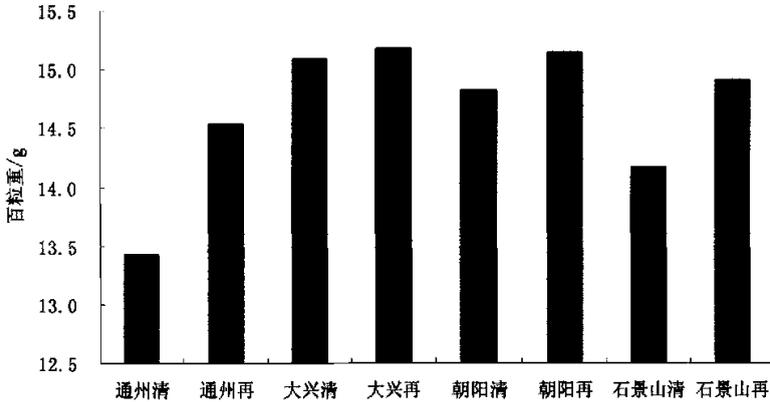


图 5-5 夏玉米各处理的百粒重

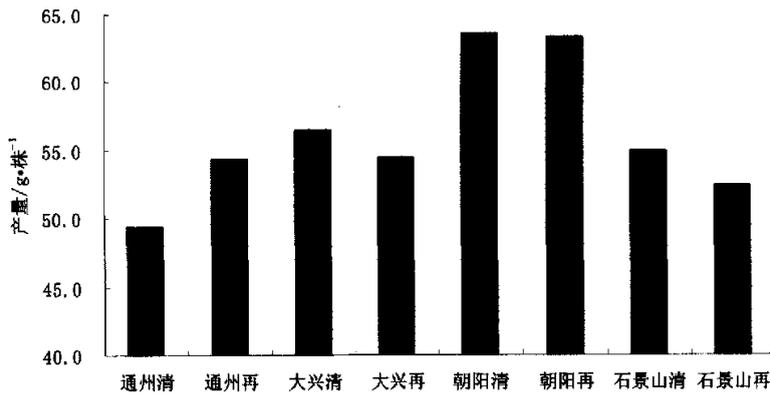


图 5-6 夏玉米各处理的单株产量

室内各考种指标的变化规律和株高、叶面积、干物重的变化规律具有相似性。从数据上来看，通州⁰再生水处理的总粒数、百粒重、产量分别比清水处理的大 1.6%、8.3% 和 10.1%，对于大兴³⁰，再生水处理的总粒数和产量分别比清水处理的小 4.2% 和 3.7%，但百粒重比清水处理的稍大，同样，对于石景山⁵⁰，其再生水处理的总粒数和产量分别比清水处理的小 4.1% 和 4.7%，其百粒重比清水处理大 5.2%，朝阳⁴⁰有同大兴³⁰、石景山⁵⁰类似的规律。这表明再生水灌溉能增加玉米的饱满度，增加其百粒重，然而再生水并不一定能提高玉米的产量，对于清灌区再生水中的营养物质确实能增加产量，但在历史污灌区利用再生水灌溉反而会造成作物减产，因为再生水中的盐分会增加土壤中的总含盐量，再生水中的固体悬浮物会降低土壤的总空隙率和导水率，再生水中的高含量的 Na⁺会使土壤 pH 值升高进而造成土壤发生碱化，再生水中含有丰富的微生物

包括致病菌以及一定的重金属残留，这些都会加重污灌区土壤的污染程度，从而对作物生长产生不利影响。但多元统计分析结果表明，再生水对产量影响不显著。

5.6 再生水灌溉对品质的影响

不同处理夏玉米各品质指标的测定结果如 5-11 所示。通过对各品质指标进行对比发现，再生水灌溉会降低玉米籽粒中游离氨基态 N 的含量，石景山⁵⁰ 表现的最为明显，减少幅度达到 93.2%；同时再生水也能提高籽粒中蛋白质的含量，虽然增加幅度并不大，这与董克虞等^[68] 人的研究结果（污灌能显著提高冬小麦籽粒内粗蛋白和氨基酸含量）相似，对于淀粉含量通州⁰ 清水处理高于再生水处理，而对各污灌土壤则是再生水处理高于清水处理。而对于可溶性糖，测试结果没有表现出明显的规律。通过对玉米籽粒中重金属 Cd 的检测，检查结果均为未检出（Cd 检出下限为 0.01mg/kg）。

表 5-11 夏玉米的各品质指标

灌溉区	灌溉水质	游离氨基态 N/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	可溶性糖 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	蛋白质 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	淀粉 / $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	重金属 / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
通州区	清水	376.89	12.891	3.494	194.37	未检出
	再生水	309.91	15.31	3.994	174.21	未检出
	再比清增减	-66.98	2.419	0.50	-20.16	/
大兴区	清水	418.17	13.983	3.829	198.15	未检出
	再生水	403.16	13.806	3.943	215.03	未检出
	再比清增减	-15.01	-0.177	0.114	16.88	/
朝阳区	清水	427.89	14.478	3.659	172.57	未检出
	再生水	389.77	13.689	3.684	178.75	未检出
	再比清增减	-38.12	-0.789	0.025	6.18	/
石景山	清水	520.11	12.068	3.35	193.49	未检出
	再生水	269.21	13.227	3.512	195.5	未检出
	再比清增减	-250.9	1.159	0.162	2.01	/

5.7 小结

通过再生水灌溉对夏玉米生长影响的研究，得出如下结论：

1. 再生水中含有一定量的有机物质和作物所需要的微量元素，所以再生水灌溉能促进通州⁰ 玉米的生长；同时再生水中较高的水溶钠、水溶氯、全盐量和其他有害物质会增加污灌区土壤的污染程度，从而抑制作物生长，所以对于污灌土壤再生水处理的各生长指标普遍低于清水处理。这表明利用再生水灌溉并不一定能促进作物生长。

2. 再生水灌溉会降低玉米籽粒中游离氨基态N的含量，但能提高籽粒中蛋白质的含量，对可溶性糖没有明显影响。

3. 多元统计分析结果表明再生水没有对玉米产量产生显著影响，同时对品质的影响也不太明显，所以可以利用再生水进行灌溉。

第六章 结论与建议

6.1 主要结论

本文通过查阅文献和室内试验对北京历史污灌区进行了适耕性评价,并且在不同污灌年限土壤条件下就再生水灌溉对夏玉米生长影响进行了盆栽试验研究,得出的主要结论如下:

1. 各污灌区土壤中重金属 Zn、Cd、Hg 的含量较 20 世纪 70 年代末期有明显增加,个别点土壤中的 Zn、Hg 有超标现象;与各重金属元素的背景值相比,各重金属含量均有大幅度的增加。污灌区的作物和蔬菜也遭受了一定程度的污染,个别重金属含量超标。但总体看来,污灌区土壤中各项重金属含量普遍低于国家《土壤环境质量标准》中二级标准限值。

2. 污灌区各土层土壤容重均较大,土壤总孔隙率都低于作物生长适宜的程度,土壤饱和和导水率随着深度的增大而减少。各污灌区土壤中 EC 值并不太高,但均有随着深度的增加而增加的趋势。各区土壤 pH 值大于或接近 8.5 的范围逐渐增加,这有可能使土壤发生碱化。

3. 在清水灌溉条件下,大兴³⁰处理的玉米长势较好,株高、叶面积、干重和产量都比通州⁰处理的大。朝阳⁴⁰的长势同样好于通州⁰,但石景山⁵⁰的玉米生长缓慢,各生物学指标与其他处理存在明显差异,说明石景山⁵⁰土壤已经受到一定程度的污染。

4. 再生水灌溉能促进通州⁰玉米的生长,但会抑制各污灌区玉米的生长。这表明利用再生水灌溉并不一定能促进作物生长,因为再生水中的盐分会增加土壤中的总含盐量,再生水中的固体悬浮物会降低土壤的总空隙率和导水率,再生水中的高含量的 Na⁺会使土壤 pH 增加,再生水中含有丰富的微生物包括致病菌以及一定的重金属残留,这些都会加重污灌土壤的污染程度,从而对作物生长产生不利影响。

5. 不同污灌年限土壤没有对玉米品质产生明显的影响。再生水灌溉会降低玉米籽粒中游离氨基态 N 的含量,但能提高籽粒中蛋白质的含量,对可溶性糖没有明显影响。通过对重金属 Cd 的检测,各处理均未检测出 Cd (Cd 检出下限为 0.01mg/kg)。

6.2 建议

1. 石景山⁵⁰处理下的玉米生长缓慢,各生物学指标与其他处理存在明显差异,说明石景山⁵⁰土壤已经受到一定程度的污染。由于时间关系,没有对石景山土壤的污染程度进行更深入的研究,建议今后继续研究。

2. 因为盆栽试验具有一定的局限性,所以应该结合大田试验,研究再生水对土壤及作物的影响。对于长期再生水灌溉对土壤及其作物影响的研究上,应在微观和机理上做更深层次的探讨。

3. 虽然再生水灌溉会对污灌土壤处理条件下的玉米生长产生一定的影响,但对玉米产量和品质没有产生明显影响,所以可以利用再生水代替清水进行灌溉。

参考文献

- [1] 郝仲勇, 刘洪禄. 北京市水资源短缺及对策浅析. 北京水利, 2000 (5): 17~18
- [2] 廖日红. 北京市再生水综合利用策略研究. 水利发展研究, 2004 (1): 32~34
- [3] Feigin A.,Bielorai H.,Dag Y.,Kipnis T.,et al.The nitrogen factor in the management of effluent-irrigated soil.*Soil Science*,1978,125(4):248~254
- [4] Feigin A.,Vaisman I.,Bielorai H..Drip irrigation of cotton with treated municipal effluents: II.Nutrient availability in soil.*Journal of Environmental Quality*.1984,13(2):234~238
- [5] Feigin A.,Raviman I., Shalhevet J..Irrigation with treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, 1991,15(3):58~60
- [6] Achari M.S., Arunachalam G.Studies on the influence of paper millEffluents on the yield, availability and uptake of nutrients in rice.*Journal of the Indian Society of Soil Science*,1999,47(2): 276~280
- [7] 张超品, 刘洪禄, 吴文勇, 等. 再生(污)水灌溉利用研究.北京水利,2004 (4): 17~19
- [8] Wichham D.L.. A brief look at the early days of modern irrigation.*Landscape and Irrigation*, 2000, 92(4):30~34
- [9] Friedler E.. The jeezrael valley project for wastewater reclamation and reuse, *Isreal Water Science Technology*, 1999, 40(4):347~354
- [10] Pollice A., Lopez A., Laera G., et al. Tertiary filtered municipal wastewater as alternative water source in agriculture: a field investigation in Southern Italy. *Science of the Total Environment*, 2004,32(4):201-210
- [11] Papaiaacovou I. Case study-wasterwater reuse in Limassol as an alternative water source. *Desalination*, 2001,13(8):55-59
- [12] Mohammad S., Nakhla G.F.. Wastewater reuse in Jubail, Saudi Arabia.*Water Research*, 1995, 29(6):1579~1584
- [13] Chakrabarti C. Residual effects of long-term land application of dometic waste-water, *Environment Protect*,1995, 21(3):333~339
- [14] 全国主要污水灌区农业环境质量普查评价(资料汇编). 北京: 农牧渔业部环境科研检测所, 1984
- [15] 黄俊友, 胡晓东, 俞青荣. 污水灌溉条件下作物对土壤重金属吸收特征比较. *节水灌溉*, 2005 (5), 5~7
- [16] 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: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业大学, 2002
- [17] Basta N.T.,Tabatahai M.A..Effect of cropping system on adsorption of metals by soil.*Soil and Science*,1992,153(14):331~335
- [18] 师荣光, 赵玉杰, 高怀友, 等. 天津市郊蔬菜重金属污染评价与特征分析. *农业环境科学学报*, 2005, 24(增刊): 169~173

- [19] Shahalam A.,Zahra B.M.,Jaradat A..Wastewater irrigation effect on soil, crop and environment: A pilot scale study at Irbid, Jordan. *Water Air and Soil Pollution*,1998,106 (34):425~445
- [20] Friedel J.K.,Langer T.,Siebe C..Effect of long-term waste water irrigation on soil matter,soil microbial biomass and its activities in central Mexico. *Biology and Fertility of Soil*,2000,31(2): 414~421
- [21] Reyes I.E. Garcia N.E., Servin D.E..Waste water irrigation effect in physical and chemical soil properties of Mezquital Valley, Hidalgo state, Mexico. *Water Air and Soil Pollution*,2003,67 (18): 396~396
- [22] 袁耀武, 张伟, 李英军, 等. 污水灌溉对土壤中不同微生物类群数量的影响. *节水灌溉*, 2003 (6):15~17
- [23] 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. *灌溉排水学报*, 2003,22 (4): 24~26
- [24] 郭兰, 张青善. 城市污泥与垃圾作为肥源对农作物品质的影响. *中国公共卫生*, 1994,10(3):117~118
- [25] 仝晓燕, 王黎园, 张翼翔, 等. 污水灌溉对土壤及蔬菜影响的调查. *包头医学院学报*, 1995, 11 (4): 20~22
- [26] 周纪侃, 席玉英, 宋良汉, 等. 污水灌溉对蔬菜中 N, Fe, Zn, Mn 含量的影响. *山西农业科学*, 1997, 25 (4): 55~58
- [27] 马吉珍. 污水灌溉污泥施用对耕地及农作物的影响. *山西水利科技*, 1996, 11(4): 96~98
- [28] 孙正风, 马京军. 宁夏农业面源污染现状与防治对策. *宁夏农林科技*, 2005 (3): 27~30
- [29] Singh G.,Bhati M..Growth of *Dalbergia sissoo* in desert regions of western India using municipal effluent and the subsequence changes in soil and plant chemistry. *Bioresource Technology*, 2005, 96: 1019-1028
- [30] 马云瑞, 艾先源. 甜菜制糖工业污水灌溉对土壤及作物的影响. *土壤通报*, 1994,25 (5): 239~241
- [31] 北京市农业科学研究所环境保护研究所. 北京污水灌区农业环境质量普查评价报告, 1982
- [32] 汪雅谷, 王玮. 上海地区主要蔬菜中重金属含量北京水平. *农业环境保护*, 1994, 13 (1): 34~39
- [33] 周锡爵. 张士灌区镉污染及其解决利用的途径. *农业环境科学学报*, 1987, 6 (2): 18~20
- [34] 王堪甲, 周振立. 西安市污灌区农业生态环境问题及解决途径. *农业环境保护*, 1995,14(2): 89~91
- [35] 王春, 杨德芬, 袁绍明. 会理污灌区重金属污染的调查、评价及防治对策. *四川环境*, 1998,17 (2): 41~44
- [36] 李其林, 赵中金. 重庆市近郊蔬菜基地土壤和蔬菜重金属的质量现状. *重庆环境科学*, 2000,22(6): 33~36
- [37] 孙华, 张桃林, 孙波. 江西省贵溪市污灌水田重金属污染状况评价研究. *农业环境保护*, 2001,20(6): 405~407
- [38] 朱桂珍. 北京市东南郊污灌区土壤环境重金属污染现状及防治对策. *农业环境保护*,

2001,20(3): 164~166

[39] 冀秉信.太原市污灌现状分析.山西水利科技, 1996,20(3): 92~95

[40] 王凯荣.我国农田镉污染现状及其治理利用对策.农业环境保护, 1997,16(6): 274~278

[41] 白云.郑州市污灌区土壤、粮食、蔬菜重金属污染状况及其评价.河南科学, 2002, 20 (4): 399~404

[42] 孙志强, 张灵芝, 曹健, 等. 污水灌溉对农业环境影响的研究—以石家庄市污水灌溉区为例, 节水灌溉, 1998 (12): 68~71

[43] 孙正风,王金保,马京军, 等. 宁夏污水灌溉对土壤和农产品质量的影响, 宁夏农林科技, 1999 (4): 7~11

[44] 徐震, 田丽梅, 江应松, 等. 天津市污灌区农田环境质量现状分析.节水灌溉, 1999 (6): 15~17

[45] 段永蕙, 张乃明, 徐桂兰. 太原市污灌区重金属污染现状评价.山西师大学报, 1997,11 (1): 60~63

[46] 李森照, 罗金发.中国污水灌溉与环境质量控制. 北京: 气象出版社, 1995

[47] Levy G.J..Soil hydraulic conductivity changes caused by irrigation with reclaimed waste water. Journal of Environment Quality, 1999, 28 (5): 1658~1664

[48] Yadav R.K., Goyal B., Sharma, S.K., et al. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water--A case study. Environment Protect, 2002, 28: 481~486

[49] Wang Z.,Chang A.C.,Wu L., et al. Assessing the soil quality of long-term reclaimed wastewater-irrigated cropland. Geodrema, 2003, 114: 261~278

[50] Van J.W., Katerj N., Hamdy I.A., et al. Effect of salinity on yield and nitrogen uptake of four grain legumes and on biological nitrogen contribution from the soil.Agricultural Water Management, 2001, 51 (2): 87~98.

[51] Menahem R.. Desalination of reclaimed wastewater to prevent salinization of soils and groundwater. Desalination, 2004, 160: 143~149

[52] Akram K.M.,Azam M.. Effect of saline drainage effluent on soil health and crop yield. Agricultural Water Management, 2003, 62: 127~138.

[53] Capra A.,Scicolone B.. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. Agricultural Water Management, 2004, 68: 135~149

[54] 齐志明, 冯绍元, 黄冠华, 等.清、污水灌溉对夏玉米生长发育影响的田间试验研究.灌溉排水学报, 2003, 22(2): 36~38

[55] 查贵锋, 黄冠华, 冯绍元, 等. 夏玉米污水灌溉时水分与氮素利用效率的研究. 农业工程学报, 2003(5): 63~67

[56] 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): 25~30

[57] 孙吉雄, 韩烈保, 陈学平. 用二级城市污水灌溉草坪. 草原与草坪, 2001, 92 (1): 36~40.

[58] 周陆波, 韩烈保, 苏德荣, 等. 再生水灌溉对草坪草生长的影响.节水灌溉,2005 (1):5~9

[59] 崔超. 再生水绿地灌溉水质标准的比较研究. 再生资源研究, 2004 (1): 28~31

- [60] Hayes A.R., Mancino C.F., Pepper I.L.. Irrigation of turf grass with secondary sewage effluent: I .Soil and leachate water quality. *Agronomy Journal*, 1990, 82 (5): 939~943
- [61] Hayes A.R.,Mancino C.F., Pepper I.L.. Irrigation of turf grass with secondary sewage effluent: II .Turf quality. *Agriculture Journal*, 1990, 82 (5): 943~946
- [62] King K.W.. Water quality impacts associated with converting farmland and forests to turf grass. *Transactions of the ASAE*, 2002, 44 (3): 569~576
- [63] Wu L.. Regenerant wastewater irrigation and ion uptake in five turfgrass species.*Journal of Plant Nutrition*, 1996, 19 (12): 1511~1530
- [64] Adrian M.. The effects of irrigating turf grass with waste water. *Turfgrass Bulletin Journal*, 2003,24: 21~24
- [65] 董克虞,杨春惠,林春野. 北京市污水农业利用区划的研究.北京: 中国环境科学出版社, 1994
- [66] 北京西郊环境质量评价协作组.北京西郊环境质量评价研究.1977
- [67] 周建利.北京市蔬菜及其相应土壤重金属污染评价: [硕士学位论文] .广西桂林: 广西大学, 2001
- [68] 董克虞,何长礼. 污水灌溉对冬小麦的影响及环境经济效益分析.*农业环境保护*,1989, 8 (1) :10~15

致谢

本文是在任树梅教授的悉心指导下完成的，她严谨的治学作风和广博的知识使我受益匪浅。在整个试验阶段，百忙中的杨培岭教授一直在细心指导，感谢他在试验布置和论文撰写过程中给予的极大帮助，并及时解决了试验中遇到的问题，感谢他的谆谆教诲，感谢他的细心指导，杨老师求真务实的科学态度使我受到了严格的科研训练，他一丝不苟的作风将影响我的一生。感谢上述两位教授在科研和生活上给予的关怀与指导。

同时也感谢本实验室的杨林林、王勇、彭志功、王成志、王金满、韩玉国、阎美俊、管孝艳、任坤、吕焯、魏飒、李波等诸位师兄师姐师弟师妹在试验期间的大力协助。

感激多年来一直给予我理解与支持的亲人及朋友！

值此论文完成之际，谨向所有关心、支持、帮助我的人们致以最诚挚的谢意！

胡盛年
2006年6月

个人简介

胡盛年，男，1981年2月17日出生，湖南邵阳人。2004年中国农业大学水利与土木工程学院毕业，获工学学士学位。2006年中国农业大学研究生毕业，申请工学硕士学位。在接受研究生教育期间，参加北京市“十五”重大项目“北京市现代化农村高效用水技术与示范”子课题“果树灌溉技术、灌溉模式的研究及示范”，“保护地有机蔬菜生产中水资源高效利用与管理技术的研究与示范”和北京市科技计划项目“污染物在土壤—作物系统中迁移转化规律研究”的研究，发表论文两篇：

- [1] 胡盛年，杨培岭，任树梅，等.不同污灌年限土壤灌溉水质对夏玉米苗期生长的影响[J].2005北京都市农业工程创新与发展国际学术研讨会.
- [2] 杨林林，杨培岭，王成志，胡盛年.北京市污水灌溉利用分析[J].水利水电科技进展.