

*Experimental Studies of
Reclaimed Water Irrigation*

再生水 灌溉试验研究

齐学斌 樊向阳 赵 辉 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

再生水灌溉试验研究

齐学斌 樊向阳 赵 辉 等 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了再生水灌溉对作物生理生长的影响、再生水灌溉条件下作物 N 素利用、农田系统 N 素转化运移机理及模拟、再生水灌溉适宜灌溉制度、再生水灌溉对作物—土壤系统的影响、再生水灌溉重金属在土壤中的残留累积规律等试验研究成果以及再生水灌溉环境评价指标体系。本书可供从事水利、农业、环保等领域的专业技术人员以及在校学生阅读参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

再生水灌溉试验研究 / 齐学斌, 樊向阳, 赵辉等编
著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2009. 9
ISBN 978-7-5084-6856-3

I. ①再… II. ①齐… ②樊… ③赵… III. ①再生水—灌溉—研究 IV. ①S273.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第173335号

书 名	再生水灌溉试验研究
作 者	齐学斌 樊向阳 赵辉 等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 11 印张 261 千字
版 次	2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	35.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

我国是世界上水资源严重短缺的国家之一，特别是在农业用水方面，水资源匮乏已成为农业生产持续稳定发展的主要制约因素，同时，我国还有大量的劣质水资源没有得到安全、有效、规范的利用。据有关资料显示，目前全国污水年排放量已达 693 亿 m^3 ，相当于黄河年径流量的 1.5 倍，预计 2030 年将增加到 850 亿~1060 亿 m^3 。为了确保农业生产，各地都在自发或被动地利用劣质水进行灌溉。据 2004 年统计，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%。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，也引发了诸多问题，如直接引用污染物严重超标的污水进行灌溉以及不合理的污水和微咸水利用方式，对土壤和地下水环境造成污染，不仅影响到农业的可持续发展，而且严重威胁到农产品的安全以及当地居民的身体健康。

《再生水灌溉试验研究》一书，是对科技部科研院所社会公益研究专项(2004DIB4J160)“劣质水安全灌溉技术与评价指标体系研究”、欧盟第六框架项目(023168 SAFIR)“运用劣质水和改进灌溉系统及管理方法进行安全优质粮食生产”研究成果的总结。上述研究项目采取田间试验和室内数值模拟相结合、宏观分析与微观分析相结合、定性分析与定量研究相结合的技术路线，研究内容涉及再生水灌溉对作物生理生长及品质影响、再生水灌溉 N 素转化运移机理及模拟、再生水灌溉制度、再生水灌溉作物 N 的利用、再生水灌溉重金属在土壤中残留累积、再生水灌溉对环境的影响及其环境评价指标体系研究等。

本书由参加项目研究的主要科技人员编写而成，最后由齐学斌、樊向阳、赵辉审定统稿。第一章由齐学斌撰写；第二章由齐学斌、钱炬炬撰写；第三章由樊向阳、黄仲冬撰写；第四章由齐学斌、李平撰写；第五章由齐学斌、亢连强撰写；第六章由李平、齐学斌撰写；第七章由乔冬梅、赵辉撰写；第八章由樊向阳、黄仲冬撰写；第九章由乔冬梅、张建君撰写；第十章由李平、赵辉撰写；第十一章由李志涛、庞鸿宾撰写；第十二章由杜芙蓉、庞鸿宾撰写；第十三章由黄仲冬、樊向阳撰写。此外，吴海卿、赵志娟、樊涛、王鑫、朱东海、胡超、高青等同志在试验研究过程中做了大量的工作，并对本书的

编写提出了宝贵的意见。

虽然本书对再生水灌溉及其环境影响评价等研究成果进行了阐述，但由于再生水灌溉及其环境影响评价涉及的因素多、机理复杂，特别是再生水灌溉制度的制定需要大量、长期的田间试验作为支撑，而再生水灌溉环境评价指标的确定也需要长期的定位监测试验才能进行确定，加之时间仓促，书中难免存在不足之处，尚祈读者指正，不吝赐教。

此外，本书的出版得到了许多专家和学者的热心支持和帮助，中国水利水电出版社给予了大力支持，在此一并致谢。

作者

2009年7月

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 问题的提出及研究意义	1
第二节 国内外研究现状	3
第三节 主要研究内容	10
第四节 研究方法和技术路线	11
第二章 再生水灌溉对作物生长发育及品质影响桶栽试验	12
第一节 试验设计	12
第二节 试验观测内容与方法	13
第三节 再生水灌溉对冬小麦 N、P、K 吸收及产量的影响	15
第四节 再生水灌溉对夏玉米生长发育及产量的影响	17
第五节 再生水灌溉对土壤化学性质的影响	21
第六节 再生水灌溉土壤 N 素动态变化规律	26
第七节 再生水灌溉对小麦籽粒品质的影响	36
第三章 再生水灌溉对作物生长及作物—土壤系统重金属残留的影响	38
第一节 试验设计	38
第二节 试验观测项目与方法	39
第三节 再生水灌溉对作物生长的影响	41
第四节 再生水灌溉对作物籽粒重金属残留的影响	48
第五节 再生水灌溉对土壤重金属残留的影响	53
第四章 不同潜水埋深再生水灌溉 N 素运移微区试验	66
第一节 试验设计	66
第二节 试验观测内容与方法	67
第三节 冬小麦全生育期土壤水分变化规律	68
第四节 土壤 N 素的迁移转化	70
第五节 土壤溶液及地下水中 N 素的迁移转化	79
第五章 不同潜水埋深再生水灌溉对作物生理生长影响试验	81
第一节 试验设计	81

第二节	试验观测项目与方法	82
第三节	再生水灌溉对作物株高的影响规律	83
第四节	再生水灌溉对作物叶面积指数的影响规律	84
第五节	再生水灌溉对冬小麦群体密度的影响规律	86
第六节	再生水灌溉对作物产量及水分利用效率的影响	87
第六章	不同潜水埋深再生水灌溉 N 素运移转化模拟	89
第一节	数学模型	89
第二节	模型参数	91
第三节	冬小麦 N 素运移模拟结果与分析	93
第四节	敏感性分析	100
第七章	基于 BP 神经网络的土壤 N 素运移模型	103
第一节	BP 神经网络及其实现	103
第二节	土壤 NO_3^- —N 的 BP 神经网络模型	105
第八章	主要农作物再生水安全灌溉制度研究	110
第一节	再生水安全利用灌溉制度的制定原则	110
第二节	冬小麦再生水安全灌溉制度	111
第三节	再生水安全灌溉技术操作规程	113
第九章	再生水分根交替灌溉对马铃薯根系分布及根区水土环境的影响试验	117
第一节	试验设计	117
第二节	试验观测项目与方法	118
第三节	马铃薯田土壤含水量变化规律	119
第四节	马铃薯根长密度分布规律	120
第五节	马铃薯根重密度分析规律	121
第六节	再生水灌溉马铃薯根际土壤 EC 分布规律	122
第十章	再生水分根交替灌溉马铃薯 N 素利用田间试验	124
第一节	试验设计	124
第二节	测定内容与方法	125
第三节	不同处理灌溉水利用效率	126
第四节	土壤—作物系统 N 素利用效率	126
第十一章	污水灌溉 Pb、Cd 在土壤—作物系统中的运移机理	129
第一节	不同水质灌溉 Pb、Cd 在土壤—作物系统中的运移机理	129
第二节	Pb、Cd 单一、复合污染对土壤—作物系统的影响研究	133
第三节	Pb、Cd 在不同质地土壤中的运移积累研究	135
第十二章	污灌条件下烷基苯磺酸钠 (ABS) 在土壤中运移模拟	140
第一节	数学模型	140

第二节	数值模拟与结果分析·····	145
第十三章	再生水灌溉环境影响评价·····	148
第一节	再生水灌溉环境风险分析·····	148
第二节	再生水灌溉环境评价指标体系构建的基本原则·····	149
第三节	再生水灌溉环境评价过程·····	150
第四节	再生水灌溉环境评价指标体系构建·····	150
第五节	再生水灌溉环境评价计算机辅助系统·····	159
参考文献	·····	163

第一章 绪 论

第一节 问题的提出及研究意义

一、我国水资源面临的严峻形势

淡水资源短缺和水污染的日趋严重是我国在用水上面临的两大突出问题,已成为我国社会经济发展的制约因素。我国是世界上水资源严重短缺的国家之一,人均水资源占有量为 2250m^3 , 约为世界人均占有量的 $1/4$, 每公顷耕地平均占有水资源量 21600m^3 , 仅为世界平均值的 $2/3$, 被联合国划定为世界上 13 个贫水国之一。预计到 21 世纪 30 年代,我国人口将达到 16 亿,在降水总量不减少的情况下,人均水资源量将下降到 1760m^3 , 逼近国际公认的 1700m^3 的严重缺水警戒线。农业是我国的用水大户,年用水总量 4000 亿 m^3 左右,约占全国总用水量的 70%,其中农田灌溉用水量为 3600 亿~3800 亿 m^3 ,占农业用水量的 90%~95%,根据权威部门的预测结果,在不增加现有农田灌溉用水量的情况下,2030 年全国缺水将高达 1300 亿~2600 亿 m^3 ,其中农业缺水 500 亿~700 亿 m^3 。

地下水是我国北方地区及许多城市的重要的供水水源,也是维系区域生态环境的重要因素,但是,近年来由于人类活动的影响,地下水污染加剧,尤其是浅层潜水受到污染的严重威胁,污染范围和污染程度日趋扩大,一些地区群众因饮用污染了的地下水,出现了癌症村,给人民群众身体健康造成了严重危害。污水灌溉是造成浅层潜水污染的重要原因之一。

二、我国污水灌溉发展历史

我国的再生水灌溉是在污水灌溉基础上发展起来的。由于水资源严重短缺,农民在没有清水灌溉的情况下,经常会引用污水进行灌溉,这在城市郊区最为突出。我国的污水灌溉始于 1957 年,大体经历了起步、稳定、快速发展和安全利用四个阶段。

第一个阶段:从 20 世纪 50 年代末至 60 年代初,由于废污水排放量不大,污水灌溉面积发展缓慢。为了指导污水灌溉健康发展,1961 年我国颁布了《污水灌溉农田卫生管理试行办法》。

第二个阶段:从 20 世纪 60 年代后期至 70 年代中期,随着废污水排放量的增加,污水灌溉面积逐年稳步增加。

第三个阶段:从 20 世纪 70 年代后期至 20 世纪末期,随着国民经济的快速增长,废污水排放量迅猛增加,污水灌溉面积快速增长,1991 年全国污水灌溉面积由 1980 年的 133.3 万 hm^2 发展到 306.7 万 hm^2 。为了指导我国的农田灌溉,1978 年 12 月国家正式批准《农田灌溉水质试行标准》,1985 年进行了修订,1991 年又增补了有机污染物控制标准,1992 年 GB5084—92《农田灌溉水质标准》颁布实施,2005 年进行了修订。

第四个阶段：从 21 世纪初期以来，随着水资源短缺的加剧，推动了污水资源的再生利用，2004 年全国污水排放量已达 693 亿 m^3 ，相当于黄河年径流量的 1.5 倍，全国污水灌溉面积达 361.84 万 hm^2 ，占灌溉总面积的 7.33%。针对城市污水的农业再生利用，我国 2007 年颁布了 GB20922—2007《城市污水再生利用农田灌溉用水水质标准》。

从污水灌溉区域分布来看，90%以上集中在北方水资源严重短缺的黄、淮、海及辽河流域，且主要集中在北方大、中城市的近郊县，目前全国已形成北京、天津武宝宁、辽宁沈抚、山西惠明及新疆石河子五大污水灌区。北京市自 20 世纪 50 年代初期开始利用污水灌溉农田，到目前为止，污水灌溉面积约为 8 万 hm^2 ，主要分布于通州区、大兴区和朝阳区，约占北京市污水灌溉总面积的 87%，年污水灌溉量约 2.2 亿 m^3 ，占全市污水排放量的 27%。大多污水灌区所引用的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。预计 2030 年我国年污水排放量将增加到 850 亿~1060 亿 m^3 ，污水灌溉面积还会进一步加大。同时，随着城市化进程的加快，城市污水排入河、渠，致使多数灌区水源污染，间接的污水灌溉也无处不在。

三、污水灌溉存在的问题

污水的特点决定了污水灌溉具有双重性。污水灌溉的好处有：①为农业用水提供了稳定的水源，节约了大量淡水资源，缓解了水资源短缺现状。②污水中的污染物（如 N、P）得到有效利用，减少了化肥使用量。有资料表明，全国每年排放的污水（按 400 亿 m^3 计）中含有的营养物相当于 22.5 亿 kg 硫酸铵和 8.5 亿 kg 过磷酸钙，可见污水中营养成分可利用潜力巨大。③起到净化水质以及改善土壤结构的作用，污水中的有机质具有一定的黏着性和吸附性，可使黑土层加厚，砂土变紧，黏土变松，起到改良土壤的功效。④具有明显的增产效果，提高了农业经济效益。据统计，利用污水灌溉旱田一般可增产 50%~150%，水稻可增产 30%~50%，水生蔬菜可增产 50%~300%。

另一方面，受经济、社会及技术原因的限制，经初步处理的污水中的污染物质并未完全被去除，特别是污水中丰富的 N、P，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，加之不少地区直接引用原生污水进行灌溉，灌溉后这些有害物质会随水在重力作用下沿土壤和地层的孔隙进入含水层，使地下水中的相关离子含量普遍升高，导致地下水水质恶化。污水灌溉不仅使地下水中的硝酸盐含量升高，同时也导致地下水中其他离子含量的相应增加，而亚硝酸盐是致癌物亚硝酸胺的前体，长期饮用将危害人类健康。

由此看来，污水灌溉在缓解农业用水供需矛盾的同时，也引发了诸多问题，如污水灌溉对土壤、作物和地下水环境造成的污染，已影响到农业的可持续发展，特别是严重威胁到农产品的安全，以及当地居民的身体健康，必须引起高度重视。

四、开展再生水灌溉试验研究的意义

再生水是指对污水处理厂出水、工业排水、生活污水等非传统水源进行回收，经适当处理后达到一定水质标准，并在一定范围内重复利用的水资源。再生水按其来源可分为工业和生活再生水，由于来源不同，两者的水质存在很大的差异，即便是工业再生水之间，其水质也不相同，而生活再生水的水质差别不大。再生水作为相对稳定的潜在水资源，用

于农业灌溉，可在一定程度上缓解农业水资源供需矛盾并可在一定程度上避免原生污水灌溉对作物土壤和地下水环境的影响。因此，开展再生水灌溉试验研究，对于缓解我国水资源紧缺状况，保护环境，保障农产品质量与安全，促进农业可持续发展和新农村建设具有重要意义。

第二节 国内外研究现状

随着世界性的水资源供需矛盾的不断加剧，污水灌溉在许多国家得到广泛重视。应用工业和生活污水进行农业灌溉在世界各地已有近百年的历史，美国、澳大利亚、日本和以色列等国家污水灌溉技术比较成熟。

美国国家环境保护局于 1992 年提出了污水回用建议指导书，包括污水回用的处理工艺、水质要求、监测项目、监测频率、安全距离等方面，对类似地区的污水灌溉提供了重要的指导信息。美国各州制定的污水灌溉水质标准各不相同，但规定具体，要求严格，以确保作业人员或其他接触回用水人员的安全，保证污水灌溉的可持续利用。亚里桑那州污水回用标准允许用未经消毒的二级出水灌溉纤维作物、畜牧饲料作物和不接触水的果园作物。犹他州允许二级出水用于饲料作物的灌溉，仅限于灌溉有足够高度的食用作物（谷物、玉米等）。1997 年美国加利福尼亚大学的 Tanji 详细研究了处理后的城市废水、食品加工废水、净化后的生物氧化塘水和咸水回用农业的灌溉水质要求，主要指标包括电导率（electrical conductivity, EC）、 Na^+ 、 Cl^- 、B、 HCO_3^- 、TN、TP、TSS、BOD、病原体（如沙门大肠菌、肠病毒等）、痕量有机物（特别是 EPA 规定的优选有机污染物）等。

以色列由于水资源的严重不足，该国 91% 的工业和生活污水由下水道收集，57% 的污水经过净化处理后仍用于农业灌溉和园林草地灌溉。目前，以色列每年大约有 3 亿 m^3 处理过的净化水用于农业灌溉，计划 2010 年全国 1/3 的农业灌溉将使用处理过的废污水。以色列对于不同的灌溉项目制定了具体的灌溉水回用标准，规定果园和葡萄园可以使用二级出水灌溉，生食作物除剥皮水果外，不得灌溉。

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。

前联邦德国规定果园和葡萄园不可采用喷灌，可食作物仅在收获前 4 周灌溉，对生食作物一般不采用污水灌溉。

为了科学指导污水灌溉，世界卫生组织（WHO）于 1989 年出版了污水回用于农田灌溉和水产养殖的健康指南，要求污水回用于农田灌溉之前必须经过严格的处理。联合国粮农组织（FAO）在世界各地开展污水灌溉的基础上，先后出版了污水处理与灌溉回用、污水灌溉水质控制两部技术报告，对回用于农业灌溉的水质要求和可以选用的污水处理方法进行了讨论，并根据各国的实际情况，提出了污水灌溉的指导性意见。

我国对污水灌溉的研究工作开始于 20 世纪 80 年代，目前在许多方面取得了一定的成果和经验，但距离指导农业生产实践还有一定的差距。关于污水灌溉国内外研究概况，以

下着重从污水灌溉对作物、土壤和地下水环境的影响, 污染物运移转化机理、污水安全灌溉技术等方面进行简述。

一、污水灌溉对农作物生长影响研究

污水灌溉对农作物生长的影响主要包括两个方面: ①污水灌溉对农作物产量的影响; ②污水灌溉下有害元素在作物体内的累积及对作物品质的影响。发达国家针对处理的污水灌溉蔬菜开展了不少研究, 如 G A AlNakshabandi, M M Saqqar 等于 1993 年在约旦安曼附近应用经过稳定塘处理和经氯消毒的污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、产量等进行了评价。O. Al-Lahaam, N M El Assi 在约旦进行了清水与污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 等在意大利应用三级处理的污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。

国内研究人员对粮食作物、蔬菜及草坪进行了大量的试验。对于重金属元素在水稻、小麦、玉米等粮食作物中的累积和在蔬菜水果作物中的富集规律等也开展了一定的研究。冯绍元等研究了污水灌溉对冬小麦生长和产量的影响, 结果表明污水灌溉对冬小麦茎叶的生长发育有一定的促进作用, 并能使产量提高 17.6%~31.1%, 还得出水质对冬小麦的叶面积指数、株高的影响不大。黄冠华等研究认为, 灌水量、灌水水质、施肥量对冬小麦株高的影响很小。张永清等利用水培方式研究了污水直接灌溉和净化处理后灌溉对小麦根系及幼苗生长影响, 发现未处理污水浇灌的小麦幼苗与对照组相比: 植株矮小、根短、根数少, 茎、叶、根的干重、鲜重均明显降低, 污灌胁迫加速了小麦幼苗绿叶和根系的衰亡, 并使根系活力明显下降。孟雷、左强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, 结果表明与淡水灌溉相比, 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; 尽管灌溉水质不同、生育阶段各异, 但冬小麦相对根长密度在相对深度上的分布却差异不大; 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。李德伟研究发现, 污水灌溉小麦幼苗的长势、地上部分高度、根数、根系体积及各部分的鲜重与干重等测试指标小于清水灌溉; 对于同一成分的污水, 随着浓度的增加, 各测试指标呈减小的趋势。

齐志明等在北京东郊进行污水灌溉田间试验表明, 污水灌溉抑制了夏玉米的生长发育, 使夏玉米株高和叶面积指数受到影响, 产量和干物质质量明显减少。查贵锋进行了夏玉米污水灌溉水分与氮素利用效率的研究, 结果表明夏玉米的水分利用效率与灌溉水质和施肥无关, 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。夏伟立等认为生活污水对大白菜和菠菜的生长、品质以及养分吸收没有明显的负面影响。

谢深喜等研究表明, 处理后的生活污水对柠檬树体生长和柠檬产量及品质的影响与对照无显著差异, 但果实着色较差。齐广平用经过处理后的生活污水与黄河水作对照进行茄子灌溉试验, 结果表明, 生活污水灌溉可使茄子总根数增加 12%, 根长增加 13%, 株高、叶长、叶宽无明显变化, 单株果数增加 2 个, 果径增加了 1.5cm, 单株产量增加了 0.9kg, 增产 60%。王友保、刘登义等以绿豆和萝卜为对象, 研究了污水灌溉对作物生长

与活性氧清除系统的影响,结果表明与非污灌组相比,污灌作物生长受阻,叶片色素含量降低,叶组织膜结构损伤,电导率(EC值)增大;SOD,POD,CAT活性表现不同程度降低;MDA含量显著上升。研究还发现,不同作物对污水胁迫的反应并不一致,叶片色素含量对污水胁迫的反应尤为明显。

韩冰在甘肃白银市污水灌区进行调查发现,污水灌溉小麦平均产量略高于引黄灌区,但小麦籽粒中重金属含量也明显高于引黄灌区。周纪侃等测定了4种不同水质灌溉的14种蔬菜中N、Fe、Zn、Mn的含量,结果表明水质对蔬菜含N量有明显影响,Fe、Zn、Mn的含量则主要取决于蔬菜品种。黄俊友等研究了污水灌溉条件下,小麦、水稻、蚕豆和油菜4种作物果实吸收重金属的差异,发现使用污水灌溉对4种作物吸收重金属的能力不产生显著影响,而不同作物种类间的吸收能力却表现出显著差异,水稻吸收重金属的能力较强,蚕豆较弱,各作物吸收土壤中Cd、Cu、Zn较容易,对Pb、Cr的吸收能力相对较弱。冯绍元等在不同水质(清、污水)、不同灌水量(高、中、低)和不同施肥量(中、无)处理下,做了重金属在夏玉米和冬小麦作物体中残留特征的田间试验研究,结果表明,As和Pb在夏玉米体内的残留含量由大到小依次为:花>根>叶>茎>籽,Cd的分布则为花>叶>根>茎>籽,小麦植株体内重金属积累量由大到小依次为根>茎叶>穗。冯绍元等还进行了重金属在夏玉米植株体内残留特征的田间试验,发现夏玉米植物生理特性对重金属As、Cd和Pb在植物体中不同部位残留含量的影响,要明显大于不同灌溉水质和不同灌水量的影响。杨红霞研究了大同市污水灌溉对农作物的影响,发现玉米中以Pb的污染最严重且全部超标,6种蔬菜中也以Pb的超标率最大,其最大超标倍数达8.14,Hg、As、Cd也都有不同程度的超标。全晓艳等(1995)调查了污水灌溉区土壤及蔬菜中有害物质的含量,结果表明,污水中“三氮”及阴离子合成洗涤剂显著高于清洁水,蔬菜中亚硝酸盐含量高于对照区。乔丽等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。

二、污水灌溉对土壤环境质量影响研究

表土层污染物有无机物污染(如重金属和盐类)、有机物污染(包括生物可降解和生物难降解)、化肥污染、农药污染、寄生虫、病原菌及病毒污染。国外专家对上述各方面进行了大量的研究工作,尤其是重金属和有机农药方面受到专家们的重视,对它们在土壤中的吸附、迁移、转化、归宿和分布规律方面的研究取得了较大的进展。Shahalam等在约旦进行了田间试验,在种植作物前、作物生长期间和作物收获后对土壤参数进行了测定,以此确定再生水灌溉对土壤理化性质的影响,其结论是在一个生长周期后,再生水灌溉对砂壤土理化性质没有显著的影响。Clark等利用温室试验研究了再生水灌溉对土壤化学性质的影响,研究发现,再生水灌溉后,土壤盐分增加,土壤pH值有所降低。Friedel等在墨西哥进行了试验,得出的结论是再生水长期灌溉能够增加土壤中微生物的数量和活性,同时增加了土壤的盐分含量和有机质含量。Reyes等在墨西哥进行试验,得出结论是再生水灌溉对土壤理化性质有积极的影响,并且盐分累积不明显。Nielsen等进行了再生水和清水灌溉的对比试验,再生水灌溉5年后,土壤剖面的EC值分别为 $0.70\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、

$0.48\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.44\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ；清水灌溉的地块，土壤剖面的 EC 分别为 $0.59\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.39\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.31\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 。Narwal 等发现，利用原生污水灌溉能够增加土壤 EC 值。Stevens 等在澳大利亚进行了再生水灌溉的田间调查，结果发现大多数地块经过再生水灌溉 28 年之后，表层 30cm 处的土壤 EC 值不会超过界限值，这些数据说明此地区的灌溉制度已经包含了淋洗需水量而使土壤盐分含量维持在大多数作物能够忍耐的水平，20%~50% 的淋洗比对于澳大利亚这个地区是适用的，然而，在 30cm 以下的土壤 EC 值已经接近或超过了界限值，这将会对今后的深根系作物产生不良的影响。

在污水灌溉对土壤环境的影响方面，我国主要开展以下几方面的研究。① $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和有机质在土壤中迁移、转化和分布规律；②重金属在土壤中的分布规律和对土壤的毒害作用；③污水灌溉对土壤性质影响；④污水中的病毒和病菌在土壤中对人的致病研究。如冯绍元进行了一维非饱和土壤和排水条件下饱和土壤的 N 素运移转化试验及其数值模拟的研究，探讨了非饱和土壤中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 运移与转化过程的主要影响因素，测定了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在饱和土壤中转化和运移的有关参数。黄冠华等研究了污水灌溉对草坪土壤与植株 N 含量影响，结果表明，采用污水灌溉草坪草根层土壤中的全 N 、速效 N 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量低于清水灌溉，但根系层以下土层 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量明显高于清水灌溉。吕家珑等对土壤中 P 的运移进行了研究。王亚男等对含 P 污水淋滤条件下土壤中 P 迁移转化进行了模拟试验，认为可溶态 P 进入土壤后，主要随水分作溶质迁移，在迁移的同时，不断转化为吸附态 P 和各种沉淀态 P ，吸附态 P 固着于土壤颗粒上，不发生迁移；沉淀态 P 在土壤中主要参与化学转化，并随水分迁移。杨金忠等通过试验，研究了污水灌溉系统中 N 、 P 转化运移，分析了试验过程中的水分平衡，污水灌溉过程中各种污染物的变化、积累和运动。万正成等的研究发现，污灌后土壤水中的全 P 含量明显小于清水灌溉，最大值均出现在 0.60~0.90m 处，且随污灌次数增多土壤水中全 P 含量越来越小。姜翠玲取徐州奎河的生活污水灌溉做了土壤中三 N 之间相互转化影响因素的研究。

对污水灌溉带来的土壤重金属污染我国学者也做了大量的研究，如曹淑萍进行了重金属污染元素在土壤剖面中的纵向分布特征研究，得出重金属元素随土壤质地不同而有所不同，主要集中在 0~50cm 土层。张乃明等认为污灌水中重金属 Hg 、 Cd 、 Pb 含量的高低与相对应的灌区土壤中重金属的累积量的多少基本一致，对土壤 Cd 累积影响最大的是污水灌溉，对土壤 Hg 累积影响最大的是大气沉降，污灌与大气沉降对土壤 Pb 累积影响作用相近。段飞舟等对沈阳市西郊张士污灌区城市污水灌溉的调查结果表明，经过 10 年左右的停灌和灌渠改造等措施，污灌稻田土壤表层 Cd 含量仍然处于较高的水平，土壤 Cd 含量水平仍然对环境和人体健康具有潜在的危害。沈阳市 2003 年对 2 个污水灌溉区的上、中、下游土壤中重金属采样分析研究，表明土壤 Cd 、 Hg 、 Zn 和 Ni 均已超标。申屠超等采用室内盆栽试验，研究生活污水灌溉对土壤重金属元素的含量与积累的影响，认为生活污水灌溉与清水灌溉相比，对土壤重金属全量和有效态含量的影响差异甚微，生活污水短时间用于农业灌溉是安全的。王春等调查了会理县锌矿污灌区内水、土、作物的重金属污染状况，认为污灌区内土壤、作物受重金属 Cd 、 Zn 、 Pb 的污染严重。张乃明等研究认为污灌区耕层土壤重金属 Pb 、 Cd 累积量随着污灌时间的推移而呈增加趋势。李佩成等针对陕西交口抽渭灌区水源污染对灌溉的影响问题，结合当地地表污染源和地下咸水条件，

提出了稀污掺混的措施,为在旱区利用污水资源开辟了一条道路。同时还提出了在黄土区建立用水养水相协调的生态灌区建设模式的设想和建议。易秀(2000, 2001)论述了污灌作为面污染源对灌区生态环境和地下水的影响。

李恋卿等在石灰性褐色土上连续进行了9年的污水灌溉试验,结果发现,土壤有机质、速效态养分含量明显增加,土壤孔隙度降低,体积质量(密度)增加,表层土壤全盐量达到 $1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,发生了次生盐渍化。李慧等认为含油污水灌溉刺激了土壤中好氧异养细菌(AHB)和真菌的生长,土壤脱氢酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性与土壤中总石油烃(TPH)含量呈显著正相关,而土壤脲酶活性与土壤中TPH含量呈显著负相关。孟春香等采用盆栽法开展了污水灌溉对作物产量及土壤质量的影响研究,得出污灌能改善土壤质量,增加土壤有机质、全N、速效N、速效P的含量,增加土壤阳离子代换量的结论。

针对污水灌溉后土壤微生物环境的改变,袁耀武等通过对污水灌溉地域土壤微生物分析,发现其中细菌、放线菌及真菌等各微生物类群的数量与非污水灌溉区土壤并无明显差异,土壤中一些有特定作用的微生物如自生固氮菌、硝化细菌等的数量也无明显差异。再生水灌溉条件下土壤表面湿度影响土壤细菌总数,地面滴灌处理地面细菌总数远高于与地下滴灌处理。罗固源、周健等进行了污水蚯蚓土地处理与资源回归的研究,利用蚯蚓对土壤物化性能的改良以增加土壤对有机污染物的吸收。江云珠等则认为污水灌溉造成稻区水栖无脊椎动物的生物多样性降低、生态平衡破坏。

袁安秀、邢焕琴等对河南省郑州市城市污水灌溉农田进行了卫生学评价,对蚊蝇密度、农田中的总大肠菌群、地下水等做了全面的调查,结果显示污灌区普遍高于清灌区。何鹏等对污灌区儿童血红蛋白含量及其影响因素的分析结果表明,污灌区儿童血红蛋白含量低于对照区儿童,贫血率高于对照区儿童,且差异显著。吕毅、王渭等进行了污水灌溉致环境铅(Pb)污染及人群健康效应研究,应用世界卫生组织(WHO)推荐的神经行为核心测试组合对某灌区52名儿童进行神经行为功能检查并测定Pb含量,结果表明,污水灌溉区儿童血铅高于对照区。

三、污水灌溉对地下水质量影响的研究

污水灌溉对地下水污染的机理为,污染物首先在表层土壤发生多种物理、化学及生物反应,大部分转化为能被作物吸收利用的污染物被作物吸收,另一部分和发生反应时从土壤中置换出的离子(如 Ca^{2+} , Mg^{2+})通过淋溶渗透到地下水,造成地下水污染。目前的研究主要集中于污水中的 NO_3^- -N因深层渗漏造成地下水的污染问题。如刘凌、陆桂华试验研究表明,污灌对下层土壤及地下水中 NH_4^+ -N浓度影响较小,但对 NO_3^- -N浓度影响较大,尤其是长期进行污灌的土壤,易造成地下水中 NO_3^- -N污染。高洪阁、陈丽惠等对山东省泰安市郊污灌区41年的观测数据(1960~2000年)进行了分析,结果表明污灌区地下水的各种离子含量和含盐量都有大幅度的增加,并且呈现出加速增长的趋势, NO_3^- -N含量已严重超过饮用水标准。万正成、李明武等通过田间污水灌溉模拟试验,选择以生活污水为主的奎河污水为灌溉水源,得出长期连续污灌可能造成潜水的有机污染。姜翠玲等研究表明,污灌后随土壤含水量、氧化还原电位和pH值的变化,氨化作

用、硝化作用和反硝化作用依次成为 N 素转化的主要机制,污灌 10d 之内,由于淋溶和硝化作用产生的 NO_2 、 NO_3 会造成浅层地下水的严重污染。

四、污染物在土壤—植物—地下水系统中转化运移模拟研究

污染物在非饱和土壤中迁移转化规律的研究始于 20 世纪 80 年代,美国、英国等西方发达国家在研究非饱和带水分运动的基础上,开始研究污染物在非饱和土壤中的迁移规律,并通过大量的室内及野外土柱试验,确定了非饱和带垂向一维弥散系数和衰减系数。随着研究工作的深入,逐步开始研究重金属在非饱和带的迁移转化规律,考虑土壤液相和固相浓度的分配系数,并借助于 Henry, Freundlich 和 Langmuir 的等温吸附模式来表示液相和固相浓度吸附和解吸问题。对于弥散系数的研究, Pickens 和 Grisak 又将恒定常数扩展为随时空变化的动态参数。对土壤介质结构的研究,由结构不变的刚性体,发展为研究可变的介质体;由均质土壤研究到分层土壤。在土壤水分运动方面,由非饱和带的平均孔隙速度发展到研究可动水体和不可动水体,并综合考虑水、气、污染物及土壤四者之间相互作用关系。在数学模型求解方面也在不断发展,由非饱和带的简单解析解发展到考虑复杂因素的数值解,求解的初始条件和边界条件也在不断改进,使之更加接近于污染物迁移的实际情况。

我国对污染物在非饱和土壤中迁移转化的研究也开始重视起来,并进行了大量的研究工作,尤其是 N、P、重金属和有机农药污染方面受到专家们的高度重视,对于它们在土壤作物系统的吸附、迁移、转化、归宿和分布规律方面的研究,都取得了较大的进展。最初的研究方法侧重于盆栽试验和田间试验,其目的在于搞清楚 N 肥施入农田后的去向,研究重点侧重于 N 素的转化。近几年,我国土壤物理学者在室内、外开展了一些溶质运移的实验研究。刘凌等 1995 年进行了污水灌溉重氮化合物迁移转化过程的研究。聂永丰用数值模拟的方法研究了污染物在包气带非饱和水条件下的迁移转化问题。

土壤氮素运移属于土壤溶质运移的范畴,其定量化研究主要依据土壤溶质运移的基本原理和模型。根据不同土壤环境条件和研究目的,建立了各种模拟模型,这些模型分为对流—弥散传输模型、传输—化学平衡模型、函数模型三大类。考虑土壤参数的时空变异性,又发展了随机对流—弥散传输模型、随机函数模型。冯绍元(1993)对饱和—非饱和土壤中的氮素运移转化规律进行了数值模拟。黄元仿(1994)研究了水、热共同作用下土壤中氮素的运移转化规律,建立了土壤水、热和氮素的联合模型。黄元仿等(1995)以联合模型为基础模拟了田间条件下土壤氮素运移。武晓峰等(1996)在田间试验的基础上建立了土壤—作物系统中水分运动及不同形态氮素迁移转化的数学模型,模拟了冬小麦生长期田间水分、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 含量及其分布的变化。黄元仿、李韵珠、陆锦文(1996)建立了田间条件下土壤氮素运移的模拟模型,借用美国学者 Warrick(1970)的试验资料验证了他们的模型。崔剑波等(1997)运用随机过程—马尔可夫过程(Markov Process)的理论,对田间非饱和流条件下土壤 NO_3^--N 运移进行了模拟。Inubushi 等(1999)研究了盐分和湿度对 N_2O 挥发的影响,并进行了黄土地氮素动态模拟。刘培斌、张瑜芳(1999)对稻田中氮素淋失进行了田间试验研究,并进行了数值模拟。叶自桐(1990)、任理等(2001)运用传递函数模型分别对盐分迁移及氮素的淋失动态进行了模拟。任理等(2003)针对土壤剖面存在残留氮分布的特征,通过引入溶质迁移距离的概率

密度函数的修正系数,推广了Jury等提出的模拟非稳定流条件下土壤保守溶质运移的传递函数模型,构造了一个能估算表施和残留氮对土壤 NO_3^- -N淋失动态贡献的传递函数模型。同时,任理等(2003)以河北省曲周县的中国农业大学试验站的田间定位试验为背景,进一步检验了TFM对土壤剖面2m埋深处 NO_3^- -N淋失动态的模拟精度,并估算了表施氮素和残留氮分别占总淋失量和总施氮量的比例,定性分析了估算结果的合理性。曹巧红等(2003)将Hydrus-1D水氮联合模型用于模拟非饱和介质中一维水分、热和溶质运移过程,取得了较好的效果。王红旗通过温室条件下冬小麦不同种植方式、污水不同土地处理状态下水氮运移吸收和净化过程模拟试验,分析了作物生长、根系生长与分布、根系对水分氮素吸收规律以及根系竞争吸收与土壤中水、氮含量的关系,以及氮净化规律等,在此基础上,建立了作物生长—根系生长与分布—根系吸水、吸氮—土壤中水氮运移转化—作物生长循环计算联合模型。

污染物在地下水中迁移转化的研究,主要是运用数学模拟方法进行。世界上许多国家开展了此项研究,建立了预测性的地下水质模型,其中美国、加拿大、法国、英国、俄罗斯等国家建立的模型多而且成熟,并在不断改进和完善。把数学模型应用于地下水质模拟研究是20世纪60年代以后的事情。对孔隙介质中水动力弥散研究的详细综述则是1967年由前苏联Bel等完成的,他们根据简化的和统计的模型来讨论各种水动力弥散理论、边界与初始条件的形成,以及弥散系数与水流速度及渗透介质几何形状关系的理论,并给出了实测资料,尤其指出了水动力弥散可由纵向弥散和横向弥散系数来表征。Fried在1972年进一步研究了经典模型与水动力弥散方程,认为孔隙介质的每个无穷小单元体都是由固体物质与孔隙构成的,并提出了考虑固体物质与孔隙分界面上浓度与浓度梯度跳跃变动的新水动力弥散模型,导致水动力弥散方程中增加了补充项。1977年,Wills和Neuman在系列论文中提出了分散参数系统内地下水质动态管理的通用模型。美国地质调查局在1978年提出的一份地下水质模型报告可作为范例,该模型是计算地下水中不起反应的溶质浓度瞬态变化的数值模型,其计算程序是求解两个联立的偏微分方程。该模型通过联立求解地下水流方程与浓度方程来解决稳态水流和瞬态水流问题。近年来国外学者在地下水溶质运移理论和试验研究方面又取得了新的进展,对污染物迁移的弥散系数提出了与时空相关的表达式,大量的试验研究使得迁移方程中的衰减、离子交换、生物、化学反应项的系数取值更合理,考虑因素更全面。美国、英国、荷兰等国对污染物在地下水中迁移转化的一维模型解析解方面,不断有新的成果出现。考虑到地下水资料监测的复杂和变异性,20世纪90年代开始,国外对污染物迁移转化的随机模型也开始广泛地研究。

五、污水灌溉技术与灌溉制度研究

为了安全高效地将污水回用于农业,避免负面影响,国外针对污水回用灌溉技术与灌溉制度,开展了一系列研究工作。美国Gushiken教授研究发现,同喷灌、地面滴灌、漫灌等相比,污水地下滴灌可减少与健康危害的风险。加拿大McGill大学的Kaluli等人研究表明,与地面灌溉相比,地下灌溉可减少硝酸盐淋失率达70%以上。澳大利亚开发了污水灌溉与处理相结合的污水利用系统,具有污水灌溉和污水处理的双重功能。以色列通过使用微、喷灌技术,提高了污水利用率,达到了节水和防治污染的双重目的。西班牙有关部门于1995~1998年连续在格拉纳达省进行了污水滴灌芒果的试验,试验结果表明: