

污灌对地下水的污染及防治对策

王昭¹, 杨国华², 陈玺¹, 费宇红¹, 张凤娥¹, 陈京生¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061; 2. 郑州工业贸易学校, 郑州 450007)

摘要: 科学利用污水灌溉可以在一定程度上缓解水资源紧缺问题, 但如果不进行科学管理, 污水灌溉就可能会引起地下水污染。文章回顾了污水灌溉引发的地下水污染方面的研究成果, 讨论了污水中可能污染地下水的组分, 重点讨论了硝酸盐、硬度、重金属、病原微生物、有机污染物在水土系统中的迁移和衰减机理以及影响这些组分迁移至地下水的因素, 最后提出了防治污水灌溉引发地下水污染的建议和今后的研究方向。

关键词: 地下水; 污水灌溉; 硝酸盐; 重金属; 有机污染

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2008)03-0099-05

1 前言

由于我国总体水资源不足, 特别是在水资源匮乏的干旱、半干旱地区, 如何合理有效地利用污水灌溉不仅是一个资源再生的问题, 同时也是一个保护环境、使区域经济保持可持续发展的问题。废污水中虽然含有有毒有害物质, 但也含有作物需要的营养元素, 如氮、磷、钾等。日本、美国、以色列等国家的实践证明, 利用经过适当处理的生活污水和有机工业废水灌溉农田, 可以变废水为良好的水源, 还可以提高土壤的肥力。然而, 在我国, 盲目的污水灌溉导致了有毒有害物质在一些地区的土壤积累, 并造成对地下水环境的污

染^[1~4]。地下水一旦污染, 治理难度就很大, 有些甚至难以治理, 即使可以修复和治理, 也需要花费很长的时间和巨额费用。

本文从污染组分的种类及其运移机理出发, 讨论污水灌溉对地下水的污染, 通过分析影响污染物进入到地下水的各种因素, 从而提出防治地下水污染的措施。

2 灌溉污水中的主要污染指标

表1列出了灌溉污水中的主要污染指标。在以往的工作中, 人们对 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、Zn、Cu、Pb、Cr、Cd和大肠杆菌等进行研究较多。近年来, 研究人员对污水中的有机污染物也投入了较多的关注。

表1 以往污灌研究中所涉及的污染物

Table 1 Contaminants identified in previous studies on wastewater irrigation

项目	污染组分及参考文献		项目	污染组分及参考文献	
微量元素	Zn ^[6,8~10]	Cu ^[2,6,8~10]	常见指标	pH ^[2,8]	Na ⁺ ^[2]
	Pb ^[6,8~12]	Cr ^[6,9,10,12]		TDS ^[8,14]	硬度 ^[14,16]
	Cd ^[6,10~13]	As ^[2,10~12]		NO ₂ ⁻ ^[2,8]	Cl ⁻ ^[2,14]
	Hg ^[10~12]	Ni ^[6]		SO ₄ ²⁻ ^[2]	Mg ²⁺ ^[16]
	Mn ^[10]			Ca ²⁺ ^[16]	K ⁺ ^[2]
有机指标	COD ^[8]	氯仿 ^[7]	BOD ^[8]	大肠杆菌 ^[8,17]	微生物指标
	矿物油 ^[13]	PCBs ^[6]	酚 ^[2]	细菌总数(TS) ^[8]	
	PAHs ^[5~7]	三氯乙烯 ^[7]		病原菌总量(沙门氏菌、痢疾杆菌和霍乱弧菌) ^[8,18]	

在已有的研究中, 主要研究对象是污灌区的土壤污染问题, 特别是重金属的污染。对于污灌区的地下

水污染, 一般只提及 NO_3^- 和致病微生物的污染^[4,8,19~20]。对于地下水中矿化度和硬度的升高也有论述, 但是这些指标的升高是否主要由污灌引起则需要进一步研究。

收稿日期: 2007-11-05; 修订日期: 2008-01-10

基金项目: 水环所基本科研业务费项目(SK07013); 国土资源大调查项目“地下水污染调查评价技术方法研究与信息系统建设”(1212010634610)

作者简介: 王昭(1969), 女, 博士研究生, 副研究员, 主要从事环境水文地质研究工作。

E-mail: bike2002d@yahoo.com

3 污灌对地下水的污染

3.1 主要研究方法

在以往的研究中, 研究污水中污染组分向地下水中的迁移主要采用野外调查取样、土柱淋滤模拟实

验^[14,21~22]和野外实验法^[15]。土柱淋滤模拟实验是最常用的研究方法,如宋晓焱等分别用污水和大气降水进行土柱淋滤模拟实验分析了氯离子、总硬度及溶解性总固体(TDS)在土壤中的迁移转化机理,结果表明当地浅层地下水中氯离子、总硬度及TDS污染与污水灌溉有关^[14]。

3.2 污灌区地下水中硝酸盐和硬度的升高

不科学的污水灌溉再加上大量使用化肥,使地下水的总硬度、含盐量逐渐增加,特别是地下水中 NO_3^- 含量的增加,使污灌区地下水污染问题越来越严重^[4]。虽然水土系统中的反硝化作用会降解一部分 NO_3^- ,但是污水灌溉对地下水的 NO_3^- 污染应当引起重视^[15,17~18]。由于污水中的高 NO_3^- 含量,污水灌溉首先会使得 NO_3^- 在土壤累积,并有可能通过淋溶土壤中的 NO_3^- 而污染地下水。

刘凌在徐州汉王实验基地进行了含氮污水灌溉实验研究,得出:污水灌溉对下层土壤及地下水中 NH_4^+ 浓度影响较小,大多数 NH_4^+ 将被上层土壤吸附、转化;污水灌溉对土壤水及地下水中 NO_3^- 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^- 污染^[15]。一般地,污水中的 NH_4^+ 含量较高。污水灌溉到土壤后,水中的 NH_4^+ 将与土壤胶体表面的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 发生离子交换反应,结果造成地下水硬度升高和土壤含氮量的增加。另一方面,土壤中的 NH_4^+ 离子会发生硝化作用,其最终产物 NO_3^- 离子会在短期内加重地下水的污染^[16]。

关于地下水硬度升高的原因有很多,污水灌溉是其中的一种。城市生活污水和工业废水中含有高浓度的 Na^+ 离子,在迁移过程中,能将土壤或含水层中吸附的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子置换出来,从而造成地下水硬度的增高^[1,4]。

3.3 污灌水中重金属在水土系统中的分布

一般情况下,灌溉污水中的重金属能够被土壤颗粒吸附,使得大多数重金属离子富集于土壤表层,从而导致了土壤的Zn、Pb、Cu和Cr等的污染^[9]。土壤对它们的吸附降低了其向地下水中的运移。对内蒙古东部污灌区土壤的土层剖面不同深度重金属(Cr、Cu、Cd、Pb)元素进行测试和分析结果表明,土壤有较强的吸附污水中重金属的能力,经过十几年的污水灌溉,当地的地下水目前没有受到重金属污染^[23]。Barryt等的研究表明重金属主要在土壤0~20cm表层积累,其纵向迁移趋势不明显^[24]。也有实例表明污灌不会对土壤产

生明显的污染^[12],这可能是污灌水水质不同的结果。Koerner等对新墨西哥Roswell灌区的研究表明,经过33年的污灌,灌区中并没有发现污水中所特有的重金属元素^[17]。

一旦进入土壤,重金属的迁移性就由它们的存在形态所控制,而这取决于它们进入土壤时的组分形式、土壤组分的种类和含量(有机质、矿物、粘土含量等)、环境条件(如pH和Eh等)^[21,25~26]。土柱淋滤试验表明,阳离子交换、表面吸附、与固相有机质的螯合作用及沉淀过程是重金属的重要衰减机理。对于Cd、Zn、Cu,在土壤有机质含量低的情况下,重金属在土壤含水氧化物表面的吸附是其主要衰减机理。对于Cr、Pb、Mo,沉淀是主要的衰减机理^[21]。对As、Cd、Cu、Pb等的淋滤实验表明,它们主要在表层0~10cm积累,随淋溶时间的延长,这些重金属(特别是Cd)表现出向下迁移的趋势^[11],从而对地下水形成威胁。

3.4 污灌水中细菌和病毒对地下水的污染

在研究污水灌溉对地下水的污染时,要特别重视致病微生物的污染^[18]。污染地下水的病原微生物可分为三类:细菌、病毒及寄生虫,以前两种为主。Koerner等对新墨西哥Roswell灌区的研究表明,受当地的具体水文地质条件所影响,经过33年的污灌,灌区中并没有发现污水中所含的大肠杆菌^[17]。田间试验也发现,一些肠道病毒能通过迁移穿过非饱和和饱和带到相当深的土层^[27]。由于病毒比细菌和原生动物的包囊小得多,在通过多孔土壤时不容易被过滤净化,而随水分迁移进入土壤深层和地下水系统的可能性要大,地下水资源的病毒污染已引起各国科学家的高度关注。污灌水中的病原微生物在地下水系统中的迁移能力除了受其存活期长短影响外,主要受到吸附作用和过滤作用的控制。

介质对病原微生物的吸附作用主要受介质性质、环境条件和病原微生物类型的控制。Matthess等指出多孔介质对细菌及病毒的机械过滤作用主要取决于多孔介质空隙大小和病原微生物的种类^[28]。一般地,砂和砂砾对细菌以及病毒无效;粉土可过滤掉细菌,但对病毒过滤效果不大。病毒的吸附随土壤粘粒含量增加而增加^[29~30]。Moore等发现土壤颗粒中带正电荷总量的多少与病毒吸附量之间存在显著相关性^[31]。病毒所带的电荷取决于介质的pH值。当pH值大于7时,土壤中的主要吸附剂(粘土矿物、有机质等)及病毒均带负电,两者产生斥力,几乎不吸附,易于迁移;而在酸性土壤中易吸附而不迁移。许多实验发现病毒在土壤

颗粒上的吸附量一般随 pH 值的升高而有降低趋势^[29,32]。如水中电导较大,一些二价或一价的阳离子被吸附到土壤中去,则可减少土壤对带负电的病毒及细菌的斥力,增加吸附量,如高钙离子含量与金属氧化物的存在都会使吸附性增强^[19]。

3.5 污灌水中有机物对地下水的污染

人类在生产实践活动中对有机物的不合理排放及不适当处理,导致其进入环境,造成地下水的有机污染。例如,在美国的 50 个州均有微量有机物的报道^[33]。1987 年美国地下水中已发现了 175 种有机化合物^[34]。随着人们对饮用水水质要求的提高和分析技术的进步,污水灌溉对土壤和地下水的有机污染也引起了人们的重视^[15-7,18]。在我国山东的小清河沿河地区水源短缺,群众不得不靠小清河污水(包括济南、淄博两市大量工业污水)浇灌,在污灌区的地下水中检出 56 种有机物,其中致癌物和致突变物各 11 种,致畸物和刺激性物各 8 种^[35]。

包气带是污水中污染物到达地下水的必经途径。对于污水中的有机污染物,在其经过包气带进入地下水的过程中会发生自然衰减作用,主要包括挥发、吸附、生物降解、稀释等^[36]。有机污染物在地质环境体中的吸附行为,直接影响到有毒有害有机污染物在环境中的迁移、转化及归宿。吸附作用不仅是导致污染物随水溶液迁移产生迁移滞后、造成地下水不同程度污染的主要原因,而且是影响有机污染物在土壤环境中不同形态含量和分布的重要原因,从而也将对挥发作用、污染物的溶解淋滤、生物与非生物降解作用对有机污染物的利用、植物对有机污染物的利用等其它作用造成不同程度的影响。对于非极性的有机污染,在水土系统中的吸附在很大程度上取决于土壤中的有机质含量和性质^[37]。对于极性有机污染物,在水土系统中的吸附和运移除受土壤中有有机质含量的影响外,还会受到其中矿物的含量与种类、环境 pH 值等因素的影响^[38]。

4 影响污灌水污染地下水的因素及相应防治对策

污灌对地下水的污染程度由多种因素决定,主要有污水灌溉的年限、灌溉的强度与方式、水中污染物的种类和性质、土壤的类型和性质、地貌和水文地质条件等。对这些因素必须经过详细调查和试验研究,以正确分析和预测污灌后可能对地下水产生的影响。

一个地区是否可以采用污灌取决于当地具体的土

壤类型和实际水文地质条件,要避免在土地渗透性强、地下水位高、含水层露头区进行污水灌溉,在水源地及其周围地带要严格禁止进行污水灌溉。

土壤对污水中的组分有净化作用,但其容量是有限的,不能将各种性质的污水无限制地施加到土壤中。引废污水灌溉前,应测试土壤的背景值,以便以后监测对照。长期引废污水灌溉的地区,应对土壤中重金属、有机有毒物等的含量及积累速度、地下水水质、居民的身体健康状况、周边的生态环境等方面进行监测。

对于污水本身,用于灌溉时,其水质一定要达到灌溉用水水质标准。目前,在我国直接引污灌溉的现象还比较普遍。污灌区地下水污染的原因多是因为使用了未经处理的污水,水质不符合灌溉水质标准。因此,为了科学地进行农田污水灌溉,应大力推行农田灌溉污水预处理技术,灌溉前要对含有毒物质的废污水进行无害化处理,对所引用的废污水水质(特别要注意对重金属、有机氯、致病菌等)进行实时监测,深入、系统地开展污水灌溉的科学研究工作^[8]。

利用污水灌溉的强度和方式,可以通过适宜的污水灌溉技术、科学管理和规划以及完善的法制和法规来实现^[1]。许多地区惯用的大水漫灌方式,常会导致地下水(一般为潜水)的污染,有的还可形成污灌反漏斗,增加污水扩散渗透的水头,对深层地下水构成威胁。因此,污灌时要执行正确的灌溉制度,防止灌溉引水量过大,引起深层渗漏而污染地下水。实行科学合理污灌是一个复杂的系统工程,应把污水纳入水资源利用的整体规划,在污灌区统一调配使用污水。同时水利管理部门对这部分水资源给予重视,管好它、用好它,进一步完善污水净化和科学的灌溉制度^[39]。

5 结论与建议

利用污水灌溉可以缓解水资源紧缺问题。但是,如不进行科学管理,污水灌溉就可能会引起地下水的污染,主要表现为硝酸盐、硬度、溶解性总固体、病原微生物、重金属及有机组分浓度的升高。对于重金属和有机物的污染风险应引起足够的重视。污水中污染组分向地下水中的迁移受当地的包气带厚度和岩性、地下水动力条件等因素的影响。

要正确认识污水灌溉造成的地下水污染问题。只要管理措施恰当,污水灌溉引发的污染是可以避免的。要借鉴一些发达国家和地区引污灌溉的成功经验和先进技术,加强对污水灌溉的系统规划和管理,逐步向科学污灌发展。污灌水的水质要符合相关的技术标准。灌溉

前应对污灌区的地质、水文地质条件做详细的调查,了解区内的土壤类型,分析污水中有害物质的可能衰减机理,从而对污灌引起的地下水污染风险进行评价和预测。

今后需要进一步开展与污水灌溉有关的理论研究,如污染物在土壤、地下水和土壤水中的分布和动态变化过程。污灌条件下重金属和有机污染物在农田土壤、地下水的迁移是一个长期而复杂的过程,受到诸多因素的影响,需要多学科联合,共同开展研究。

参考文献:

- [1] 李洪良,邵孝侯,黄鑫,等. 农田污水灌溉的危害研究进展与解决对策 [J]. 节水灌溉, 2007 (2): 14 - 18.
- [2] 于卉,郭勇,刘德文,等. 武清县污水灌溉情况及影响分析 [J]. 水资源保护, 2000 (4): 3 - 7.
- [3] 孙宝华. 关于污水灌溉问题的探讨 [J]. 环境科学动态, 2005 (2): 54 - 55.
- [4] 唐常源,陈建耀,宋献方,等. 农业污水灌溉对石家庄市近郊灌区地下水环境的影响 [J]. 资源科学, 2006, 28 (1): 102 - 108.
- [5] Chen Y, Wang C, Wang Z. Residues and source identification of persistent organic pollutants in farmland soils irrigated by effluents from biological treatment plants [J]. Environment international, 2005, 31 (6): 778 - 783.
- [6] Song Y F, Wilke B M, Song X Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals (HMs) as well as their genotoxicity in soil after long-term wastewater irrigation [J]. Chemosphere, 2006, 65 (10): 1859 - 1868.
- [7] Weber S, Khan S, Hollender J. Human risk assessment of organic contaminants in reclaimed wastewater used for irrigation [J]. Desalination, 2006, 187 (1 - 3): 53 - 64.
- [8] Callegos E, Warren A, Robles E, et al. The effects of wastewater irrigation on groundwater quality in Mexico [J]. Water Science and Technology, 1999, 40 (2): 45 - 52.
- [9] Dere C, Lamy I, Jaulin A, et al. Long - term fate of exogenous metals in a sandy Luvisol subjected to intensive irrigation with raw wastewater [J]. Environmental pollution, 2007, 145 (1): 31 - 40.
- [10] Weng H, Xunhong C. Impact of polluted canal water on adjacent soil and groundwater systems [J]. Environmental Geology, 2000, 39 (8): 945 - 950.
- [11] 杨军,郑袁明,陈同斌,等. 中水灌溉下重金属在土壤中的垂直迁移及其对地下水的污染风险 [J]. 地理研究, 2006, 25 (3): 449 - 456.
- [12] Luchó-Constantino C A, Prieto- García F, Del Razo L M, et al. Chemical fractionation of boron and heavy metals in soils irrigated with wastewater in central Mexico [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2005, 108 (1): 57 - 71.
- [13] 宋玉芳,周启星,宋雪英,等. 沈阳西部污灌渠沉积物中污染物积累与生态毒性研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15 (10): 1926 - 1930.
- [14] 宋晓焱,尹国勋,谭利敏,等. 污水灌溉对地下水污染的机理研究 [J]. 安全与环境学报, 2006 (1): 136 - 138.
- [15] 刘凌,陆桂华. 含氮污水灌溉实验研究及污染风险分析 [J]. 水科学进展, 2002, 13 (3): 313 - 320.
- [16] 钱炬炬,齐学斌,杨素哲. 含氮污水灌溉氮素运移与转化研究进展 [J]. 节水灌溉, 2006 (1): 20 - 24.
- [17] Koerner E L, Haws D A. Long - term effects of land application of domestic wastewater: Roswell, New Mexico, slow rate irrigation site [M]. Washington :United States Environmental Protection Agency, 1979.
- [18] Downs T J, Cifuentes- García E, Suffet I M. Risk screening for exposure to groundwater pollution in a wastewater irrigation district of the Mexico City region [J]. Environmental health perspectives, 1999, 107 (7): 553 - 561.
- [19] Chu Y, Jin Y, Baumann T, et al. Effect of Soil Properties on Saturated and Unsaturated Virus Transport through Columns [J]. J Environ Qual, 2003, 32 (6): 2017 - 2025.
- [20] Torkzaban S, Hassanizadeh S M, Schijven J F, et al. Virus Transport in Saturated and Unsaturated Sand Columns [J]. Vadose Zone J, 2006, 5 (3): 877 - 885.
- [21] Gong C, Donahoe R J. An experimental study of heavy metal attenuation and mobility in sandy loam soils [J]. Applied Geochemistry, 1997, 12 (3): 243 - 254.
- [22] Coppola A, Santini A, Botti P, et al. Methodological approach for evaluating the response of soil hydrological behavior to irrigation with treated municipal [J]. Journal of Hydrology, 2004, 292 (1): 114 - 134.
- [23] 王国贤,陈宝林,任桂萍,等. 内蒙古东部污灌区土壤重金属迁移规律的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (s1): 30 - 32.
- [24] Barry G A, Chudek P J, Best E K, et al. Estimating sludge application rates to land based on heavy metal and phosphorus sorption characteristics of soil [J]. Water

- Research, 1995, 29 (9) : 2031 - 2034.
- [25] Bataillard P, Cambier P, Picot C. Short term transformations of lead and cadmium compounds in soil after contamination [J]. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54 (2) : 365 - 376.
- [26] Ledin M, Krantz-Rulcker C, Allard B. Zn, Cd and Hg accumulation by microorganisms, organic and inorganic soil components in multi-compartment systems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28 (6) : 791 - 799.
- [27] Sinton L, Finlay R, Pang L, *et al.* Transport of bacteria and bacteriophages in irrigated effluent into and through an alluvial gravel aquifer [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1997, 98 (1) : 17 - 42.
- [28] Matthess G, Pekdeger A, Schroeter J. Persistence and transport of bacteria and viruses in groundwater—a conceptual evaluation [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1988, 2 (2) : 171 - 188.
- [29] Burge W D, Enkiri N K. Adsorption kinetics of bacteriophage fX174 on soil [J]. *J Environ Qual*, 1978, 7: 536 - 541.
- [30] Moore R S, Taylor D H, Reddy M M, *et al.* Adsorption of reovirus by minerals and soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003.
- [31] Moore R S, Taylor D H, Sturman L S, *et al.* Poliovirus Adsorption by 34 Minerals and Soils [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003.
- [32] Sobsey M D, Dean C H, Knuckles M E, *et al.* Interactions and Survival of Enteric Viruses in Soil Materials [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003.
- [33] Barbash J, Roberts P V. Volatile organic chemical contamination of groundwater resources in the U. S. [J]. *J Water Pollut Control Fed*, 1986(58) : 343 - 348.
- [34] Barcelona M, Wehrmann A, Keely J F, *et al.* Contamination of ground water: Prevention, assessment, restoration [M]. New Jersey: Noyes Data Corp, Park Ridge, 1990.
- [35] 张洪凯. 小清河水体和沿岸地下水有机污染物的监测及其毒性分析 [J]. *中国环境监测*, 1997, 13 (2) : 40 - 41.
- [36] 王昭, 张翠云, 陈玺. 地下水有机污染物自然衰减研究概述 [J]. *地球学报*, 2006, 27 (s1) : 22 - 26.
- [37] Chiou C T. Partition and adsorption of organic contaminants in environmental systems [M]. John Wiley & Sons, 2002.
- [38] Bi E, Schmidt T C, Haderlein S B. Sorption of heterocyclic organic compounds to reference soils: Column studies for process identification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40 (19) : 5962 - 5970.
- [39] 余国英, 徐冰, 郭克贞. 污灌条件下农田土壤中重金属的运移规律研究 [J]. *内蒙古水利*, 2006 (2) : 26 - 28.

Groundwater contamination caused by waste water irrigation and its controlling countermeasures

WANG Zhao¹, YANG Guo-hua², CHEN Xi¹, FEI Yu-hong¹, ZHANG Feng-e¹, CHEN Jing-sheng¹

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, China*;

2. *Zhengzhou Industry Trade School, Zhengzhou 450007, China*)

Abstract: Wastewater irrigation can save water resources to a certain extent, but irrational utilization of wastewater can also cause pollution of groundwater. This paper reviews such an issue caused by wastewater irrigation in different cases, which is normally identified as increasing nitrate, hardness, heavy metals, pathogenic microbes, and organic compounds in groundwater. The mechanisms of migration and natural attenuation of pollutants are discussed, and the factors influencing the transport and transformation of contaminants in vadose zone are also examined. Subsequently, the measures to prevent the side effects of wastewater irrigation and the further studies on these topics were proposed.

Key words: wastewater irrigation; groundwater; nitrate; heavy metal; organic contamination

责任编辑:汪美华