

# 处理污水中氮素在农灌黄土层中迁移转化规律研究

赵海涛<sup>1</sup>, 苑林爽<sup>1</sup>, 宋继强<sup>1</sup>, 黄新城<sup>1</sup>, 夏志法<sup>1</sup>, 王俊峰<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>中国水利水电第六工程局有限公司, 辽宁 沈阳

<sup>2</sup>中国科学院, 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2021年12月3日; 录用日期: 2022年1月3日; 发布日期: 2022年1月12日

## 摘要

污水资源化是解决干旱半干旱地区农业用水紧缺的有效途径。本文通过现场土柱模拟试验, 研究了经过处理并达到农田灌溉标准的城市生活污水用于农田灌溉, 污水中剩余氮素在土壤中的迁移转化规律。结果发现, 每次灌溉结束后, 土壤中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度迅速下降, 其中表土层下降最快, 到灌溉后的第10天基本消失; 土壤中硝态氮浓度在表土层、心土层和下包气带中达到峰值的时间分别约为灌溉后的第18、12和9天, 且从表土层、心土层到下包气带层土壤中硝态氮含量峰值逐渐增大。另外, 由于董志塬土层深厚、土壤偏碱性和且灌溉季节土温较高, 处理污水用于农田灌溉不会造成地下水氮素污染。

## 关键词

处理污水, 农田灌溉, 土柱模拟, 氨氮, 硝态氮, 迁移与转化

# Study on the Transfer and Transformation Laws of Nitrogen within the Treated-Sewage Used for Irrigation in the Loess Layer

Haitao Zhao<sup>1</sup>, Linshuang Yuan<sup>1</sup>, Jiqiang Song<sup>1</sup>, Xincheng Huang<sup>1</sup>, Zhifa Xia<sup>1</sup>, Junfeng Wang<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>SinoHydro Bureau 6, Co., Ltd., Shenyang Liaoning

<sup>2</sup>Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy Sciences, Lanzhou Gansu

Received: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2021; accepted: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2022; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Resource utilization of sewage is an effective way to solve the agricultural water shortage in the arid

\*通讯作者。

文章引用: 赵海涛, 苑林爽, 宋继强, 黄新城, 夏志法, 王俊峰. 处理污水中氮素在农灌黄土层中迁移转化规律研究[J]. 水污染及处理, 2022, 10(1): 7-12. DOI: 10.12677/wpt.2022.101002

and semi-arid regions. Through on-site soil-column simulation experiments, the urban domestic treated-sewage that has reached the farmland irrigation standard is used for farmland irrigation, and the migration laws, as well as transformation laws of the remaining nitrogen of the sewage in the soil, are studied. It was found that after each irrigation, the concentration of  $\text{NH}_3\text{-N}$  in the soil decreased rapidly, among which contained in the top soil layer declined the fastest, and it basically disappeared on the 10<sup>th</sup> day after irrigation. The concentration of nitrate-nitrogen reached the peak in the top soil layer, the core soil layer and the lower vadose zone layer was on the 18<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup>, and 9<sup>th</sup> day after irrigation, respectively; and the peak values of nitrate-nitrogen content in the soil from the top soil layer, the core soil layer to the lower aeration zone layer gradually increased. In addition, due to the deep soil layer in Dongzhiyuan, the alkaline soil and the higher soil temperature during the irrigation seasons, the use of treated-sewage for farmland irrigation will not cause groundwater nitrogen pollution.

## Keywords

Treated-Sewage, Farmland Irrigation, Soil Column Simulation, Ammonia Nitrogen, Nitrate Nitrogen, Migration and Transformation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

城市污水资源化,就是将污水处理净化后,用于城市的市政景观、马路喷洒、城市绿化、农业灌溉以及工业冷却或工艺冲洗等多种用途[1],即缓解了水资源短缺矛盾,又能减轻水污染,促进良性循环,可以说是“变废为宝”。当前,世界上不少国家为克服缺水的困难,已成功将城市污水开辟为新的水源,而其经济上的费用往往要低于开辟新鲜水源。对于北方干旱、半干旱地区来说,缺水问题严重制约着当地农业经济的发展[2],污水处理后用于灌溉是缓解水资源紧张状况的有效途径之一,在这些地区实现城市污水的资源化利用具有重要的作用和现实意义。城市污水经过处理消毒达到农业灌溉标准后,用于农田灌溉不仅可以节约水资源,还可以给农作物生产带来增产丰收,因为污水本身是一种有机复合肥料,在灌溉过程中土壤对污水中的氮(N)、磷(P)、钾(K)等营养成分存在良好的吸持与释放机能[3],可培肥土壤,降低农业生产过程中化肥的施用成本。

甘肃省庆阳地区处于甘肃省东部黄土高原区,气候干旱、降水稀少,年降水量 382.9~602.0 mm,属于温带大陆性气候[4];水资源匮乏已成为制约当地经济社会发展的瓶颈。为了在庆阳黄土地区实现城市污水资源化利用,促进当地农业经济发展,将西峰市城市污水资源化试验厂经过高负荷活性污泥法处理后的出水,经消毒后用于附近的农田灌溉,本文对灌溉过程中污水中的氮素在黄土层中的迁移转化规律进行了研究,以期为处理后污水的资源化安全、高效利用,地下水影响评估提供依据。

## 2. 试验方法

### 2.1. 灌溉水质与灌区土壤

灌溉用水取自甘肃西峰市城市污水资源化试验厂二沉池出水,该城市污水处理工艺为高负荷活性污泥法,出水经消毒后用于农田灌溉。出水中与土壤养分密切相关的几项指标如表 1 所示。

灌区设在甘肃省庆阳地区西峰市董志塬,土壤属黄土原的黑垆土。黑垆土主要分布于中国陕西北部、

甘肃东部、宁夏南部、山西北部 and 内蒙古的黄土塬地、黄土丘陵和河谷高阶地，其中以董志塬最具有典型性和代表性。该土层剖面上部为暗灰色有隐粘化特征的腐殖质层，深厚和疏松，但腐殖质含量不高。黑垆土是由古代植物的腐殖质形成，土壤颗粒细粘，其中物理性粘粒在腐殖质层约占 40%，在母质层和耕作层约占 28%~30%；微团聚体较多，质地较疏松，结构呈多孔状，容重约为 1.1~1.4 g/cm<sup>3</sup>；最大吸湿量为 4%~6%，凋萎湿度为 7%~8%，田间持水量约 19%~23%。另外，该黑垆土含矿质养分丰富，全钾含量约 1.6%~2.0%，全磷含量约 0.15%~0.17%，但有效磷较低；全氮含量约 0.03%~0.1%。阳离子交换量 9%~14 mg/100g 土。土壤 pH 约 7.4~8.0，呈微碱性；石灰含量约 7%~17%。粘土矿物主要以水云母为主并含有少量高岭石和蒙脱石[5]。

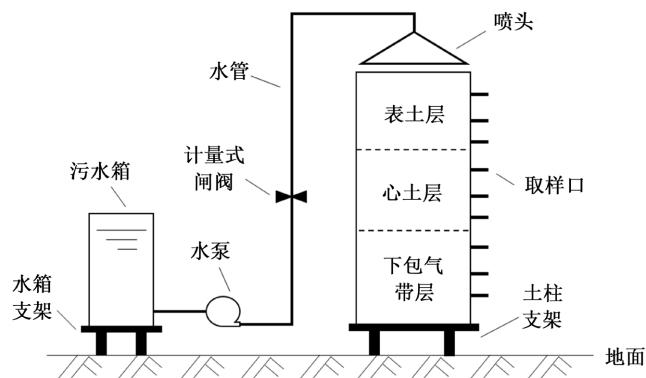
**Table 1.** Water quality of treated-sewage effluent

**表 1.** 处理污水出水水质

指标	COD <sub>Cr</sub> (mg/l)	BOD <sub>5</sub> (mg/l)	NH <sub>3</sub> -N (mg/l)	pH
	105~253	75~135	42~58	6.9~7.18

## 2.2. 土柱模拟实验

本文采用土柱模拟实验对处理污水农灌氮素在黄土层中迁移转化规律进行研究。原状土柱可以基本保留土壤的原始结构，通过土柱模拟实验可以较好地观察污染物在土壤中的迁移转化规律[6] [7]。模拟土柱采用透明有机玻璃管制作而成，内径 20 cm、高 100 cm；在土柱侧壁上，从上到下每隔 10 cm 设置一个取样口，制作完成的土柱安放在由钢板焊接而成的支架上进行固定。布水系统由水泵、计量式闸阀、上水管、莲蓬头和污水箱组成。土柱的装填如下：在试验大田内挖坑分层取土，表土层取 30 cm 厚，心土层取 30 cm 厚，下包气带层取 40 cm 厚，分装、编号，同时测定每层土壤的容重并记录；土样经自然风干后，碾碎过 3 mm 筛，然后按上下层关系并根据每层土壤测得的容重，模拟原状土壤的结构分层装填(图 1)。为确保土柱装填效果与土壤实际结构状况接近，按照不同土层容重，每层装填过程中对土壤进行振捣并压实。在灌溉入水方式上，每次按 50 m<sup>3</sup>/亩的标准灌溉量将水样缓慢灌入土柱，为确保模拟灌溉效果和布水的均匀性，采用均匀开孔的莲蓬头进行喷淋，莲蓬头的直径与有机玻璃管的内径相同。对于土柱模拟装置的取样，由于土柱上从上到下每隔 10 cm 设有取样口，每次在取样时，在需要取样的深度将取样口打开(其余的取样口密封)，灌水后渗滤水逐渐从取样口流入一个取样瓶中，对流出的水样进行分析；土样的采集是通过取样口用特制的取土器将土柱内的土取出，在确保土样采集不破坏土柱整体性的前提下，每次只取 3~5 g。每次取样结束后，将取样口密封，确保土柱的密封性能完好。



**Figure 1.** Schematic diagram of soil column simulation experiment device

**图 1.** 土柱模拟试验装置示意图

### 2.3. 监测分析

监测分析指标包括进水、渗滤水和土壤中的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$  含量及 pH。每个检测指标分析均按《地表水和污水监测技术规范》(HJ/T91-2002) [8]、《土壤理化分析与剖面描述》[9]提供的标准分析方法进行,每隔 3d 取样测试 1 次。

## 3. 试验结果与讨论

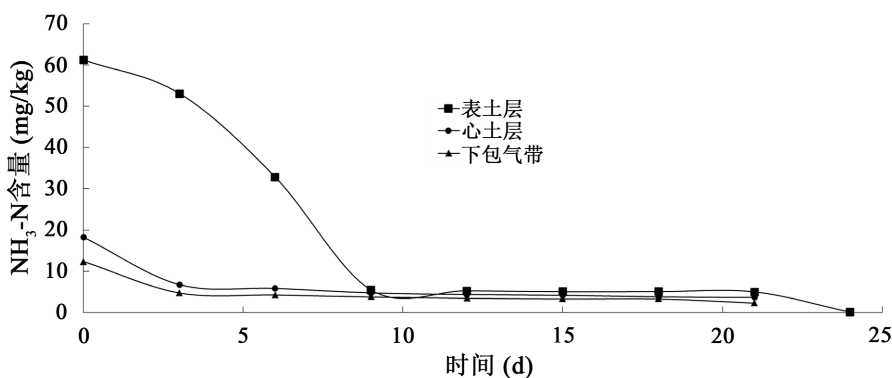
### 3.1. $\text{NH}_3\text{-N}$ 的硝化动力学特征

污水中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  分子是一极性分子,在水溶液中以  $\text{NH}_4^+$  形式存在,当进入土壤系统以后,受土壤粒子所带负电荷作用而被吸附而保持[9]。因此,当污灌时,表层土壤  $\text{NH}_3\text{-N}$  的含量会突然上升,直至达到土壤的最大吸附容量。从试验结果看(图 2),污灌刚结束后,土壤  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量可高达 61.20 mg/kg,高于污灌水中的浓度。另一方面,就土壤中  $\text{NH}_3\text{-N}$  淋洗状况来看,在土壤水垂直下渗过程中带走部分土粒表面吸附的  $\text{NH}_4^+$  离子,而且饱和以后其淋容量最大,其迁移发展规律是从表土层、心土层到底土层逐渐传递(表 2)。

**Table 2.**  $\text{NH}_3\text{-N}$  content in soil at different positions of the soil column before and after irrigation using treated-sewage  
**表 2.** 处理污水灌溉前后土柱不同位置  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量

取样点位置	污灌前(mg/kg)	污灌后(mg/kg)
15 cm 处	8.261	61.200
30 cm 处	3.724	18.200
45 cm 处	1.243	12.320

从图 2 可以发现,每次污灌结束后,随着硝化时间的增加,加之土壤偏碱性( $\text{Ph} = 8.75$ ),土体中  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度迅速下降,表土最快,到污灌后的第 10 天基本消失。分析其原因,主要因为灌溉污水中的氨根离子与土壤中的钙、镁、钾等碱性物质结合后迅速转化为氨气从土壤中溢出[10] [11],同时表土与大气随时进行着气体交换,以保证在表土中有充分的氧气供应微生物的硝化分解[12] [13],从而造成土体中  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量迅速下降并随着土壤深度加深而快速递减。



**Figure 2.** Changes of  $\text{NH}_3\text{-N}$  content in the soil in different soil layers of the soil column with time  
**图 2.** 土柱不同土层中土壤  $\text{NH}_3\text{-N}$  含量随时间变化

### 3.2. 土壤系统中氮素形态的转化

根据  $\text{NH}_3\text{-N}$  的特点及土壤特性,当污水中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  进入土壤系统之后,部分  $\text{NH}_3\text{-N}$  与土壤中的碱

性物质作用而挥发；另外一部分被土壤胶体所吸持[14][15]。再根据土壤硝化过程[16]，第一阶段是氮的硝化过程，被吸持的  $\text{NH}_3\text{-N}$  硝化可以分为两步：第一步是在氨氧化菌(Nitrosomonas 等)的作用下，生成亚硝态氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ )；第二步是在亚硝酸氧化菌(Nitrobacter 等)的作用下，把  $\text{NO}_2\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_3\text{-N}$ 。第一步反应较慢，是硝化过程的限速阶段，第二步中  $\text{NO}_2\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_3\text{-N}$  则非常迅速。由于硝态氮易于随水流失而不容易被土壤吸附，极易引起地下水污染。因此，硝态氮的检测是试验过程中重点观测的检测指标。第二阶段是氮的反硝化过程，土壤中的硝态氮和亚硝态氮在无氧或低氧条件下，容易被反硝化菌(异养、自养微生物)还原为氮气。土柱中不同土层土壤的硝态氮含量随时间的变化如图 3 所示。

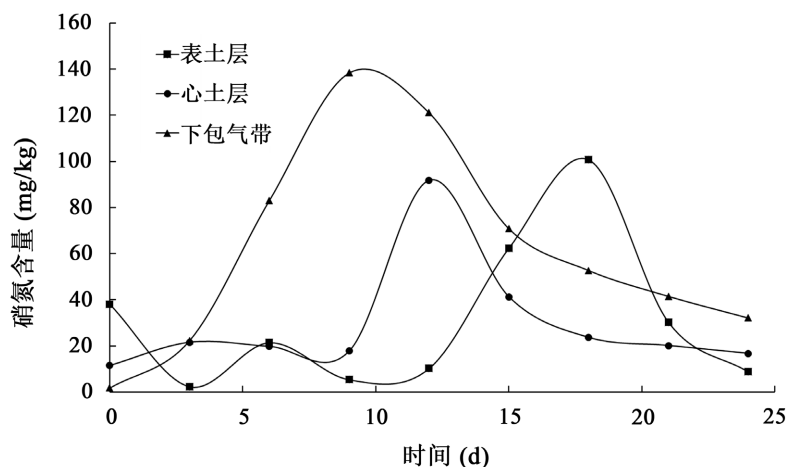


Figure 3. Changes of nitrate-nitrogen content in the soil in different soil layers of the soil column with time  
图 3. 土柱不同土层中土壤硝态氮含量随时间变化

从图 3 可以发现：下包气带硝态氮达到峰值的时间大约在第 9 天，心土层达到峰值的时间大约在第 12 天，表土层达到峰值的时间大约在第 18 天，且从表土层、心土层到下包气带土壤中硝态氮含量峰值逐渐增大。这主要是由于土壤中  $\text{NH}_4^+$  离子被硝化后电性改变，受土壤粒子吸持的作用迅速减弱，随着土壤渗滤水在重力作用下逐渐下渗到下层，产生了硝态氮的积累效应[17][18][19]。但在大约第 25 天时，土壤中硝态氮基本消失，这主要因为随着时间的延长，硝态氮在厌氧条件下发生了反硝化反应生成  $\text{N}_2$  和  $\text{NO}_2$  挥发到了大气中[20][21]，加之土壤的偏碱性和试验期间土温较高，加剧了反硝化的进程。

#### 4. 结论

通过原状土柱实验研究表明，在甘肃省庆阳市董志塬黄土地区采用处理污水按照  $50\text{m}^3$ /亩的农田灌溉定额进行污水资源化利用，灌溉后土体中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度随着土壤深度加深而快速递减，到第 10 天基本消失；土壤中硝态氮含量在表土层、心土层和下包气带土层中呈单峰型变化，并随着时间延长逐渐下降，在灌溉后第 25 天时基本消失；灌溉不会造成该地区地下水氮素污染。

#### 参考文献

- [1] 王喜峰, 王亦宁. 污水资源化管理的市场驱动路径研究[J]. 水利经济, 2021, 39(6): 50-53+79.
- [2] 谢子渊. 干旱区农业节水灌溉现状与发展趋势探析[J]. 中国农业信息, 2016(10): 145-146.
- [3] 毕丽霏, 张富仓, 王海东, 等. 水肥调控对滴灌马铃薯生长、品质及水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(1): 155-165.
- [4] 张可心. 1981-2018 年庆阳市气候舒适度特征分析及评价[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1270-1277.
- [5] 李亚孺, 涂国良. 平凉市黑垆土土壤养分平衡状况及其评价[J]. 甘肃农业科技, 2021, 52(6): 55-58.

- 
- [6] 张步迪, 林青, 徐绍辉. 磺胺嘧啶在原状土柱中的运移特征及模拟[J]. 土壤学报, 2018, 55(4): 879-888.
- [7] 魏建辉, 管仪庆, 夏冬梅, 等. 模拟农药莠去津在原状土柱中的运移研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4118-4120.
- [8] 国家环境保护总局. HJ/T91-2002. 地表水和污水监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2003.
- [9] 刘光崧, 等. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [10] 丛茜, 任露泉, 陈秉聪. 土壤粘附机理的化学吸附分析[J]. 农业工程学报, 1996, 12(2): 40-44.
- [11] 张丽芳, 胡海林. 土壤酸碱性对植物生长影响的研究进展[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(8): 40-43.
- [12] 沈晓忆, 夏围围, 张洁. 硝化抑制剂与尿素配施对旱地土壤温室气体排放及硝化微生物的影响[J]. 土壤, 2021, 53(3): 512-521.
- [13] 葛红莲, 陈龙, 辛琪. 污水灌溉对小麦土壤微生物区系的影响[J]. 作物杂志, 2008, 5(1): 17-19.
- [14] 孙大志. 氨氮在土壤中吸附/解吸的动力学与热力学研究[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2007, 8(6): 493-496.
- [15] 段磊, 吕佳佳, 孙亚乔. 黄土包气带中氨氮吸附/解吸机理研究[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 184-193.
- [16] 唐国勇, 黄道友, 童成立, 等. 土壤氮素循环模型及其模拟研究进展[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11): 2208-2212.
- [17] 袁巧霞, 武雅娟, 艾平, 等. 温室土壤硝态氮积累的温度、水分、施氮量耦合效应[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 192-198.
- [18] 刘伟, 武美燕, 胡学玉, 等. 设施栽培地土壤富营养化及其潜在的环境影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(5): 20-23.
- [19] 张润哲, 朱嘉磊, 王江, 等. 长期施氮与灌溉对毛白杨人工林土壤硝态氮分布与积累的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(6): 7-13.
- [20] 曹慧丽, 樊丹丹, 姚敏杰, 等. 土壤反硝化过程速率测定方法[J]. 应用与环境生物学报, 2021, 27(4): 1102-1109.
- [21] 魏琛琛, 任树梅, 徐子昂, 等. 灌溉水盐分和灌水量对温室气体排放与玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 251-260+236.