

# 基于Meta分析的污废水灌溉对土壤物理性质的影响研究

冯巨龙, 张欣桐\*, 谷雨桐

烟台大学土木工程学院, 山东 烟台

收稿日期: 2026年2月4日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月12日

## 摘要

为探究污废水(如再生水、生活污水等)作为农业灌溉替代水源时, 对土壤物理性质的影响效应。本研究采用Meta分析方法, 系统评估了污废水灌溉对土壤物理性质(土壤粒径分布、孔隙率、含水量、田间持水量及容重)的影响, 旨在明确不同水质参数(如pH、电导率EC、总溶解固体TDS、悬浮固体SS)和污废水类型的影响效应机制。研究整合了来自全球48个试验站点、52篇文献的286组数据, 以清水灌溉为对照组, 通过随机效应模型计算的响应比(Response Ratio, RR)及亚组分析, 探讨水质要素、污废水类型对不同深度土壤物理性质的调节作用。结果表明, 采用中性至微碱性范围内以及较高的悬浮固体浓度(>100 mg·L<sup>-1</sup>)的污废水灌溉条件下, 土壤孔隙率和持水能力得到提升。当灌溉水电导率为700~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 时, 对土壤物理性质的整体改善效果更为显著, 不仅能增加土壤孔隙率、含水量和田间持水量, 还可降低土壤容重。然而, 因受样本量所限, 总溶解固体对土壤物理性质的量化影响范围尚未明确。除水质参数外, 污废水类型亦对土壤物理性质具有显著影响。再生水、市政污水等污染物负荷较低的污废水类型, 有助于提高孔隙结构, 增强土壤含水能力, 降低土壤容重。而生活污水灌溉会对土壤物理性质产生不利影响。此外, 污废水灌溉对土壤物理性质的影响具有显著的空间异质性和参数依赖性。总体而言, 相对于清水灌溉, 污废水灌溉可使表层土壤(0~10 cm)含水量提升12.92%, 孔隙率增加2.62%~4.31%, 容重降低1.01%; 但会使深层土壤(60~70 cm)含水量降低28.01%, 田间持水量降低11.68%。通过Meta分析进一步研究表明, 采用水质参数为pH 7.0~8.0、EC 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、SS 100~150 mg·L<sup>-1</sup>的污废水进行灌溉可有效改善土壤物理结构并增强保水能力。上述水质参数范围可为以土壤健康为目标的精准灌溉策略提供依据, 并有助于确定相应的灌溉用污废水处理要求。

## 关键词

污废水, 灌溉, 土壤物理性质, Meta分析

## A Meta-Analysis of the Effects of Wastewater Irrigation on Soil Physical Properties

Julong Feng, Xintong Zhang\*, Yutong Gu

\*通讯作者。

## Abstract

**Effects of Alternative Water Sources for Agricultural Irrigation (e.g., Reclaimed Water, Domestic Wastewater) on Soil Physical Properties: A Meta-Analysis.** This study employs a Meta-analytical approach to systematically evaluate the impact of wastewater irrigation on key soil physical properties, including soil particle size distribution, porosity, water content, field capacity, and bulk density. The research aims to elucidate the underlying mechanisms of influence associated with different water quality parameters (such as pH, electrical conductivity [EC], total dissolved solids [TDS], and suspended solids [SS]) and types of wastewater. Data from 286 observations across 48 experimental sites worldwide, as reported in 52 publications, were synthesized. Using freshwater irrigation as the control, the response ratio (RR) was calculated via a random-effects model, supplemented by subgroup analysis to examine the regulatory roles of water quality factors and wastewater types on soil physical properties at varying depths. The results indicate that irrigation with wastewater within a neutral to slightly alkaline pH range and with elevated suspended solids concentrations ( $>100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) enhances soil porosity and water-holding capacity. When the irrigation water electrical conductivity ranges from 700 to 3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , the overall improvement in soil physical properties is more pronounced, manifesting as increased soil porosity, water content, and field capacity, alongside a reduction in soil bulk density. However, due to limited sample size, the quantitative impact range of total dissolved solids on soil physical properties remains unclear. Beyond water quality parameters, the type of wastewater also significantly affects soil physical properties. Wastewater with lower pollutant loads, such as reclaimed water and municipal wastewater, contributes to improved pore structure, enhanced soil water retention capacity, and decreased bulk density. In contrast, irrigation with domestic wastewater adversely affects soil physical properties. Furthermore, the impact of wastewater irrigation exhibits significant spatial heterogeneity and parameter dependency. Overall, compared to freshwater irrigation, wastewater irrigation increases the water content of surface soil (0~10 cm) by 12.92%, raises porosity by 2.62% to 4.31%, and reduces bulk density by 1.01%. However, it decreases the water content of deeper soil layers (60~70 cm) by 28.01% and reduces field capacity by 11.68%. Further Meta-analytic research indicates that irrigation utilizing wastewater with specific water quality parameters—namely a pH range of 7.0~8.0, electrical conductivity (EC) of 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , and suspended solids (SS) concentration of 100~150  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ —can effectively enhance soil physical structure and improve water retention capacity. This defined range of water quality parameters provides a scientific basis for developing precision irrigation strategies aimed at soil health preservation. Furthermore, it offers critical guidance for establishing corresponding treatment standards for wastewater intended for agricultural irrigation use.

## Keywords

Wastewater, Irrigation, Soil Physical Properties, Meta-Analysis

Copyright © 2026 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

全球水资源短缺与粮食安全挑战日趋严峻，干旱、半干旱地区面临的水资源危机尤为突出[1]。农业

是淡水消耗最大的部门,灌溉用水供需矛盾十分显著。污水可作为重要的替代水源,将其处理后再用于农业灌溉,是缓解水资源压力、促进水资源循环利用的有效途径[2]。污水灌溉在中国、印度、以色列和墨西哥等地已有广泛实践[3]-[5]。2012年,联合国粮农组织(FAO)已将再生水灌溉列为应对水危机的重要措施。污水可实现水肥一体化利用,既提供稳定水源,又富含氮、磷、钾等养分,有助于减少化肥用量并促进作物生长。但值得注意的是,污水中除养分外,还含有盐分、重金属、持久性有机污染物以及悬浮固体等复杂成分[6]。这些成分进入土壤-植物系统后,可能对土壤生态系统健康产生深远影响[7]。

土壤物理性质(如结构、孔隙、水分特征)是维持土壤功能与植物健康生长的基础,关系着土壤通气性、持水能力、根系发育、微生物活性及污染物迁移,故而被视为评估土壤可持续性的关键指标[8]。水中的悬浮固体(SS)在土壤中累积可能堵塞孔隙,影响通气性与水分迁移。但部分研究显示,污水中的有机物和黏土颗粒有助于改善土壤团聚结构,提升土壤持水能力[9]。灌溉水的盐分(以电导率 EC 或总溶解固体 TDS 表征)可升高土壤溶液渗透压,在影响作物吸水能力的同时也可能改变土壤团聚体稳定性与孔隙结构。有研究指出,高钠离子含量可能导致土壤颗粒分散,破坏团聚体稳定性,进而引发土壤板结、孔隙堵塞和水分入渗率下降,最终造成土壤退化[10]。pH 值通过调控土壤胶体表面电荷与离子的形态和组成,影响颗粒的聚集与分散;极端 pH 或高钠条件易导致土壤结构破坏、板结及水分入渗能力下降。这些影响的方向与强度受多种因素调控,包括污水水质(如盐度、钠吸附比 SAR)、灌溉管理方式(如时长与频率)、土壤类型(如质地和初始理化性质)以及气候条件等。然而,现有研究多局限于局部区域或个案分析,结论不一致且难以推广,尚缺乏系统性、量化的综合评价,以明确污水灌溉对土壤物理性质(如饱和导水率、容重、团聚体稳定性等)的总体效应及其关键影响因素。因此,亟需采用能够整合已有独立研究的统计方法,解决现有争议。

Meta 分析是一种通过整合多项独立研究数据得出普遍结论的统计方法,旨在克服单一研究局限,提升统计功效和结论可靠性[11]。在生态学等复杂领域,它量化整合数据,为评估全球环境问题、验证理论和指导实践提供关键证据。亚组分析是 Meta 分析的重要技术,基于整体效应分析,将研究按特征划分为子集,考察效应值差异及来源,从而揭示调节变量影响,增强解释深度与可靠性,识别异质性原因。为此,本研究将采用 Meta 分析方法,以清水灌溉为对照,系统评估污水灌溉对土壤物理性质的全球性影响;通过亚组分析进一步探讨灌溉水类型及水质参数(EC、TDS、pH 和 SS)对效应值的影响,比较不同深度土壤物理指标(如土壤含水量、孔隙度、容重等)的响应差异,并在此基础上优化灌溉用污水水质参数,以为污水灌溉的科学管理与推广提供依据。

## 2. 方法

### 2.1. 数据来源

本研究数据来源于 Web of Science 数据库和中国知网(<https://www.cnki.net>)数据库检索,收集了自 1983 年 7 月 2 日至 2025 年 9 月 1 日国内外公开发表的关于污水灌溉的期刊文献及学位论文,研究范畴限定于污水灌溉在环境与农业领域的应用研究,重点研究土壤物理性质的变化特性。为实现研究目的,英文检索关键词设置为“irrigat\*” and “wastewater” or “sewage” or “effluent\*” or “reclaimed” or “eutrophications” or “soil physical property” or “soil density” or “porosity” or “water content” or “soil moisture content” 及其拓展组合;中文检索关键词设置为“灌溉” and “污水” or “废水” or “再生水” or “富营养化” and “物理性质” or “土壤密度” or “土壤容重” or “孔隙度” or “粒径” or “含水率” or “土水势” or “土壤水特征曲线”。以此构建基础数据库:以清水灌溉处理为对照组,不同污水灌溉为处理组,主要内容包括文献信息(标题、经纬度、试验地点、气候类型、数据量等)、试验内容(试验方式、种植植物、试验周期、样本量、灌溉方式)、水质信息(污水类型、污水 pH、电导率 EC、溶解性总固体

TDS、悬浮物 SS)、土壤信息(土壤类型、土壤 pH、电导率 EC、钠吸收比 SAR、有机碳 SOC、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、含水量、粒径分级、田间持水量等)。并基于以下纳入标准进一步筛选文献：(1) 试验处理必须同时包含污废水和清水灌溉处理；(2) 试验必须是田间试验或盆栽或土柱试验；(3) 试验必须是无额外施加肥料；(4) 试验重复次数应不少于 3 次；(5) 数据至少含有土壤理化性质指标中的 1 项；(6) 如果在同一试验地点进行的不同研究的测试周期重叠，则选用时间最长的试验数据；(7) 不同发表文献中的同一试验数据只纳入 1 次；(8) 一篇文献中包含不同采样日期的结果，使用最终采样时间点的数据。

根据上述关键词共检索出 616 篇文献，其中中文 320 篇、英文 296 篇。基于纳入标准进一步筛选，得到 52 篇文献，其中中文 30 篇、英文 22 篇。根据这 52 篇文献整理出 286 条数据、8484 个数据点。数据集中包括全球 48 个研究地点，研究数据点均取自文献中的表格、文本和图片，图片数据采用 Getdata Graph Digitizer (<http://www.getdatagraph-digitizer.com/index.php>) 软件识别获取。将采集的试验点的地理坐标(WGS 1984 地理坐标系)进行标准化处理，随后在 ArcMap10.2 平台中通过“Display XY Data”功能将经纬度数据转换为矢量点图层。通过配准世界地图进行空间可视化，所有采样点的地理分布展示在图 1 中。在已发表文献中提取土壤物理性质和水质相关变量的平均值、样本量和标准误/标准偏差，并据  $SD = SE \times n^{0.5}$  ( $n$  为样本量) 将数据的标准误(standard error, SE)转化为标准差(standard deviation, SD)；若原始报告中存在数据缺失，未明确给出标准差或标准误，且数据重复数大于 3，则使用平均值的 10% 来估计相应的 SD 值。

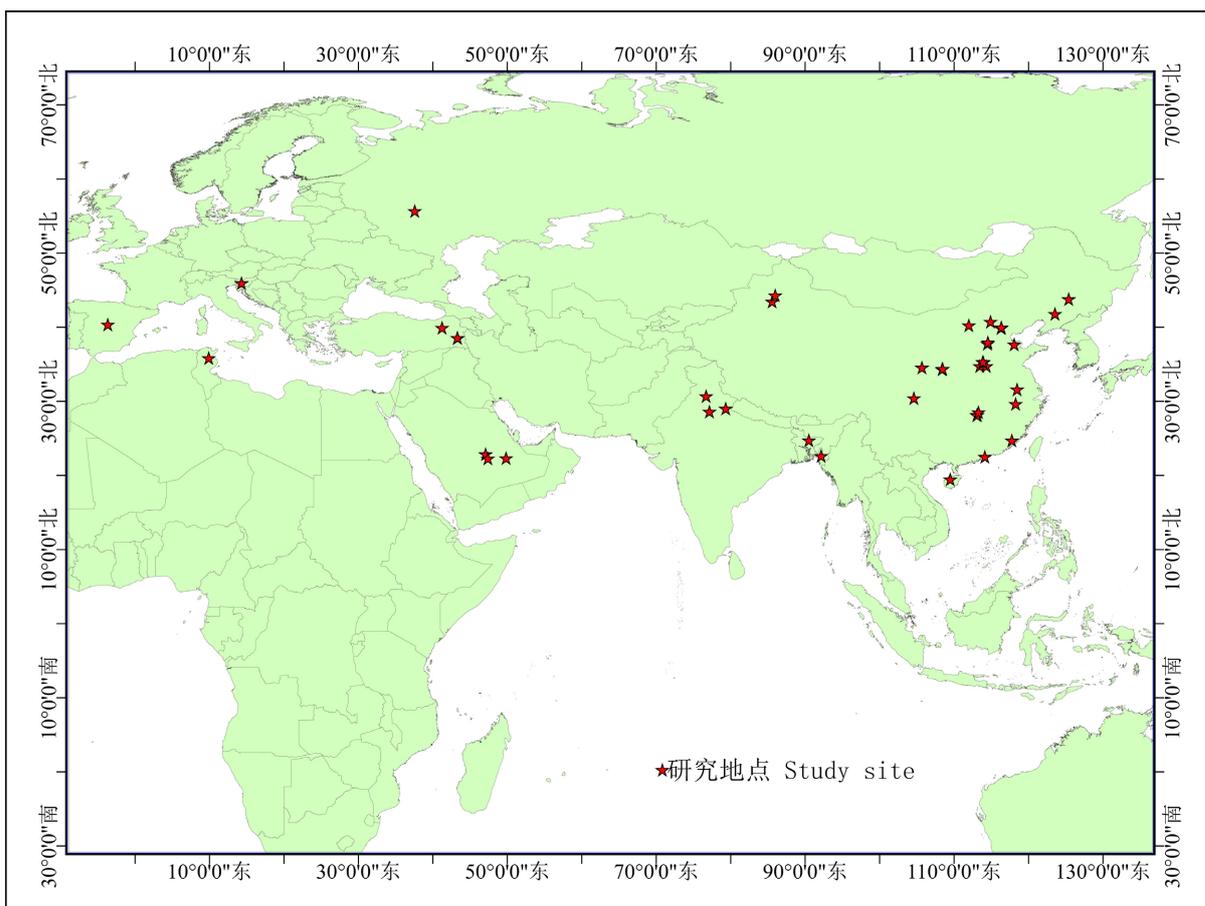


Figure 1. Distribution map of wastewater irrigation experimental sites

图 1. 污废水灌溉试验站点分布图

## 2.2. 数据分类

此外,本研究选取 EC、TDS、pH 和 SS 作为核心水质指标进行分析。主要参照联合国粮农组织《Water quality for agriculture FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev.1》建立评价体系,依据作物耐盐性、土壤渗透性等因素对 EC、pH、TDS 进行风险等级划分与阈值限定。悬浮固体(SS)指标参照《农田灌溉水质标准 GB 5084-2021》进行分组。各水质参数分组见表 1。文献收集到的污水类型包括:生活污水、再生水、微咸水、养殖废水、橡胶废水、乳制品废水、污染河水、造纸废水、畜禽废水、堆肥废水、富营养化水、垃圾渗滤液、混合污水(再生水 + 微咸水)和市政污水(生活污水 + 工业废水)。

**Table 1.** Classification of water quality parameters for sewage and wastewater

**表 1.** 污废水水质参数分组

水质指标	分类		
酸碱度(pH)	<6.5	6.5~8.4	>8.4
电导率(EC, $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	<700	700~3000	>3000
总溶解性固体(TDS, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	<450	450~2000	>2000
悬浮物(SS, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	>100	$\geq 100$	

## 2.3. 数据分析方法

本研究使用 MetaWin2.1 进行 Meta 分析,以对照组(清水灌溉)与处理组(污废水灌溉)的比值为响应比(RR),效应值(lnRR)为正表示对该指标产生了正向效应,反之则产生负向效应。效应值(lnRR)通过公式(1)进行计算:

$$y_i = \ln RR = \ln \frac{Y_e}{Y_c} \quad (1)$$

式中  $y_i$ (lnRR)为效应值;  $Y_e$  为处理组均值;  $Y_c$  为对照组均值。

权重( $\omega_i$ )反映各研究在合并总体效应量中的比重,权重越大,精确度越高,对合并结果的贡献也越大。赋予高精度研究更大权重,可使最终结果  $\bar{y}$  更可靠地代表总体平均效应。95%置信区间(95% CI)评估合并效应量的精度与统计显著性,其范围宽窄表示估计值的可靠性:不包含无效值则效应显著,包含则效应不显著。累计效应值( $\bar{y}$ )、权重( $\omega_i$ )、案例内方差( $V_i$ )和  $y_i$  的 95%置信区间(95% CI)可分别通过公式(2)~(5)进行计算:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_i y_i}{\sum_{i=1}^k \omega_i} \quad (2)$$

$$\omega_i = \frac{1}{V_i + \tau^2} \quad (3)$$

$$V_i = \frac{S_e^2}{N_e Y_e^2} + \frac{S_c^2}{N_c Y_c^2} \quad (4)$$

$$95\% \text{CI} = \bar{y} \pm 1.96 \times \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^k \omega_i}} \quad (5)$$

式中  $\bar{y}$  为单个研究的累计效应值;  $\omega_i$  为单个研究的权重;  $V_i$  为案例内方差;  $\tau^2$  为案例间方差;  $Y_e$  为处理

组均值； $Y_c$ 为对照组均值； $S_e$ 为处理组标准差； $S_c$ 为对照组标准差； $N_e$ 为处理组样本量； $N_c$ 为对照组样本量；95%CI为 $y_i$ 的95%置信区间。

亚组分析中， $\omega_j$ 代表亚组总信息量。以权重 $\omega_{ij}$ 加权平均效应量 $y_{ij}$ 得到 $\bar{y}_j$ ，作为第 $j$ 亚组合并效应量估计，考虑精度差异。同时计算 $Q$ 值量化总、组内和组间异质性。若 $P < 0.05$ ，则亚组间差异显著，变量是可能影响因素；反之影响不显著。各因子对应权重( $\omega_j$ )、各因子的水平为 $j$ 时累计效应值( $\bar{y}_j$ )、总异质性( $Q_{total}$ )，为组内异质性( $Q_{within}$ )和组间异质性( $Q_{between}$ )通过公式(6)~(10)进行计算：

$$\omega_j = \sum_{i=1}^k \omega_{ij} \quad (6)$$

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^k \omega_{ij} y_{ij}}{\sum_{i=1}^k \omega_{ij}} \quad (7)$$

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^k \omega_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

$$Q_{within} = \sum_{i=j}^k \omega_{ij} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad (9)$$

$$Q_{between} = Q_{total} - \sum Q_{within} \quad (10)$$

式中 $\omega_{ij}$ 表示在第 $j$ 组中，第 $i$ 个观测值所占的权重； $y_{ij}$ 为第 $j$ 个组中，第 $i$ 个独立研究的效应值； $\omega_i$ 为各因子对应权重； $Q_{total}$ 为总的异质性， $Q_{within}$ 为组内异质性， $Q_{between}$ 为组间异质性。

本研究采用失安全系数法检验 Meta 分析的发表偏倚性。该方法建议，如果 $N_{fs} > 5k + 10$ ，则认为结果相对稳健。在整合现有样本数据时，发现部分研究的样本量受限于已发表文献的可及性，证据整合可能存在发表偏倚。部分 Meta 分析的失安全系数未达到常规标准，提示结果稳健性或受未发表研究影响。我们视此为方法学上的提示，并在解读时保持了相应的谨慎态度。失安全系数( $N_{fs}$ )通过以下公式(11)和(12)进行计算：

$$N_{fs} = \frac{(\sum Z)^2}{C} - k \quad (11)$$

$$Z_i = \frac{y_i}{SE_i} \quad (12)$$

式中 $Z$ 为标准正态偏差； $C$ 为常数，通常设置为 2.706； $k$ 为当前 Meta 分析中实际合并的研究的篇数； $SE_i$ 为该样本效应值 $y_i$ 对应标准误。

## 2.4. 统计分析方法

采用 Microsoft Excel 2024 进行数据收集与整理。采用 MetaWin 2.1 进行 Meta 分析，按照处理组均值(x\_treatment)、对照组均值(x\_control)、 $S_e$ 为处理组标准差(x\_SD\_treatment)、 $S_c$ 为对照组标准差(x\_SD\_control)、处理组样本量(treatment\_n)、对照组样本量(control\_n)与其它相关变量进行输入。MetaWin2.1 输出结果使用 Graphpad Prism 9.5 进行森林图的绘制。实验站点分布图使用 ArcMap 在世界地图上进行标注。

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 污废水灌溉对土壤粒径的影响

土壤粒径分级决定土壤质地，其组成控制孔隙结构、水分传导保持、通气性和养分吸附。砂粒土壤透气透水好但保水弱；黏粒土壤保水保肥强但易板结透气差；粉粒性质居中。适当配比形成团粒结构，协调透气排水与保水保肥，创造利于根系生长的环境[12]。因此，本研究考察了灌溉用污废水中 pH、EC、

TDS 和 SS 对土壤粒径的影响, 结果如图 2 所示, pH、EC、TDS 和 SS 异质性均较低( $P > 0.05$ ), 表明灌溉用废水的 pH、EC、TDS 和 SS 并非影响土壤粒径的关键参数。就具体效应而言, pH 分组(图 2(a))受到样本量的限制, 未能进行对土壤粒径分级的亚组分析。EC 水平变化对土壤颗粒组成的整体影响有限(图 2(b)), 只有高 EC 组( $>3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )对砂粒表现出明显的负向效应。同样图 2(c)显示由于现有样本量限制, 未能进行 TDS 对土壤粒径分级的亚组分析。此外, 本研究还对污水类型的影响及灌溉后不同深度土壤粒径组成进行了分析。由图 2(e)可知, 不同类型污水对各粒组的影响未表现出统计学差异, 只有再生水在粉粒中表现出积极效应。如图 2(f)所示, 各粒径组分的深度变化差异并不显著, 且与清水灌溉无异。此外对污水灌溉年限对土壤粒径影响(图 2(g))分析发现, 各组分均与无效线相交。污水灌溉对土壤粒径的影响因受限于样本量未表现出显著效应, 在今后的研究中需更多考察污水灌溉对土壤粒径的影响, 以便得出较为有效、可靠的结论。

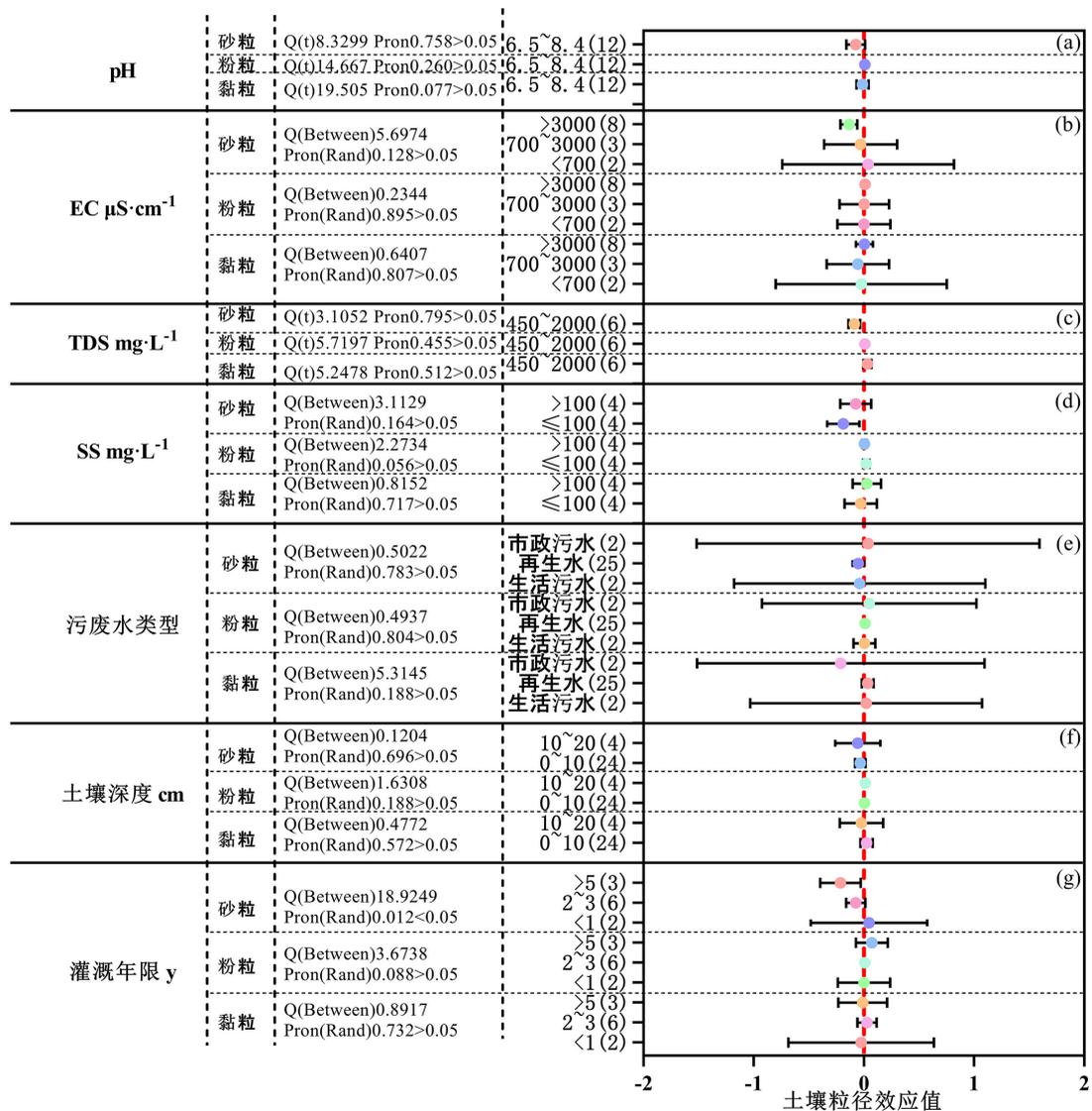


Figure 2. The effect of sewage and wastewater irrigation on soil particle size (values in parentheses on the vertical axis represent sample size)

图 2. 污水灌溉对土壤粒径的影响(纵轴括号内数值为样本量)

### 3.2. 污水灌溉对土壤孔隙率的影响

土壤孔隙率决定了水、气、植物根系的容纳与流通空间,直接影响土壤的透气性、持水性、导水率和机械强度,进而调控植物的根系发育、水分养分获取及微生物活动环境[13]。在适宜范围内,较高的总孔隙率利于土壤通气、排水及根系伸展,从而促进植物生长与微生物活动。因此,本研究考察了灌溉用污水的 pH、EC、TDS 和 SS 对土壤孔隙率的影响,结果如图 3 所示。水质参数 pH 与 SS 的组间异质性较低( $P > 0.05$ ),表明污水的 pH 与 SS 并非影响土壤孔隙率的关键因素。就效应值而言,在 pH 6.5~8.4 范围内,污水与清水的 pH 条件相近,污水灌溉对土壤孔隙率的影响仅提升了 1.76%~3.15% (图 3(a)),且该组别包含充足的研究样本( $n = 73$ ),其分析结果表现出较高的稳定性。当灌溉用污水的  $SS > 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,可提升 2.57%~4.49% 的土壤孔隙率(图 3(d)),而  $SS \leq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  组对土壤孔隙率的提升较小,且与无效线相交,在统计学上与清水组无显著差异。从孔隙数量上看,这为水分运动和根系生长创造了潜在空间。然而,孔隙度增加对实际水文功能的提升作用,需要结合孔隙结构和水力传导度数据来进一步确认[14]。但在收集到的数据集中无法开展进一步分析研究,在今后的研究中需更多考察 SS 对孔隙结构的影响,以便得出较为有效、可靠的结论。

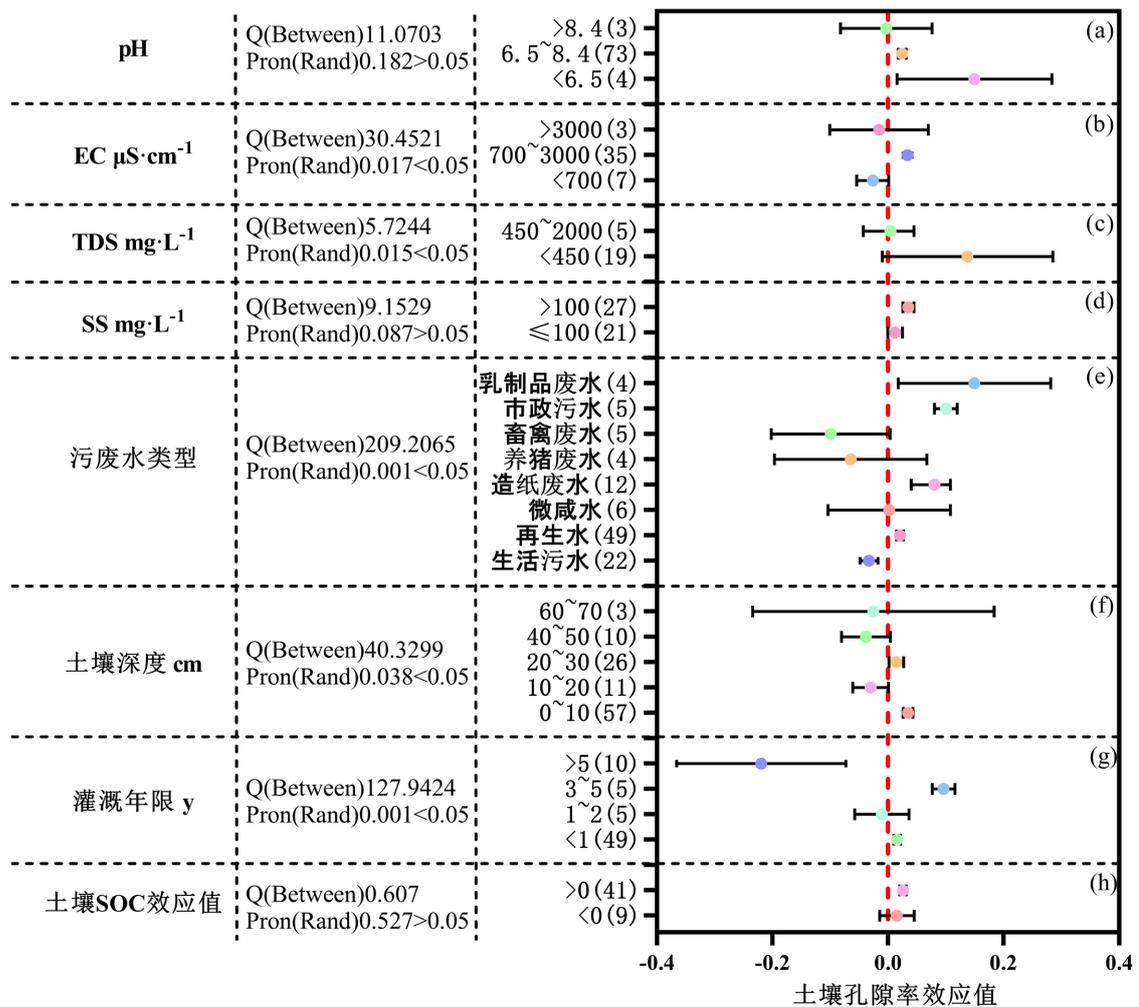
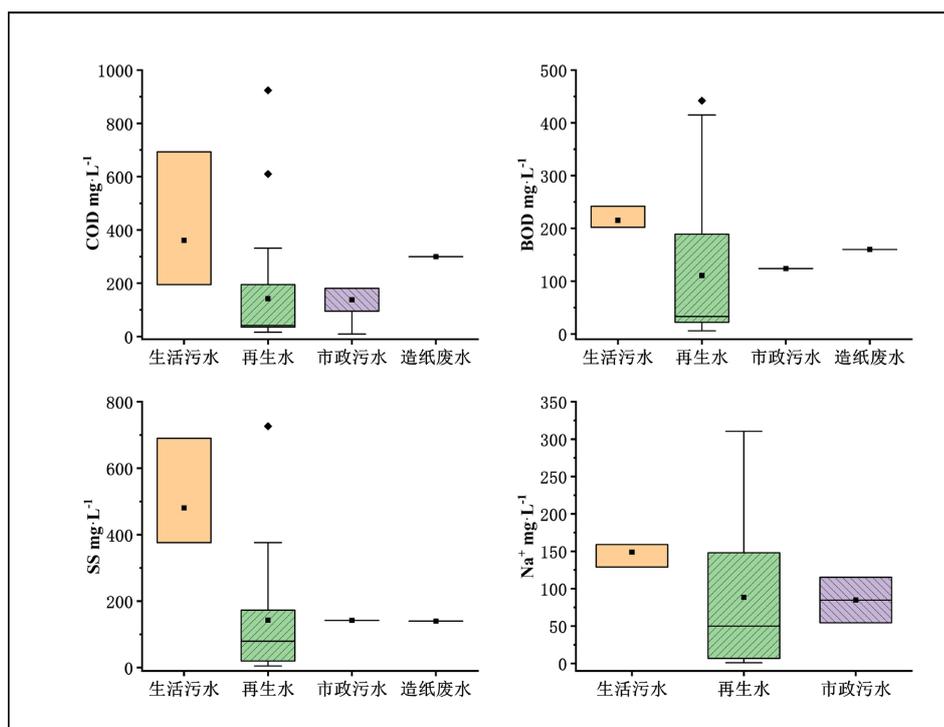


Figure 3. The effect of sewage and wastewater irrigation on soil porosity (the values in parentheses on the vertical axis represent the sample size)

图 3. 污水灌溉对土壤孔隙率的影响(纵轴括号内数值为样本量)

由图 3(c)可知,不同 TDS 组的组间异质性达到了显著水平( $P = 0.015 < 0.05$ ),但两组的 95%置信区间均与无效线(效应值 = 0)相交,因此在统计学上与清水组对土壤孔隙率的影响无显著差异。如图 3(b)所示,EC 组间表现出较高的异质性( $Q(\text{Between}) = 30.45$ ),且达到了统计学上的显著水平( $P = 0.017 < 0.05$ ),表明 EC 是影响土壤孔隙率的一个关键因素。在当前数据集范围内,发现采用 EC 为  $700\sim 3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  的污水进行灌溉,对土壤孔隙率产生了显著的正向效应,相对于清水组增加了 2.64%~4.17%,这可能与特定盐分浓度影响土壤团聚体结构有关;该组包含了绝大多数研究样本( $n = 35$ ),结果较为稳健。而较低 EC ( $< 700 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )与较高 EC ( $> 3000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )两组的 95%置信区间与无效线相交,表明该负面影响未达到统计学显著性,且由于该两组样本量较小,其效应的不确定性较大。

如图 3(e)所示,污水类型的组间异质性极高( $Q(\text{Between}) = 209.20, P = 0.001$ ),表明按污水类型进行亚组分析十分必要。相对于清水灌溉,再生水、造纸废水、市政污水、乳制品行业废水灌溉显著提升土壤孔隙率,其中乳制品废水效应在当前数据集范围内最为显著,提升 14.96%。再生水组样本量较大( $n = 49$ ),结果较为稳健,土壤孔隙率提升了 2.09%。而生活污水显著降低孔隙率 3.28%。其余三种污水类型(包括猪场废水、畜禽废水、苦咸水)的 95%置信区间均与无效线(效应值 = 0)相交,表明其对土壤孔隙率的影响与清水组在统计学上无显著差异。不同污水灌溉对土壤孔隙率的影响差异源于其水质特性。生活污水污染物负荷高(图 4),其悬浮固体会堵塞孔隙减少有效空间[15];钠离子置换钙镁离子使团聚体分散,细颗粒迁移堵塞大孔隙形成致密结构形成致密结构[16];过高有机质引发微生物异常活动,加剧生物堵塞与压实,进一步降低孔隙率[17]。相反,再生水和市政污水负荷较低(图 4),能促进团聚体形成、增加孔隙、改善结构[18]。Meta 分析显示(图 5(a)),再生水和市政污水可显著提高土壤有机质,而有机质增加对孔隙率有显著提升作用(图 3(h))。造纸废水富含纤维素等有机物,作为微生物碳源,其代谢产物能胶结土壤颗粒,增强团聚体稳定性,从而降低容重、提高孔隙度和持水能力[19]。

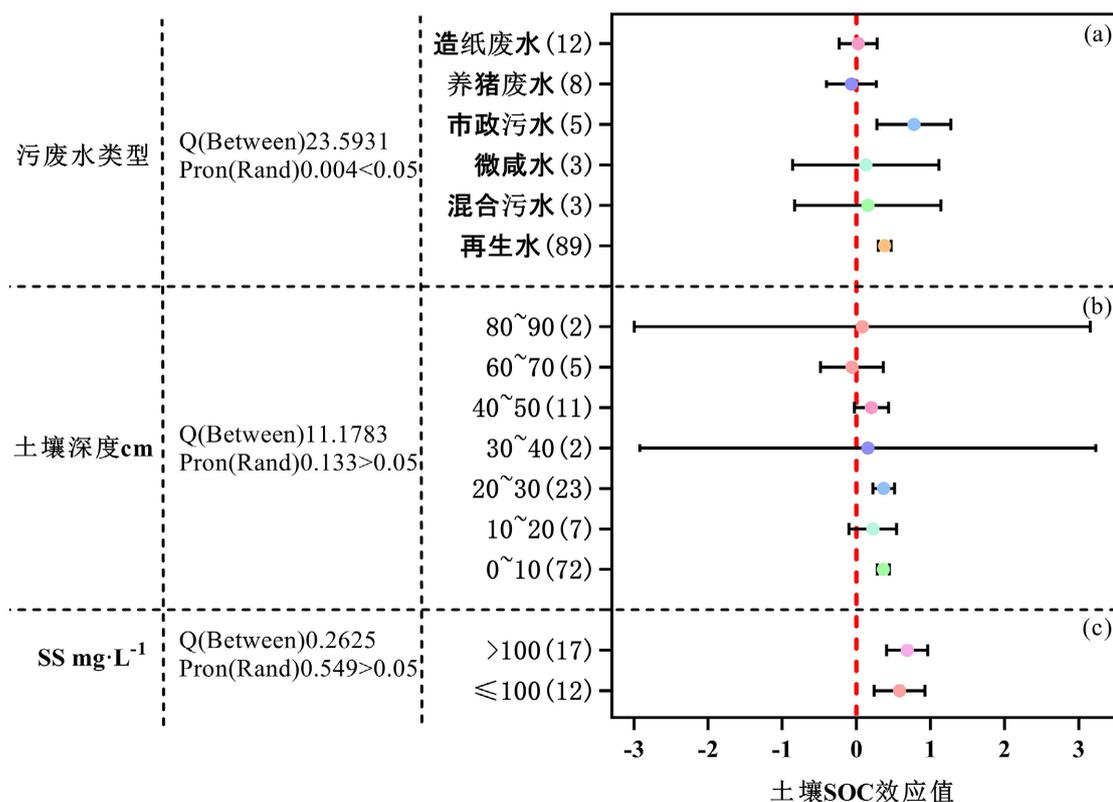


**Figure 4.** Comparison of COD, BOD, SS, and  $\text{Na}^+$  concentration box plots in domestic sewage, recycled water, municipal sewage, and papermaking wastewater

**图 4.** 生活污水、再生水、市政污水和造纸废水中 COD、BOD、SS 和  $\text{Na}^+$  浓度箱线图比较

由图 3(f)可知, 污废水灌溉对土壤孔隙率的影响随土层深度呈现明显差异, 不同土壤深度组间存在显著的异质性( $Q(\text{Between}) = 40.32, P = 0.038 < 0.05$ )。在现有数据集范围内 0~10 cm 与 20~30 cm 深度的土壤中, 污废水灌溉对孔隙率产生了较为显著的正向效应, 孔隙率分别增加了 2.62%~4.31%与 0.18%~2.69%。这两组样本量较大( $n = 57$  与  $n = 26$ ), 结果较为可靠。而其他深度的土壤, 各效应值的 95%置信区间均与无效线相交, 表明在这些深度上污废水灌溉对土壤孔隙率的影响与清水灌溉在统计学无显著差异。表层土壤孔隙率的增加, 可能源于污废水中有机质被表层土的优先截留作用, 使其能够富集在表层土壤中(图 5(b)), 形成新的团聚体和大量微小孔隙[13]。

如图 3(g)所示, 污废水灌溉对土壤孔隙率的影响随灌溉时间的变化出现明显差异( $Q(\text{Between}) = 127.9424, P = 0.001 < 0.05$ )。基于本数据集, 小于 1 年与 3~5 年的污废水灌溉对土壤孔隙率产生了较为显著的正向效应, 孔隙率分别增加了 1.62%与 9.63%。且前者样本量较为充足( $n = 49$ ), 结果较为可靠。而大于 5 年的灌溉年限使土壤孔隙率降低了 21.95%。在灌溉初期污废水能够引入有机质(如碳、氮)为土壤微生物提供碳源和养分, 增强其代谢活动。微生物分泌胞外聚合物等生物胶结物质, 促进土壤颗粒团聚形成稳定结构, 从而增加孔隙度、改善通气与水分入渗[20]。在当前数据集范围内, 长期污水灌溉对土壤孔隙率的影响是负面趋势, 但其具体原因依赖于水质、土壤性质、气候及田间管理措施等多重因素的交互调控。



**Figure 5.** The impact of sewage and wastewater irrigation on soil SOC (values in parentheses on the vertical axis represent sample size)

**图 5.** 污废水灌溉对土壤 SOC 的影响(纵轴括号内数值为样本量)

### 3.3. 污废水灌溉对土壤含水量的影响

土壤含水量通过调节土壤结构、通气、温度和养分运移, 将直接控制植物的水分养分供应与根系环

境，其动态平衡是植物健康生长的关键。在适宜范围内，相对较高的含水量有助于降低作物水分胁迫风险，维持更优的生理代谢活动，从而更有利于生物量积累与产量提高[21]。因此，本研究考察了灌溉用污水中 pH、EC、TDS 和 SS 对土壤含水量的影响，结果如图 7 所示。水质参数 pH、EC 和 TDS 的组间异质性均较低( $P > 0.05$ )，表明并非影响土壤含水量的关键因素。在 pH 6.5~8.4 范围内，污水与清水的 pH 条件相近，两者对土壤含水量的影响差异较小，污水灌溉仅比清水灌溉低 0.98%~4.55% (图 6(a))。相较于清水灌溉，采用  $EC > 700 \mu S \cdot cm^{-1}$  的污水灌溉均可增加土壤含水量，均值分别增加 7.07% (EC700~3000)与 4.43% (EC > 3000) (图 6(b))；当污水 TDS > 2000  $mg \cdot L^{-1}$  时可使土壤含水量提升 21.74% (图 6(c))。由于 SS 组样本量有限，未能就含水量指标进行亚组分析， $SS \leq 100 mg \cdot L^{-1}$  时土壤含水量均值较清水组提高了 9.24% (图 6(d))。

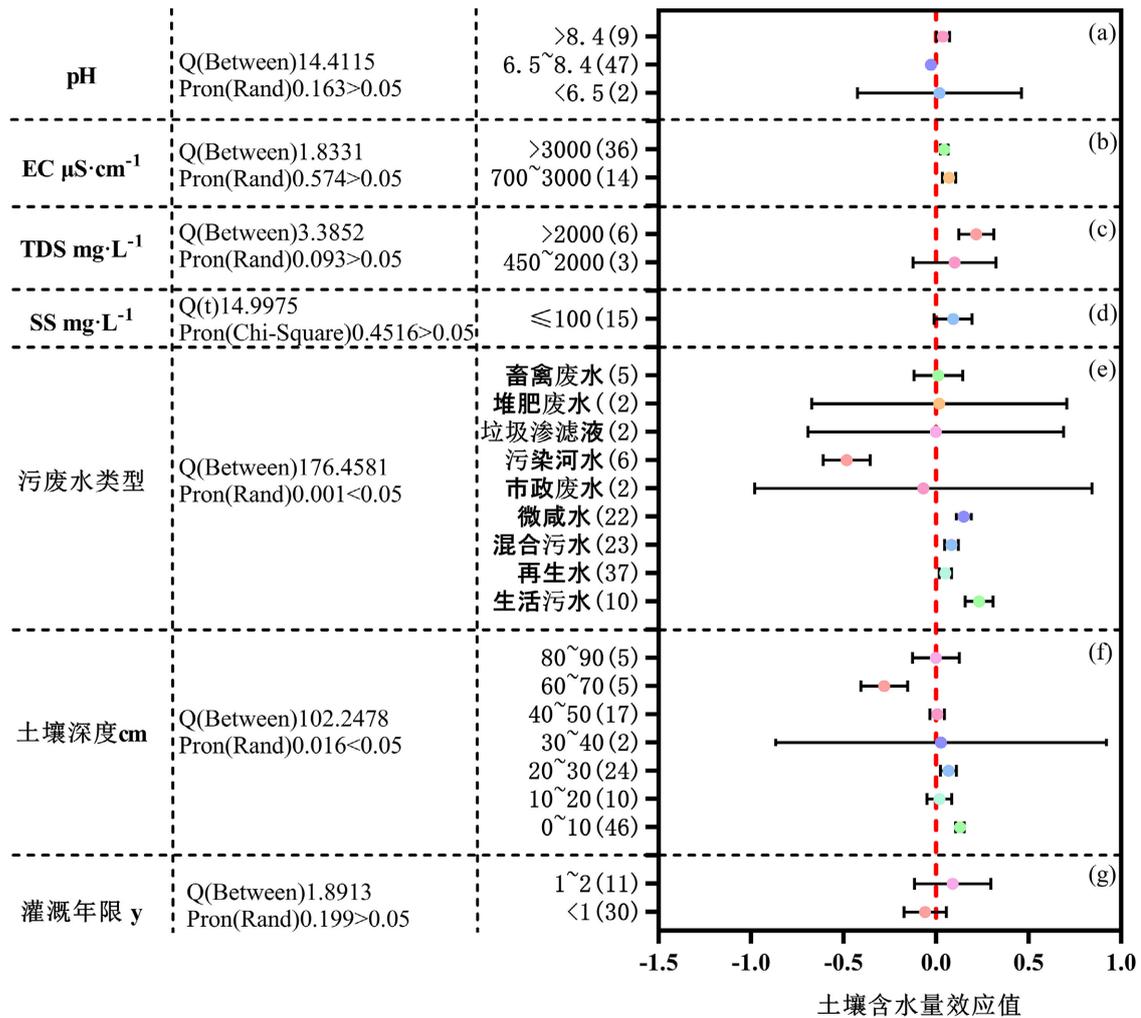


Figure 6. The influence of different types of sewage and wastewater on soil moisture content at different depths (the values in parentheses on the vertical axis represent the sample size)

图 6. 不同污水类型对不同深度土壤含水量的影响(纵轴括号内数值为样本量)

对污水类型的影响及灌溉后不同深度土壤的含水量进行分析发现，二者的组间异质性均较高，Q(Between)分别为 176.45 和 102.24。由图 7(e)可知，在本数据集所涵盖的样本中，生活污水、再生水、混合污水(再生水 + 微咸水)、微咸水对土壤含水量产生了显著的正向效应，其中生活污水最为显著，可

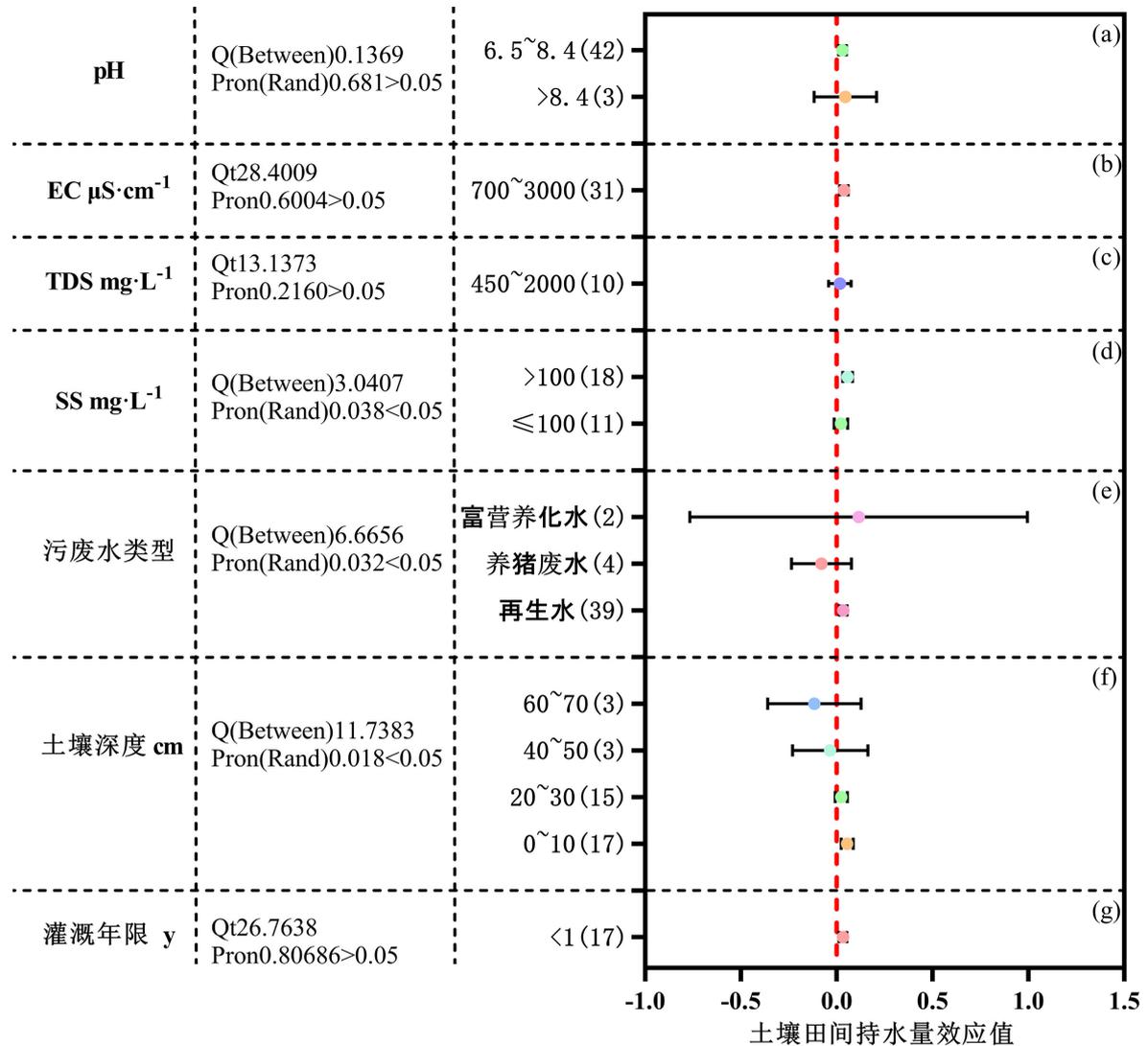
使土壤含水量提升 23.33%。这可能是因为生活污水灌溉会堵塞大孔隙并破坏土壤团聚体, 导致土壤结构致密、透水性变差, 但形成的小孔隙持水能力更强, 因此土壤表层的含水量可能短期增加[22]。而受污染河水对土壤含水量却产生了显著的负向效应, 使土壤含水量降低了 48.28%。其余四种污废水类型(包括猪场废水、畜禽废水、苦咸水)的 95%置信区间均与无效线(效应值 = 0)相交, 表明其对土壤含水量的影响与清水灌溉在统计学上无显著差异。

由图 6(f)可知, 与清水灌溉相比, 依据当前数据, 污废水灌溉对 0~10 cm 与 20~30 cm 深度的土壤含水量产生了显著的正向效应, 使土壤含水量分别提升了 12.92%和 6.7%; 而对 60~70 cm 深度的土壤含水量产生了显著的负向效应, 使土壤含水量降低了 28.01%; 其余深度的土壤含水量, 污废水灌溉和清水灌溉在统计学无显著差异。这种“上增下减”的原因在于污废水灌溉对土壤结构和水分运移过程的双重影响。污废水灌溉时, 水中的悬浮物和有机颗粒会优先截留在表层土壤中(图 5(b)), 堵塞土壤大孔隙, 并易形成致密结皮, 大幅降低水分的入渗速率, 使水分滞留于表层。其次污废水中的有机质增加了土壤有机质含量, 形成了新的团聚体在土壤中创造了大量微小孔隙, 而总孔隙率的增加(图 3(f))会提高土壤的持水能力, 使其能够吸附更多水分[22]。此外, 部分污废水中较高的盐分浓度增加了土壤水的渗透压, 不仅阻碍水分下移, 还可能促使深层水分向上运移供作物吸收或蒸发[23]。从作物根系分布的角度进一步分析, 不同植物根系在土层中的延伸深度存在显著差异。例如, 浅根系作物(如小麦、蔬菜类)主要吸收表层土壤水分, 表层含水量的增加对其具有更为直接的促进作用; 而深根系作物(如果树、玉米等)的根系可延伸至较深土层, 深层土壤含水量的降低则可能对其产生更为显著的水分胁迫影响[24]。因此, 污废水灌溉更适合浅根系作物。为此, 本研究系统评估了不同污废水类型对不同深度土壤含水量的影响, 但由于现有样本量不足, 未能明确各污废水类型对不同深度土壤含水量的影响, 无法进一步提供污废水类型与作物根系深度的匹配度。建议后续研究开展相关试验, 以明确不同污废水类型与作物适配性之间的关系。由图 6 g 可知, 污废水灌溉年限对土壤含水量影响的组间异质性较低, 且均与无效线相交, 未能表现出明显差异。

### 3.4. 污废水灌溉对土壤田间持水量的影响

田间持水量是表征土壤持水保肥能力、界定最佳水气平衡的核心属性参数, 是指导节水灌溉、评估土壤旱情以及理解土壤-植物水分关系的关键指标之一[25]。当土壤同时具备较高的田间持水量和良好的排水通气性时, 对植物生长会产生极为积极和全面的影响[25]。因此, 本研究考察了灌溉用污废水的 pH、EC、TDS 和 SS 对土壤田间持水量的影响, 结果如图 7 所示。不同 pH、EC 和 TDS 的异质性均较低, 说明其对土壤田间持水量的影响未达到统计学显著性水平, pH、EC 和 TDS 并非影响土壤田间持水量的关键因素。而 SS 的异质性显著( $P < 0.05$ ), 表明其分组对土壤田间持水量产生了不同程度的影响。从具体效应量来看, 在 pH 6.5~8.4 范围内, 污废水组相对于清水组提升了 3.02%的土壤田间持水量, 且该组别包含 42 个独立研究, 样本量充足, 区间范围较窄, 结果具有较好的稳定性(图 7(a))。而 pH > 8.4 组的置信区间较宽, 包含零值, 而且该组仅包含 3 个研究, 结果的可靠性受到样本量的限制。由于 EC (图 7(b))与 TDS (图 7(c))数据样本量有限, 无法基于田间持水量对该指标进行有效的亚组分析。如图 7(d)所示, 当灌溉水的  $SS > 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时, 土壤田间持水量相对于清水组增加了 5.67%, 且该组别包含 18 个独立研究, 结果具有较高的稳定性。

由图 7(e)可以看出, 不同来源的污废水灌溉对土壤田间持水量产生了不同程度的影响。再生水灌溉表现出显著的正向效应, 其效应量均值为 0.034, 该区间完全位于无效线右侧且范围较窄, 表明提升作用稳定可靠, 且此组别包含 39 个独立研究, 样本量充足, 结果具有较高的可信度。而养猪废水与富营养化水的效应量均值分别为-0.0766 和 0.1144, 区间范围较宽且包含零值, 表明影响未达显著水平, 且该两组样本量较少, 研究结果差异较大, 建议后续应开展相关研究, 明确养猪废水与富营养化水用于灌溉的可行性。



**Figure 7.** The impact of sewage and wastewater irrigation on soil field water holding capacity (values in parentheses on the vertical axis represent sample size)

**图 7.** 污废水灌溉对土壤田间持水量的影响(纵轴括号内数值为样本量)

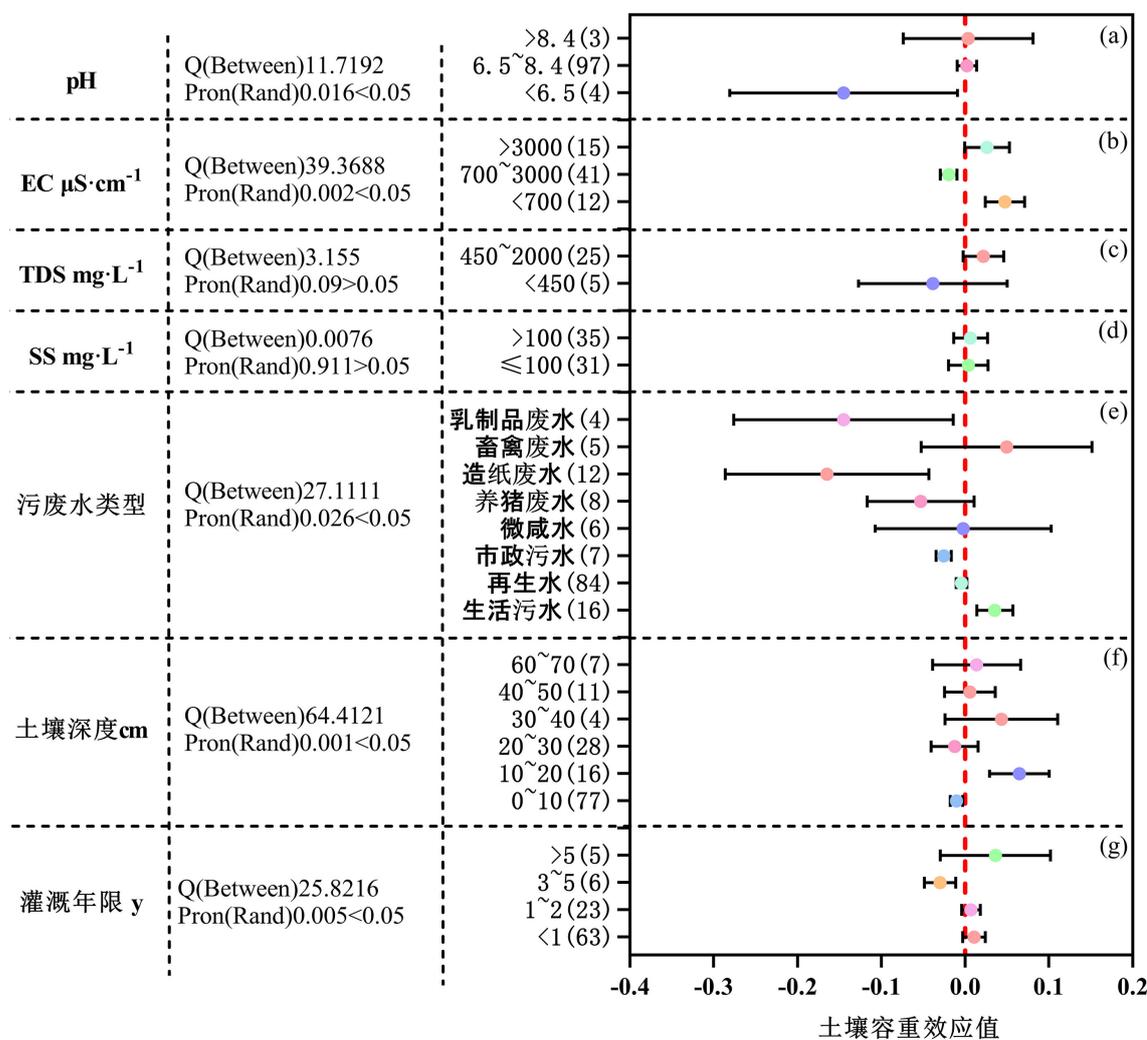
污废水灌溉对土壤的影响随深度变化呈现显著的垂直空间异质性(图 7(f))。基于本数据集研究发现,表层土壤(0~10 cm)的田间持水量表现出明显的正向响应,效应值显著大于零;而在 20~30 cm 深度,效应值虽为正向但其置信区间较宽,结果不具稳定性;随着深度增加,效应方向发生转变,呈现负向趋势,但都横跨无效线。由图 7(g)可知,由于灌溉年限组样本量有限,未能就田间持水量指标进行亚组分析。总体而言,土壤田间含水量的增减变化趋势与土壤含水量相一致,其机制与土壤含水量分析相同。

### 3.5. 污废水灌溉对土壤容重的影响

土壤容重是衡量土壤松密程度与结构的关键指标。高容重意味着土壤紧实、孔隙少,会严重阻碍水分渗透、空气流通和根系下扎,是土壤退化和限制植物生长的主要物理成因。而低容重使土壤疏松多孔,显著改善通气透水性,促进根系生长,是理想的土壤物理结构[26]。因此,本研究考察了灌溉用污废水的 pH、EC、TDS 和 SS 对土壤容重的影响,结果如图 8 所示。pH 和 EC 的组间异质性较高,表明其分组均

对土壤容重产生了不同程度的影响。而 TDS 与 SS 则组间异质性较低, 说明其对土壤容重的影响未达到统计学显著性水平, TDS 和 SS 可能不是调控土壤容重变化的关键因素。

由图 8(a)可知, pH 6.5~8.5 与 pH > 8.4 组的效应值均横跨无效线, 表明在此 pH 范围内污水灌溉与清水灌溉对土壤容重的影响在统计学上无显著差异; 在酸性条件(pH < 6.5)下则表现出负向效应, 但受限于该组样本量较少(n = 4), 结果并不稳健。由图 8(b)可知, 在本数据集内, 当灌溉污水的 EC 为 700~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时, 土壤容重产生了显著的负响应(-2.94%~-0.97%); 而当 EC < 700  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时, 效应量为正向(2.41%~7.11%); 较高 EC 水平(EC > 3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )下, 效应量与零相交, 表明影响不显著。EC 为 700~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时通常意味着土壤中含有适量的可溶性盐离子, 这些离子(如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ )能促进土壤颗粒间的团聚作用, 有助于形成更稳定的孔隙结构, 从而降低土壤容重。当 EC 值过低时, 可溶性离子浓度不足, 土壤颗粒间团聚作用减弱, 结构较为松散, 但可能因缺乏支撑而易于被压实; 而当 EC 值过高, 过量的盐分可能破坏土壤结构, 或通过高渗透压引起土壤有机质或粘粒的物理化学状态改变, 导致土壤变得紧实, 增加容重[27]。



**Figure 8.** The effect of sewage and wastewater irrigation on soil bulk density (values in parentheses on the vertical axis represent sample size)

**图 8.** 污水灌溉对土壤容重的影响(纵轴括号内数值为样本量)

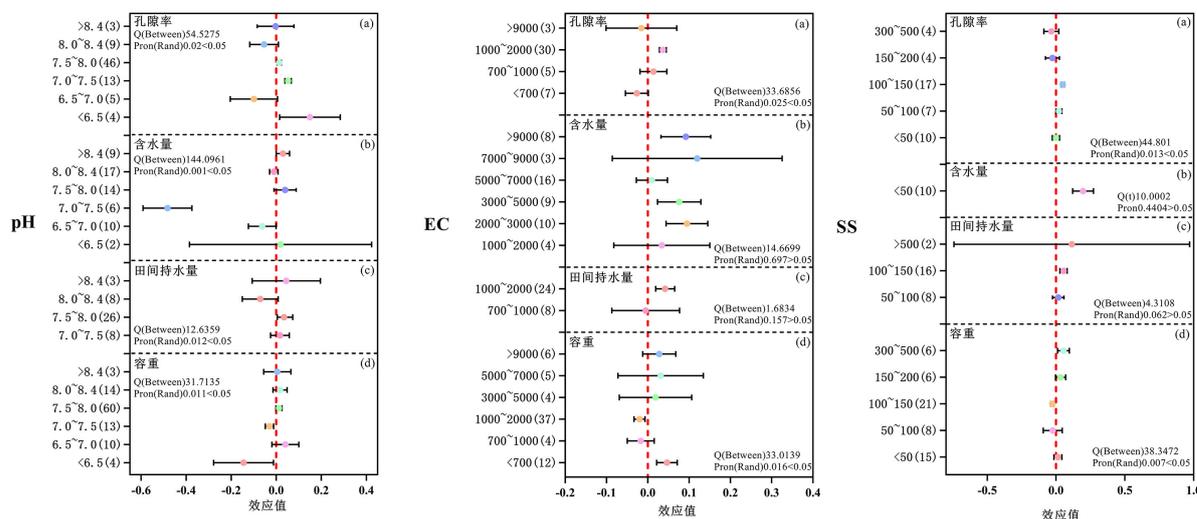
如图 8(e)所示,不同污水类型呈现出不同的调控模式。依据当前数据,研究发现生活污水表现出显著的正向效应,其效应量均值为 0.0355,95%置信区间为(0.014,0.057),表明采用生活污水灌溉会显著增加土壤容重。与之前对土壤孔隙率的影响分析相同,生活污水中因含有更高的悬浮固体,易堵塞土壤孔隙,导致土壤容重增加。而市政污水和乳业废水则产生显著的负向效应,相较于清水组容重分别降低了 2.55%和 14.515%,这可能与增加土壤孔隙率有关(图 3(e))。此外,造纸废水中特定的有机组分(如木质素衍生物)在改善土壤结构、增加孔隙度、降低容重方面表现出积极作用[28]。其他组的置信区间均跨越无效线,表明其对土壤容重的影响在统计学与清水组无显著差异。从垂直分布来看(图 8(f)),相对于清水灌溉,污废水灌溉可减少 1.01%的 0~10 cm 深度土壤的容重,其效应值为负,置信区间完全位于无效线左侧,且该组包含最大的样本量( $n=77$ ),结果较为可靠。而对 10~20 cm 深度的土壤容重却表现出明显的增加趋势(效应量均值为 0.0649)。在更深的土层中(30~40 cm、40~50 cm 和 60~70 cm),效应值均趋近于零且置信区间范围较宽,统计学上均不显著。污废水灌溉降低表层土壤容重,可主要归因于其输入的有机质与特定离子,污废水中的有机质能促进土壤颗粒团聚,增加总孔隙率(图 3(f)),而且有机质本身密度较低,其输入也导致容重降低[29]。同时,钙离子( $\text{Ca}^{2+}$ )、镁离子( $\text{Mg}^{2+}$ )等有助于土壤胶体凝聚,进一步改善孔隙结构,增加孔隙率。

由图 8(g)可知,污废水灌溉对土壤容重的影响随灌溉时间的变化出现明显差异。在当前数据集范围内,3~5 年的灌溉年限下对土壤容重降低显著,降低了 2.98%,但该组样本量较少( $n=6$ ),稳健性较差。灌溉年限小于 1 年与 1~2 年组对土壤容重分别增加了 1.08%和 0.71%,但两组均横跨无效线。

### 3.6. 灌溉用污水水质参数优化研究

基于以上 Meta 分析,污废水灌溉作为一种水资源再利用方式,在一定程度上可有效改善土壤物理性质。具体而言,当灌溉污水 pH 6.5~8.4 时能够增加土壤孔隙率(图 3(a))和田间持水量(图 8(a))。灌溉水电导率(EC)为 700~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时改善更全面,提升孔隙率(图 3(b))、含水量(图 6(b))和田间持水量(图 7(b)),并降低容重(图 8(b))。TDS 由于样本量不充足,在 Meta 中未能确定其改善土壤物理性质的范围。在  $\text{SS} > 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时,增加孔隙率(图 3(d))和田间持水量(图 8(d))。由上述分析可知,高度处理的水质并非改善最佳,因此需要细分水质参数,找到更益土壤的精确区间,以制定明确的处理标准。

从土壤物理性质改良的角度考虑,含水量的增加、孔隙率的提高、田间持水量的提升,以及土壤容重的降低,通常被认为是对土壤健康和植物生长是有利的。因此,本研究以效应值方向(土壤孔隙率、含水量与田间持水量为正,容重为负)、较窄的 95%置信区间(95% CI)及较大样本量为筛选标准,在现有数据集范围内,对灌溉污水的 pH、电导率(EC)及悬浮固体(SS)的影响进行了深入分析,以提供对土壤物理性质最为有利的灌溉用污水水质参数范围,结果如图 9 所示。由图 9 可知,使用 pH 7.0~7.5 与 pH 7.5~8.0 的污水进行灌溉,可使土壤孔隙率效应值均值分别增加 5.25%与 1.35%,且样本量充足,结果可靠。pH 7.5~8.0 的污水可使土壤含水量效应值均值和田间持水量效应值均值分别增加 3.94%和 0.496%,但土壤含水量的效应值置信区间横跨了无效线。pH 7.0~7.5 的污水可使土壤容重效应值均值降低 3.01%。总体而言,pH 7.0~8.0 范围内的灌溉水有利于改善土壤结构。对于 EC 而言,当 EC 为 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时,土壤孔隙率和田间持水量的效应值均值增加最大,分别增加了 3.64%和 4.21%,并且容重土壤容重效应值均值降低最多(2.01%),虽然该组土壤含水量的效应值横跨了无效线,但平均效应值仍呈正向,而对土壤含水量产生最大正效应(9.48%)的是 EC 2000~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  组。综上,EC 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  基本符合上述筛选标准。当采用 SS 为 100~150  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的污水进行灌溉时,土壤孔隙率与田间持水量效应值均值分别增加了 4.89%和 5.48%,土壤容重效应值均值降低了 2.73%。



**Figure 9.** The effect of pH, EC, and SS in wastewater on soil physical properties (The values in parentheses on the vertical axis represent the sample size)

**图 9.** 污水水 pH、EC 和 SS 对土壤物理性质影响(纵轴括号内数值为样本量)

综上所述, 基于现有数据集, 当灌溉用污水水质参数为 pH 7.0~8.0、EC 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、SS 100~150  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 土壤物理结构可得到有效改善, 具体表现为土壤含水量、孔隙度及田间持水量增加, 容重降低, 因此该水质区间可视为最优灌溉水质区间。

#### 4. 结论与建议

污水灌溉对土壤物理性质的影响是一把“双刃剑”。本研究通过 Meta 分析表明, 采用 pH 中性至微碱性以及较高的悬浮固体浓度( $>100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的污水进行灌溉, 有助于提升土壤孔隙率和持水能力。当灌溉水盐分为 700~3000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  时, 对土壤物理性质的整体改善效果更为显著, 不仅能增加土壤孔隙率、含水量和田间持水量, 还可降低土壤容重。然而, 因受样本量所限, 总溶解固体对土壤物理性质的量化影响范围尚未明确。本文还研究了不同污水类型对土壤物理性质的影响, 结果表明差异显著。生活污水由于具有较高的有机质、悬浮固体与钠离子容易导致土壤板结、孔隙堵塞, 对土壤物理性质产生不利影响。而再生水、市政污水等污染物负荷较低的污水类型, 有助于形成稳定团聚体, 提高孔隙结构, 增强土壤含水能力, 降低土壤容重。此外, 污水灌溉对土壤的影响具有明显的垂直分异特征。在 0~10 cm 表层土壤中, 污水的输入通常可提高孔隙率、含水量与田间持水量, 并降低容重; 而在较深层土壤(如 60~70 cm)中, 则可能因水分入渗受阻或盐分累积导致含水量下降。这一差异提示我们需结合作物根系分布特征, 实施差异化的灌溉管理策略。但因受限于现有已发表样本量的不足, 尚不能明确污水类型对不同深度土壤含水量的影响, 无法建立污水类型与作物得适配关系, 建议未来研究进一步开展相关试验。

基于 Meta 分析的结果, 本研究明确了影响土壤物理性质的关键因素(pH, EC, SS), 并基于此, 在现有数据集中进一步确定了以土壤健康为导向的最优的灌溉用污水水质参数范围: pH 7.0~8.0、EC 1000~2000  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 、SS 100~150  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 为灌溉用污水的处理要求提供了参考依据, 不仅可以改善土壤结构, 还可降低处理污水要求和成本, 具备良好的环境与经济可行性。

#### 参考文献

- [1] Bowman, D.C., Devitt, D.A. and Miller, W.W. (2006) The Effect of Moderate Salinity on Nitrate Leaching from

- Bermudagrass Turf: A Lysimeter Study. *Water, Air, and Soil Pollution*, **175**, 49-60. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9110-5>
- [2] Alderson, M.P., dos Santos, A.B. and Mota Filho, C.R. (2015) Reliability Analysis of Low-Cost, Full-Scale Domestic Wastewater Treatment Plants for Reuse in Aquaculture and Agriculture. *Ecological Engineering*, **82**, 6-14. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.04.081>
- [3] Jeong, H., Bhattarai, R., Adamowski, J. and Yu, D.J. (2020) Insights from Socio-Hydrological Modeling to Design Sustainable Wastewater Reuse Strategies for Agriculture at the Watershed Scale. *Agricultural Water Management*, **231**, Article ID: 105983. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105983>
- [4] 靳苏娜, 周文峰, 吴钟. 生物质炭和植物促生菌添加对矿井废水灌溉下小麦产量及土壤环境的影响[J]. 河南农业科学, 2024, 53(10): 106-116.
- [5] 刘健, 牛少勋, 黄恩惠, 等. 酸性矿山废水灌溉对稻田土壤铁碳的影响及微生物群落结构响应[J]. 中国环境科学, 2025, 45(5): 2654-2663.
- [6] López-Morales, C.A. and Rodríguez-Tapia, L. (2019) On the Economic Analysis of Wastewater Treatment and Reuse for Designing Strategies for Water Sustainability: Lessons from the Mexico Valley Basin. *Resources, Conservation and Recycling*, **140**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.001>
- [7] Hong, P., Julian, T., Pype, M., Jiang, S., Nelson, K., Graham, D., *et al.* (2018) Reusing Treated Wastewater: Consideration of the Safety Aspects Associated with Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes. *Water*, **10**, Article No. 244. <https://doi.org/10.3390/w10030244>
- [8] 练小晴, 张树峰, 杨潇, 等. 聚乙烯微塑料对土壤物理性质的影响: 粒径与含量的交互效应[J]. 土壤学报, 2025: 1-12.
- [9] Murtaza, G., Ghafoor, A., Qadir, M., Owens, G., Aziz, M.A., Zia, M.H., *et al.* (2010) Disposal and Use of Sewage on Agricultural Lands in Pakistan: A Review. *Pedosphere*, **20**, 23-34. [https://doi.org/10.1016/s1002-0160\(09\)60279-4](https://doi.org/10.1016/s1002-0160(09)60279-4)
- [10] Song, P., Feng, G., Brooks, J., Zhou, B., Zhou, H., Zhao, Z., *et al.* (2019) Environmental Risk of Chlorine-Controlled Clogging in Drip Irrigation System Using Reclaimed Water: The Perspective of Soil Health. *Journal of Cleaner Production*, **232**, 1452-1464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.050>
- [11] Gurevitch, J., Koricheva, J., Nakagawa, S. and Stewart, G. (2018) Meta-Analysis and the Science of Research Synthesis. *Nature*, **555**, 175-182. <https://doi.org/10.1038/nature25753>
- [12] Tan, J., Si, B., Zhao, Y., Lu, Y., Chen, Y., An, N., *et al.* (2025) Short-Term No-Tillage Improves Soil Water Retention and Maintains Soil Aeration at High Moisture Conditions despite Reduced Macroporosity. *Soil and Tillage Research*, **253**, Article ID: 106677. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106677>
- [13] Rasa, K., Tähtikarhu, M., Miettinen, A., Kähärä, T., Uusitalo, R., Mikkola, J., *et al.* (2024) A Large One-Time Addition of Organic Soil Amendments Increased Soil Macroporosity but Did Not Affect Intra-Aggregate Porosity of a Clay Soil. *Soil and Tillage Research*, **242**, Article ID: 106139. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106139>
- [14] Vinten, A.J.A., Mingelgrin, U. and Yaron, B. (1983) The Effect of Suspended Solids in Wastewater on Soil Hydraulic Conductivity: II. Vertical Distribution of Suspended Solids. *Soil Science Society of America Journal*, **47**, 408-412. <https://doi.org/10.2136/sssaj1983.03615995004700030003x>
- [15] Lado, M. and Ben-Hur, M. (2009) Treated Domestic Sewage Irrigation Effects on Soil Hydraulic Properties in Arid and Semiarid Zones: A Review. *Soil and Tillage Research*, **106**, 152-163. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.04.011>
- [16] Yan, S., Zhang, T., Zhang, B., Liu, Z., Cheng, Y. and Feng, H. (2024) Cation Composition of Saline Water Affects Soil Structure by Altering the Formation of Macropores and Cracks in Illite Soils. *Soil and Tillage Research*, **239**, Article ID: 106052. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106052>
- [17] Seki, K., Miyazaki, T. and Nakano, M. (1998) Effects of Microorganisms on Hydraulic Conductivity Decrease in Infiltration. *European Journal of Soil Science*, **49**, 231-236. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.1998.00152.x>
- [18] Zalacáin, D., Bienes, R., Sastre-Merlín, A., Martínez-Pérez, S. and García-Díaz, A. (2019) Influence of Reclaimed Water Irrigation in Soil Physical Properties of Urban Parks: A Case Study in Madrid (Spain). *Catena*, **180**, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.05.012>
- [19] Liang, X., Xu, Y., Yin, L., Wang, R., Li, P., Wang, J., *et al.* (2023) Sustainable Utilization of Pulp and Paper Wastewater. *Water*, **15**, Article No. 4135. <https://doi.org/10.3390/w15234135>
- [20] Werheni Ammeri, R., Hidri, Y., Soudi, F., Di Rauso Simeone, G., Hajjaji, F., Moussa, M., *et al.* (2023) Improvement of Degraded Agricultural Soil in an Arid Zone Following Short- and Long-Term Treated Municipal Wastewater Application: A Case Study of Gabes Perimeter, Tunisia. *Applied Soil Ecology*, **182**, Article ID: 104685. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104685>
- [21] Parhizkar, M. (2025) Soil Moisture Content Increases Root Length and Decreases Soil Detachment Capacity Based on an Optimal Threshold. *Rhizosphere*, **34**, Article ID: 101107. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2025.101107>

- 
- [22] 郭晓明, 马腾, 陈柳竹, 等. 污水灌溉下土壤孔隙特征的 CT 定量分析[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(11): 1896-1903.
- [23] 李慧, 林青, 徐绍辉. 咸水/微咸水入渗对土壤渗透性和盐分阳离子运移的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(3): 656-666.
- [24] Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G. and Muys, B. (2007) The Role of Fine and Coarse Roots in Shallow Slope Stability and Soil Erosion Control with a Focus on Root System Architecture: A Review. *Trees*, **21**, 385-402. <https://doi.org/10.1007/s00468-007-0132-4>
- [25] Nasta, P., Franz, T.E., Gibson, J.P. and Romano, N. (2023) Revisiting the Definition of Field Capacity as a Functional Parameter in a Layered Agronomic Soil Profile beneath Irrigated Maize. *Agricultural Water Management*, **284**, Article ID: 108368. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108368>
- [26] He, H., Meng, P., Chen, J., Qiu, Y., Cao, Y., Lv, Q., *et al.* (2024) Effects of Soil Bulk Density on Respiratory Metabolism and Medicinal Quality of *Rehmannia glutinosa* Root. *Industrial Crops and Products*, **216**, Article ID: 118796. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118796>
- [27] Woldeyohannis, Y.S., S Hiremath, S., Tola, S. and Wako, A. (2024) Influence of Soil Physical and Chemical Characteristics on Soil Compaction in Farm Field. *Heliyon*, **10**, e25140. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25140>
- [28] 丁成, 王世和, 杨春生. 草浆废水灌溉对海涂湿地土壤及芦苇生长的影响[J]. 生态环境, 2005(1): 21-25.
- [29] Pei, H., Wang, W., Pu, Y., Cao, K. and Zhang, J. (2025) Reclaimed Water Irrigation Risk Assessment and Optimization Strategy of Phosphorus in the Thirsty Arid City, a Case Study in Zhangjiakou, Northern China. *Journal of Environmental Management*, **395**, Article ID: 128007. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128007>