

# 微咸水与再生水混灌对土壤特性的影响与灌溉效应评估

刘春成<sup>1,2,3</sup>, 崔丙健<sup>1,3</sup>, 胡超<sup>1,3</sup>, 吴海卿<sup>1,3</sup>, 高峰<sup>1,3</sup>

(1.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453002;2.中国农业科学院研究生院,北京 100081;

3.中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站,农业水资源高效安全利用重点开放实验室,河南 新乡 453000)

**摘要:**为了探讨淡水资源不足地区微咸水的合理利用方式。通过盆栽试验,以清水灌溉为对照,研究不同比例微咸水与再生水混合灌溉对水盐、水溶性离子、滴水穿透时间 WDPT、有机质以及酶活性的影响,并利用第二代生物综合响应指数法(IBRv2)对微咸水与再生水混灌效应进行评价。结果表明:(1)与再生水灌溉(T1)相比,随着混合溶液中微咸水比重的升高,土壤含水率和含盐量逐渐升高且差异显著( $P < 0.05$ )。(2)与 T1 处理相比,随着混合溶液中微咸水比重的升高,土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  含量呈降低趋势, $Na^+$ 、 $Cl^-$  含量显著升高, $SO_4^{2-}$  含量显著降低, $Mg^{2+}$  含量无明显变化规律。(3)与 CK2(清水灌溉)相比,T1 处理土壤 WDPT 和有机质含量差异不显著;与 T1 处理相比,随着混合液中微咸水比重的进一步提高,土壤 WDPT 和有机质含量总体上呈升高趋势。(4)不同比例微咸水—再生水混合灌溉对土壤酶活性的影响不同。土壤蔗糖酶活性以 T2 处理(微咸水—再生水 1 : 2 灌溉)最高,土壤脲酶以 T3 处理(微咸水—再生水 1 : 1 灌溉)最高但和其他处理差异不显著。(5)基于 IBRv2 指数法,T2 处理 IBRv2 最小,为 6.89。因此,综合考虑土壤环境质量指标,在淡水资源匮乏地区利用微咸水(5 g/L)灌溉时,可以考虑用再生替代清水与微咸水配合使用,微咸水—再生水混灌比例以 1 : 2 为宜。

**关键词:** 微咸水; 再生水; 混灌; 斥水性; IBRv2

**中图分类号:** S154.3; S155.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2022)01-0255-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.033

## Effect of Mixed Irrigation of Brackish Water and Reclaimed Water on Soil Properties and Irrigation Effect Evaluation

LIU Chuncheng<sup>1,2,3</sup>, CUI Bingjian<sup>1,3</sup>, HU Chao<sup>1,3</sup>, WU Haiqing<sup>1,3</sup>, GAO Feng<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Farmland and Irrigation, CAAS, Xinxiang, Henan 453002; 2. Graduate School, CAAS, Beijing 100081;

3. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang City of Henan Province, Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, CAAS, Xinxiang, Henan 453000)

**Abstract:** This study was carried out to explore the reasonable utilization of brackish water in areas irrigated with brackish water and freshwater is short. This study set four treatments, including, reclaimed water irrigation(T1), mixed irrigation of 1 : 2 with brackish water-reclaimed water (T2), mixed irrigation of 1 : 1 with brackish water-reclaimed water (T3) and brackish water irrigation (T4), and took tap water irrigation (CK2), bare land irrigation with tap water (CK1) and bare land irrigation with 1 : 1 with brackish water-reclaimed water (CK3) as the control, of which the saline degree of brackish water was 5 g/L. Based on the pot experiments, we measured the data of soil water content, soil salt content, water drop penetration time (WDPT), soil organic matter content, and soil enzyme activities including soil sucrase (S-SC), soil alkaline phosphatase (S-AKP/ALP), soil urease (S-UE), soil polyphenol oxidase (S-PPO), and analyzed the their responses to the mixed irrigation with different ratios of brackish water to reclaimed water. Finally, the index of integrated biological response version 2 was used to evaluate the impact of mixed irrigation on soil. The results indicated that: (1) Compared to T1, soil water content and soil salt content gradually increased significantly with the increase of the proportion of brackish water in the mixed solution on the whole. (2) Compared

**收稿日期:** 2021-07-29

**资助项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFC0403503-2, 2017YFC0403302-1); 河南省重点研发与推广专项(202102110264); 河南省自然科学基金项目(202300410552); 中央级科研院所基本科研业务费专项(FIRI202001-02, FIRI20210302, FIRI2019-04-02)

**第一作者:** 刘春成(1986—), 男, 安徽界首人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: liuchuncheng986@sohu.com

**通信作者:** 高峰(1963—), 男, 河南驻马店人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事非常规水资源安全利用研究。E-mail: gfyx@sina.com

to T1, soil contents of  $K^+$  and  $Ca^{2+}$  had slight descending trend, soil contents of  $Na^+$  and  $Cl^-$  increased obviously, soil  $SO_4^{2-}$  content improved significantly, and soil  $Mg^{2+}$  content changed with no obvious trend with the increase of the proportion of brackish water in the mixed solution. (3) There were no significant differences in soil WDPTs and soil organ matter contents between T1 and CK2. Compared to T1, soil WDPTs and organic matter content had the ascending trend with the increase of the proportion of brackish water in the mixed solution. (4) The responses of different soil enzyme activities to different mixed irrigation with brackish water and reclaimed water were different. S-SC activity in T2 was the highest, S-UE activity in T3 was the highest but had no obvious differences from other treatments, and S-PPO activity in T4 was the highest following by T3 and no significant difference between them. (5) The index of IBRV2 in T2 was the lowest, and the value was 6.89. Therefore, considering soil environmental indexes and the limits of reclaimed water, reclaimed water could be used as an alternative source of fresh water in combination with brackish water, and mixed irrigation of 1 : 2 with brackish water-reclaimed water is recommended based on the index of IBRV2 in short fresh water resource and areas irrigated with brackish water.

**Keywords:** brackish water; reclaimed water; mixed irrigation; repellency; IBRV2

我国水资源十分短缺,人均水资源量不足世界平均水平的 1/3,且时空分布不均。我国农业用水占总用水量的 60% 以上,但是我国水资源时空分布与耕地资源的不匹配性使北方地区农业用水难以得到满足,严重制约了农业的可持续发展。非常规水资源作为一种替代资源,合理利用可以用来灌溉农业,缓解淡水资源不足的压力。因此,研究非常规水资源的安全利用具有重要的现实意义。

在一定范围内,微咸水灌溉可刺激作物的生长、不显著减产或提高产量,同时也可以提高水分利用率<sup>[1]</sup>。已有研究<sup>[2]</sup>表明,微咸水灌溉对黏质石灰土 0—15 cm 土层有效持水率没有影响,但是影响 15—72 cm 土层有效持水率。营养生长阶段灌淡水(1.2 dS/m)可以提高潜在产量,生殖阶段灌 7 dS/m 咸水可以提高果实品质,同时全生育期也可以使用中度微咸水(<4.5 dS/m)灌溉<sup>[3]</sup>。HYDRUS 模拟结果表明,华北地区长期微咸水灌溉小麦和玉米相对更适宜均质土壤<sup>[4]</sup>。但是,长期微咸水灌溉可能引起土壤盐渍化<sup>[5]</sup>、影响作物生长<sup>[6]</sup>;此外,微咸水灌溉可能产生土壤斥水性<sup>[7]</sup>。因此,微咸水灌溉虽然取得了很大的进展,但微咸水灌溉的次生盐渍化、盐胁迫对作物生长的抑制等一定程度上依然限制了其推广应用。而再生水中的盐分相对较低,利用再生水灌溉既可以淋洗盐分,又可以缓解农业水资源不足的压力。已有研究<sup>[8]</sup>表明,再生水中的养分有部分替代施肥的作用,可以降低肥料成本进而减少环境污染。再生水灌溉由于其内在的肥料效应对油桃树的营养状态、营养生长、植株光合性能、果实生长和产量等具有正面促进作用<sup>[9]</sup>。3 年灌溉试验研究<sup>[10]</sup>表明,再生水与淡水灌溉间油桃果实产量和品质均没有差异。与淡水灌溉相比,再生水灌溉对玉米和小麦产量影响不大<sup>[11]</sup>。

长期再生水灌溉可以减少人工施肥量,有效改善砂质紫色土不同粒级团聚体中的有机碳库、氮库和磷库<sup>[12]</sup>。以红壤土为研究对象,再生水连续灌溉和交替灌溉 1 年均使红壤酸性增强,盐分和有机质累积明显,且再生水—蒸馏水交替灌溉能抑制土壤斥水性的产生<sup>[13]</sup>。可见,再生水中所含的可生物降解有机质和营养物质具有一定的有益作用,长期灌溉可以改善土壤生物健康和养分状况。然而,微咸水与再生水混合后使用是否具有趋利避害提升水质的效果尚不清楚。为此,本研究通过盆栽试验,设置不同微咸水与再生水混合比例,探索微咸水与再生水混合灌溉对土壤环境的影响,以期为微咸水灌溉地区再生水的安全利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

供试土壤取自河南省新乡市七里营试验基地大田耕层 0—20 cm,土壤经风干、碾碎、过筛(2 mm)后备用。土壤容重为 1.40 g/cm<sup>3</sup>,土壤田间质量持水率为 23.02%,1 : 5 土水比土壤浸提液电导率为 372  $\mu$ S/cm,有机质质量分数为 2.66%。采用 BT-9300HT 型激光粒度仪对土样颗粒分析,土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)、砂粒(0.02~2 mm)占比分别为 13.05%,62.46%,21.49%,根据国际制划分标准土壤质地属于粉壤土。

### 1.2 试验装置与方案

试验于 2020 年在中国农业科学院新乡农业水土环境野外科学观测试验站温室大棚进行。该站地处 35.27°N,113.93°E,海拔 73.2 m,年均气温为 14.1 °C,多年平均年降水量和蒸发量分别为 588,2 000 mm,无霜期为 210 天,多年平均年日照时间为 2 398 h。

试验采用盆栽试验,供试用盆的规格为上口径 25 cm,下口径 14.5 cm,高 19 cm;每盆装土 7 kg,所有处理均施复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O 为 15:15:15)且全部作为基肥施入,施肥量参照当地农民施肥标准。供试作物为绿秀青梗菜(*Pakchoi*,俗称上海青),播种前所有处理均灌清水造墒。于 2020 年 5 月 27 日播种,每盆均匀撒播,待两叶一心时(6 月 11 日)每盆定植 5 棵幼苗,并开始不同水源灌水处理,前期每隔 1 天灌 1 次,每次灌水量为 400 mL(田间持水率的 75%~100%),后期随着作物需水量的增大每天灌 1 次水,灌水量为 400 mL。试验中微咸水与再生水混合比例设 4 个水平,即再生水、微咸水—再生水 1:2、微咸水—再生水 1:1、微咸水;微咸水矿化度为 5 g/L;并以清水灌溉种植作物与裸地以及微咸水—再生水 1:1 灌溉裸地为对照组。具体试验设计见表 1,微咸水、再生

水水质情况见表 2。试验用再生水取自河南省新乡市骆驼湾生活污水处理厂,该污水处理厂采用的工艺为 A/O 处理,污水处理后水质符合《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)<sup>[14]</sup>;清水为自来水。华北平原虽然浅层地下水水化学类型复杂,但整体以 Na<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 含量最高,微咸水通过向清水里面添加海盐进行配制,海盐成分以 NaCl 为主。

表 1 试验设计

处理	混合比例	备注
CK1	清水	裸地
CK2	清水	种作物
CK3	微咸水—再生水 1:1	裸地
T1	再生水	种作物
T2	微咸水—再生水 1:2	种作物
T3	微咸水—再生水 1:1	种作物
T4	微咸水	种作物

表 2 再生水、微咸水、清水水质

水源	EC/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	SAR	离子含量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )							
			Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
清水	321	0.34	10	1.6	39	15	30	120	104	—
再生水	2120	5.82	310	13.9	91	74	314	278	507	—
微咸水	9432	67.19	2000	2.6	37	18	3222	139	109	—

### 1.3 测定指标与方法

(1)土壤理化性质。收获后取土样,土壤样品风干、磨碎、过筛(2 mm)后备用。参照土壤农化分析<sup>[15]</sup>,采用烘干法测定土壤含水率;制备土水比 1:5 土壤浸提液,采用电导率仪测定土壤浸提液电导率 EC<sub>1:5</sub>;采用低温外热重铬酸钾氧化比色法测定土壤有机质;采用火焰光度法测定 Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup>;采用 EDTA 滴定法测定 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup>;采用 AgNO<sub>3</sub> 滴定法测定 Cl<sup>-</sup>;采用双指示剂—中和滴定法测定 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 和 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>;采用 EDTA 间接络合滴定法测定 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>;滴水穿透法测定土壤滴水穿透时间 WDPT。

(2)土壤酶活性。采用土壤蔗糖酶(soil sucase, S-SC)活性检测试剂盒(索莱宝,北京)检测土壤蔗糖酶活性,土壤磷酸酶(soil alkaline phosphatase, S-AKP/ALP)活性检测试剂盒(索莱宝,北京)检测土壤磷酸酶活性,土壤脲酶(soil urease, S-UE)活性检测试剂盒(索莱宝,北京)检测土壤脲酶活性,土壤多酚氧化酶(soil polyphenol oxidase, S-PPO)活性检测试剂盒(索莱宝,北京)检测土壤多酚氧化酶活性。

(3)第二代综合生物响应(integrated biological response version 2, IBRv2)指数的计算。选出相关性较强的影响因素,计算 IBRv2 指数,值越大,表示偏差越大。

$$\text{IBRv2} = \sum_{i=1}^n |A_i| \quad (1)$$

$$A_i = \left( \frac{\log \frac{x_i}{x_0} - \mu}{\sigma} \right) - Z_0 \quad (2)$$

式中: $A_i$ 为每个指标相对于对照的偏离指数, $A_i > 0$  或  $A_i < 0$  时,分别表示指标被诱导或受到抑制; $x_i$ 为每个指标的测定值; $x_0$ 为对照参考值; $\sigma$ 、 $\mu$ 为某因素对数标准化值所在处理组中的总平均值和标准差; $Z_0$ 位对照组标准化后的均一化值。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件整理试验数据,SPSS 25.0 软件进行单变量方差分析,采用最小显著差异法(Least significant difference method, LSD)进行显著性检验( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 微咸水与再生水混灌对土壤水盐的影响

土壤含盐量与土壤浸提液 EC<sub>1:5</sub> 高度正相关,土壤浸提液 EC<sub>1:5</sub> 测定简单易行,一般常用土壤浸提液 EC<sub>1:5</sub> 表征土壤含盐量。上海青收获后,不同微咸水与再生水混灌处理土壤含水率和电导率的变化见表 3。

由表 3 可知,对于土壤含水率而言,上海青收获后不同比例微咸水与再生水混合灌溉处理土壤含水率均高于 CK2,增幅为 10.3%~87.1%,其中 T1 和 T2 处理与 CK2 差异不显著,其他处理较 CK2 均差异显著( $P < 0.05$ );与 T1 相比,随着灌溉水中微咸水比重的提升,土壤含水率逐渐升高,其中 T4 与 T1、T2、T3 处理间

含水率均差异显著( $P < 0.05$ ), T2 与 T3 处理间差异不显著, 但显著高于 T1 处理, T1 与 T2 处理间差异不显著, T4 处理土壤含水率较 T1 处理高 69.6%。可见, 随着微咸水与再生水混合液中微咸水比重的提升, 土壤含水率越高, 也间接说明作物吸收水分的减少。

表 3 上海青收获后不同处理下土壤水盐变化

处理	土壤质量 含水率/%	$EC_{1:5}/$ ( $\mu S \cdot cm^{-1}$ )
CK1	29.71±2.07a	574.53±183.21e
CK2	11.94±0.87d	427.67±61.74e
CK3	28.92±2.04a	1425.82±35.68b
T1	13.17±0.91d	846.86±35.15d
T2	15.05±0.88cd	1188.18±54.28c
T3	18.15±3.83c	1319.91±104.61b
T4	22.34±1.02b	1705.52±47.62a

注: 表中数据为平均值±标准差; 同列不同字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

表 4 上海青收获后不同处理下土壤水溶性离子含量

处理	$Na^+$	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	$SO_4^{2-}$
CK1	101.00±18.76e	28.50±4.27a	267.33±84.20a	60.59±13.16a	32.05±14.59e	27.45±1.61c	18.72±7.90c
CK2	120.83±39.95e	9.33±0.29b	192.67±23.01bc	63.85±8.57a	32.05±10.64e	32.03±4.49bc	29.60±9.36bc
CK3	991.67±118.15b	24.00±6.56a	276.00±34.00a	20.33±5.50c	133.53±9.32b	29.69±1.68bc	37.44±5.28b
T1	316.67±14.43d	11.67±1.04b	216.67±16.17ab	37.82±10.64b	57.75±4.44d	28.98±1.83bc	55.36±10.34a
T2	783.33±80.36c	11.00±0.50b	184.00±13.11bc	13.42±5.59c	109.30±8.23c	33.86±1.86b	36.96±10.53b
T3	1008.33±123.32b	10.50±1.32b	155.33±15.01bc	24.40±15.58b	131.90±11.42b	38.94±3.56ab	28.80±4.18bc
T4	1450.00±86.60a	10.50±1.32b	130.00±9.17c	21.96±3.66bc	185.37±8.80a	42.80±4.32a	24.64±6.74bc

由表 4 可知, 对于土壤  $Na^+$ 、 $Cl^-$  含量而言, 较 CK2 相比, T1 处理土壤  $Na^+$ 、 $Cl^-$  含量均显著升高( $P < 0.05$ ), 增幅分别为 162.07%, 80.18%; 与 T1 相比, 随着混合溶液中微咸水比重的升高, 土壤  $Na^+$ 、 $Cl^-$  含量呈升高趋势且差异显著( $P < 0.05$ )。此外, 与裸地灌溉(CK1 和 CK3)相比, 种植作物灌溉后土壤  $Na^+$ 、 $Cl^-$  含量无显著性差异( $P > 0.05$ )。

对于土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  含量而言, T1 处理土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  含量均高于 CK2, 增幅分别为 25.08%, 12.46%, 87.03%, 处理间  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  含量差异不显著,  $SO_4^{2-}$  含量差异显著; 与 T1 相比, 随着混合溶液中微咸水比重的升高, 土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  含量呈降低趋势, 处理间  $K^+$  含量差异不显著,  $Ca^{2+}$  含量仅在 T4 与 T1 处理间差异显著,  $SO_4^{2-}$  含量表现为 T1 处理显著高于其他处理, 而其他处理间差异不显著。

此外, 与裸地灌溉(CK1 和 CK3)相比, 作物灌溉后土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  含量显著降低( $P < 0.05$ ), 降幅分别为 56.2%~67.3%, 27.9%~43.7%, 土壤  $SO_4^{2-}$  含量在清水灌溉作物(CK2)后略有升高, 而微咸水—再生水 1:1 混合灌溉作物(T3)后则有所下降, 但差异均不显著; 裸地

此外, 与裸地灌溉(CK1 和 CK3)相比, 种植作物灌溉后土壤含水率显著降低, 降幅为 37.2%~47.1%; 裸地灌溉处理间土壤含水率差异不显著( $P > 0.05$ )。

对于土壤含盐量而言, 上海青收获后不同比例微咸水与再生水混合灌溉处理土壤  $EC_{1:5}$  均显著高于 CK2, 且处理间差异显著( $P < 0.05$ )。与裸地灌溉相比, 不论是清水灌溉(CK2)还是 5 g/L 微咸水—再生水 1:1 混合灌溉(T3), 种植作物后土壤  $EC_{1:5}$  均有所下降, 降幅在 7.4%~25.0%, 但差异不显著。可见, 随着微咸水与再生水混合液中微咸水比重的提升, 土壤盐分越高, 这主要是由于灌溉水中的盐分含量决定的; 此外, 作物对灌溉水中的盐离子具有一定的吸收作用。

## 2.2 微咸水与再生水混灌对土壤水溶性离子的影响

土壤水溶性盐是盐碱土的一个重要属性, 是限制作物生长的制约因素。不同微咸水与再生水混灌处理后土壤水溶性离子含量的变化情况见表 4。

表 4 上海青收获后不同处理下土壤水溶性离子含量 单位: mg/kg

处理	$Na^+$	$K^+$	$Ca^{2+}$	$Mg^{2+}$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	$SO_4^{2-}$
CK1	101.00±18.76e	28.50±4.27a	267.33±84.20a	60.59±13.16a	32.05±14.59e	27.45±1.61c	18.72±7.90c
CK2	120.83±39.95e	9.33±0.29b	192.67±23.01bc	63.85±8.57a	32.05±10.64e	32.03±4.49bc	29.60±9.36bc
CK3	991.67±118.15b	24.00±6.56a	276.00±34.00a	20.33±5.50c	133.53±9.32b	29.69±1.68bc	37.44±5.28b
T1	316.67±14.43d	11.67±1.04b	216.67±16.17ab	37.82±10.64b	57.75±4.44d	28.98±1.83bc	55.36±10.34a
T2	783.33±80.36c	11.00±0.50b	184.00±13.11bc	13.42±5.59c	109.30±8.23c	33.86±1.86b	36.96±10.53b
T3	1008.33±123.32b	10.50±1.32b	155.33±15.01bc	24.40±15.58b	131.90±11.42b	38.94±3.56ab	28.80±4.18bc
T4	1450.00±86.60a	10.50±1.32b	130.00±9.17c	21.96±3.66bc	185.37±8.80a	42.80±4.32a	24.64±6.74bc

灌溉处理间土壤  $K^+$ 、 $Ca^{2+}$  含量差异不显著。

对于土壤  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  含量而言, 较 CK2 相比 T1 处理土壤  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  含量均有所降低, 降幅分别为 40.77%, 9.52%, 前者处理间差异显著( $P < 0.05$ ), 后者处理间差异不显著。与 T1 相比, 随着混合溶液中微咸水比重的升高, 土壤  $Mg^{2+}$  含量无明显变化规律,  $HCO_3^-$  含量逐渐升高。此外, 与裸地灌溉(CK1 和 CK3)相比, 种植作物灌溉后土壤  $Mg^{2+}$ 、 $HCO_3^-$  含量呈升高趋势, 其中微咸水—再生水 1:1 灌溉(T3)后  $Mg^{2+}$  含量显著提高。

## 2.3 微咸水与再生水混灌对土壤有机质的影响

土壤有机质是土壤固相部分的重要组成部分, 是土壤肥力的重要指标之一, 是保障植物正常生长的基本条件, 也是增产增收的一种重要措施。不同微咸水与再生水混灌处理后土壤有机质含量的变化情况见图 1。

由图 1 可知, 作物收获后, 与 CK2 相比, T1 处理土壤有机质含量略有升高, 但差异不显著; 与 T1 相比, 随着灌溉水中微咸水比重的提升, 土壤有机质含量呈升高趋势, 升幅为 0.91%~13.36%。与裸地灌溉(CK1 与 CK3), 种植作物灌溉后土壤有机质含量

略有升高,升幅为 2.80%~3.23%,但差异不显著。裸地灌溉处理间土壤有机质含量差异显著,但是微咸

水—再生水 1:1 混合灌溉(CK3)后土壤有机质含量较清水灌溉(CK1)提高了 15.89%。

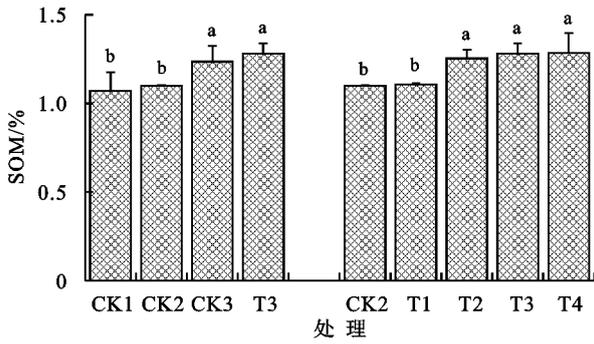


图 1 微咸水与再生水混灌后土壤 SOM 和 WDPT 变化规律

2.4 微咸水与再生水混灌对土壤 WDPT 的影响

土壤斥水性是指水分不能或很难湿润土壤颗粒表面的物理现象。土壤斥水性会导致土壤水分分布不均,引起土壤表层干燥易形成水土流失,加强降雨或灌水后地表径流和土壤侵蚀,进而不利于作物的生长发育<sup>[16]</sup>。土壤斥水性的强弱一般用 WDPT 表征,当 WDPT>5 s 时,认为土壤存在斥水性。不同微咸水与再生水混灌处理后土壤 WDPT 的变化情况见图 1。与 CK2 相比,T1 处理土壤 WDPT 降低了 6.29%,差

异不显著。与 T1 处理相比,随着灌溉水中微咸水比重的提升,土壤 WDPT 除了 T2 略有降低外总体上呈上升趋势,但处理间差异不显著。与裸地灌溉(CK1 与 CK3),作物灌溉后土壤 WDPT 略有升高,升幅为 13.63%~21.58%,但差异不显著;裸地灌溉处理间土壤 WDPT 差异不显著。

2.5 微咸水与再生水混灌对土壤酶活性的影响

不同微咸水与再生水混灌处理后土壤碱性磷酸酶、多酚氧化酶、蔗糖酶、脲酶活性的变化情况见图 2。

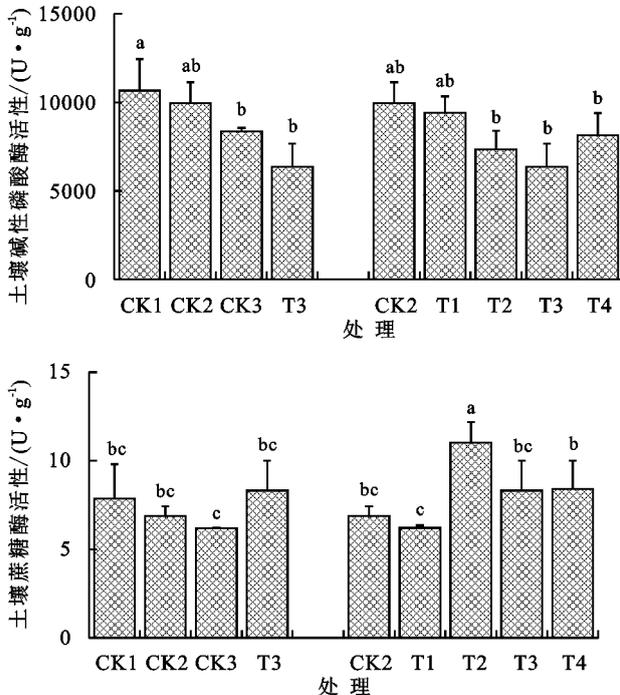


图 2 微咸水与再生水混灌后土壤酶活性变化规律

由图 2 可知,与 CK2 相比,T1 处理土壤碱性磷酸酶和蔗糖酶活性略有降低,降幅分别为 5.56% 和 9.74%,而土壤多酚氧化酶和脲酶活性则有所提高,增幅分别为 7.26% 和 21.71%,但差异均不显著。相较于 T1,土壤碱性磷酸酶活性随着混合液中微咸水比重的提升而先降低后升高且处理间均差异不显著,土壤多酚氧化酶则在 T2、T4 处理均有不同程度的提升,分别提高了 5.64% 和 20.48%,土壤蔗糖酶活性在

T2 处理显著提高,增幅为 79.23%,土壤脲酶活性在 T3 处理最高,提高了 5.70%,但差异不显著。

与裸地灌溉(CK1 和 CK3)相比,灌溉作物后 CK2 和 T3 处理土壤碱性磷酸酶活性均有所降低,降幅为 6.61%~23.92%,土壤多酚氧化酶、脲酶活性分别升高 2.77%~19.36%,4.88%~17.61%,土壤蔗糖酶活性变化略有不同,CK2 土壤蔗糖酶活性较 CK1 略有降低,而 T3 则较 CK3 略有升高,但差异均不显著;此外,裸

地灌溉处理间,与 CK1 相比,CK3 土壤碱性磷酸酶活性显著降低了 21.65%,土壤蔗糖酶活性略有降低,土壤多酚氧化酶、脲酶活性略有升高。

## 2.6 基于 IBRv2 的微咸水与再生水混灌效应评价

IBRv2 最初应用于环境污染对生物体的毒害评价,后来逐渐应用于阐释灌溉对酶活性的影响。兹利用 IBRv2 评价微咸水与再生水混灌对土壤质量的效应评价。基于前文,去除处理间差异相对不显著的指标,筛选出 12 种(含水率、电导率、有机质、蔗糖酶活性、多酚氧化酶活性、碱性磷酸酶活性、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )对微咸水—再生水灌溉处理影响相对明显的土壤指标,以 CK2 的指标测定值作为对照参考,计算不同处理 IBRv2 的变化见图 3。

由图 3 可知,T1 处理 IBRv2 为 10.86;微咸水与再生水混合灌溉对有利于降低 IBRv2 值,即降低偏差,并于微咸水与再生水 1:2 混合灌溉时降至最低,值为 6.89。说明相对单独微咸水或再生水灌溉,微咸水与再生水混合灌溉处理土壤质量效果最佳,且微咸水与再生水混合比例以 1:2 为宜。

## 3 讨论

### 3.1 微咸水与再生水混灌对土壤水盐及水溶性离子的影响

本试验结果表明,在微咸水与再生水混合溶液中随着微咸水比重的提升,土壤含水率和土壤含盐量也均呈逐渐升高趋势。而已有研究<sup>[17]</sup>表明,在同一土层深度下,土壤含水率和电导率随着微咸水矿化度升高而升高,这与本文研究结果是一致的。这是因为再生水中盐分较清水的高,而在微咸水与再生水混合液中随着微咸水比重的提高,盐分含量也越高,灌溉后土壤含盐量较高,土壤盐分在一定程度上会抑制作物对水分的吸收,因此,在灌水量一致的情况下随着矿化度的升高,由于作物对水分吸收的减少,土壤含水率也就越高。

土壤电导率可以反映土壤混合盐的含量,EC 越高,即土壤所含可溶性离子浓度越高,总盐量越大。不同的土壤盐分条件会影响盐分离子的数量。本试验研究表明,作物收获后,再生水—微咸水混合灌溉处理中随着混合液中微咸水比重的提升,土壤  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量呈降低的趋势,是因为再生水中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  含量相对较高而微咸水中含量较低;此外,较裸地灌溉相比,作物灌溉后土壤  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  含量显著降低,这是由于作物对  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  吸收引起的;土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  变化具有相同的变化趋势,但作物清水灌溉后土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  含量较裸地的高,这可能是由于根际与非根际土壤  $\text{SO}_4^{2-}$  分布的不均匀性导致的。

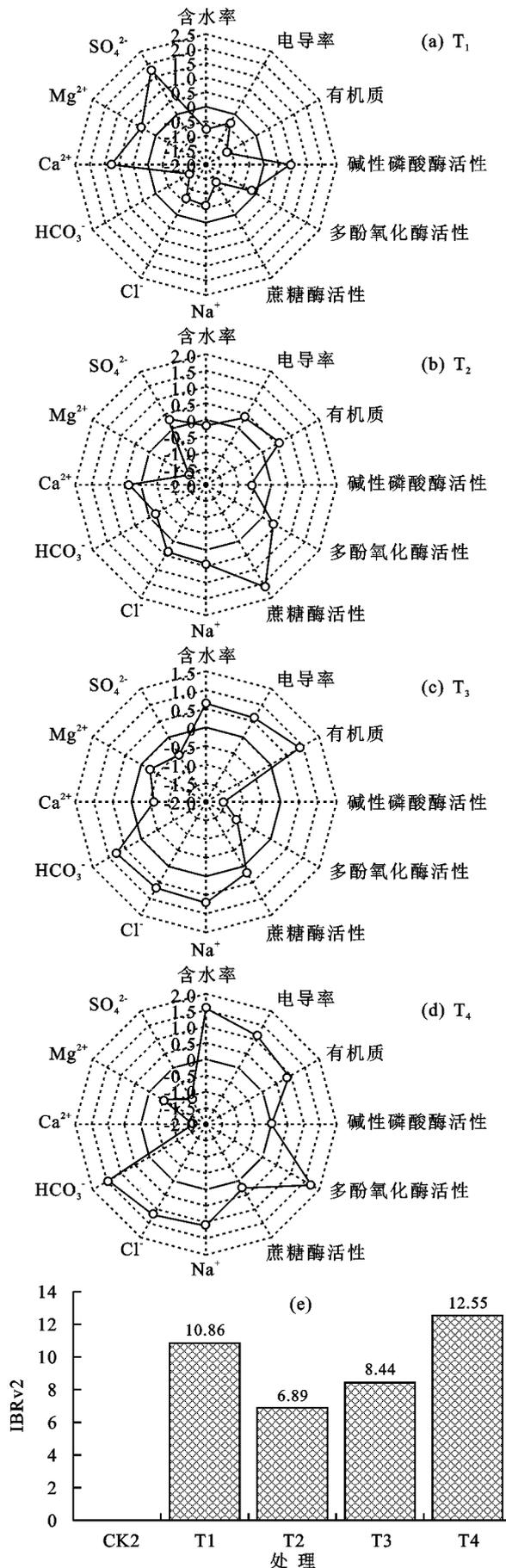


图 3 不同处理 IBRv2 变化及其雷达图

试验结果还表明,较清水灌溉相比,微咸水—再

生水混合灌溉后土壤  $\text{Na}^+$  含量显著升高,且混合液中随着微咸水比重的提升而显著升高,因为作物对  $\text{Na}^+$  的吸收较少,土壤  $\text{Na}^+$  含量的变化主要与灌溉水源  $\text{Na}^+$  含量有关;土壤  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  有相似的变化规律,但不同的是与裸地灌溉相比,作物灌溉后土壤  $\text{HCO}_3^-$  有所提高、 $\text{Cl}^-$  显著提高,这可能是根系吸水作用引起的, $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  随水分运移到根系周围,水分被根系吸收,而根系对  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$  的吸收较少进而在根系周围土壤中聚集。此外,根据本试验是否种植作物对比试验结果,灌溉水源带入的  $\text{Mg}^{2+}$  含量是一定的,种植作物后土壤中镁离子含量高于裸土,究其原因在于离子由于根系吸收而聚集在根系周围,导致根系周围  $\text{Mg}^{2+}$  含量较高。

### 3.2 微咸水与再生水混灌对土壤有机质和 WDPT 的影响

土壤有机质是土壤肥力的重要指标之一。本试验结果表明,再生水灌溉土壤有机质含量略有提高但差异不显著。陈黛慈等<sup>[18]</sup>研究表明,再生水灌溉后土壤有机质含量提高但不显著,这与本试验结果是吻合的。韩洋等<sup>[19]</sup>研究表明,再生水灌溉土壤有机质含量较清水灌溉显著提高,因为裸地灌溉没有考虑作物对碳氮磷等营养物质的消耗,这在本试验中裸地灌溉间也能进一步验证,即微咸水与再生水 1:1 灌溉土壤有机质也是显著高于清水灌溉的。本试验结果还发现,微咸水与再生水的混合灌溉土壤有机质含量较单纯再生水灌溉的高,可能是由于含盐量高,削弱了作物对养分及有机质的消耗,进而使得作物收获后土壤有机质偏高。而长期微咸水灌溉下畦灌后土壤有机质含量在试验结束时较初期无显著变化。说明微咸水与再生水混合短期灌溉可能对土壤有机质具有一定的改善,但长期灌溉是否依然保留这种作用尚不明确。

随着混合液中微咸水比重的提升土壤 WDPT 呈升高的趋势,说明微咸水利用对土壤斥水性的影响是正效应。这与已有研究<sup>[7]</sup>发现,微咸水入渗后土壤大部分剖面都有了微弱的斥水性,尤以盐碱土更为严重的结果是吻合的,原因在于微咸水中  $\text{Na}^+$  含量较高,会阻碍土壤胶体的离子交换吸附反应,引起土壤黏粒膨胀和团聚体分离,是土壤通透性变差,从而可能增强土壤斥水性。本试验结果表明,再生水灌溉后土壤 WDPT 较清水灌溉略有降低。而商艳玲等<sup>[20]</sup>认为,再生水灌溉可能会引起土壤斥水性,这与文中试验结果略有不同,原因主要有 3 个方面:(1)再生水水质成分的区域以及土壤类型的差异;(2)土壤含水率是土壤斥水性的一个影响因素,商艳玲等<sup>[20]</sup>研究基于室内土柱试验对比入渗后土壤与装土前风干土的

WDPT,然而在本试验中是对比再生水和清水灌溉后土壤风干后 WDPT 的变化;(3)再生水中的有机成分不同,且并不是所有的有机成分都是斥水的<sup>[21]</sup>,这导致了有机质含量与斥水性的复杂关系。此外,本试验结果表明,裸地灌溉后土壤 WDPT 较种植作物灌溉后的低,这可能与作物根系分泌物中的某些有机物质有关,且裸地灌溉与作物灌溉土壤 WDPT 的变化与土壤有机质的变化正相关,这与任长江等<sup>[22]</sup>研究发现,WDPT 与土壤有机质含量呈正相关性的结论一致;但在不同处理灌溉作物后土壤 WDPT 与有机质含量并没有呈现出完全正相关的关系,其中,纯再生水灌溉和微咸水—再生水 1:2 混合灌溉处理土壤 WDPT 低而有机质含量相对较高,这与复杂的水质情况密切相关以及并不是所有的有机质成分都是斥水性的。本试验结果也发现,与纯再生水灌溉相比,微咸水—再生水 1:2 混合灌溉后土壤 WDPT 降低,微咸水—再生水 1:1 混合灌溉后土壤 WDPT 则升高。说明微咸水—再生水 1:2 混合灌溉对土壤 WDPT 最有利。在其他学者关于微咸水与再生水混合灌溉相关研究尚未见报道,本试验进行了一定的探讨,其相关理论机制等还需进一步试验探讨。

### 3.3 微咸水与再生水混灌对土壤酶活性的影响

本试验结果表明,再生水灌溉对土壤酶活性(碱性磷酸酶、蔗糖酶、脲酶和多酚氧化酶)影响不显著,这是因为这些酶活性主要受碳氮磷肥的影响。这与已有研究结果是一致的,如 Ndour 等<sup>[23]</sup>认为,再生水灌溉对酶活性无显著影响;潘能等<sup>[24]</sup>研究表明,农田再生水灌溉后土壤脲酶、碱性磷酸酶、蔗糖酶活性均有一定的提升,但差异不显著;而张彦等<sup>[25]</sup>发现,土壤酶活性受土壤养分和重金属污染等因素的综合影响;郭晓明等<sup>[26]</sup>认为,再生水灌溉时间的长短对土壤酶活性有着不同的影响。此外,本试验结果还发现,微咸水与再生水不同比例混合灌溉对土壤酶活性有一定的影响,其中微咸水—再生水 1:2 混合灌溉后对多酚氧化酶和蔗糖酶具有一定的提升作用,但对碱性磷酸酶和脲酶活性却有一定的削弱作用,微咸水—再生水 1:1 混合灌溉对脲酶和蔗糖酶活性有一定的提升作用,而对多酚氧化酶和碱性磷酸酶具有一定的削弱作用。不同土壤酶活性受到影响程度之所以不同,是因为不同的土壤酶的来源和耐盐能力均有所差异。由试验结果可以说明,微咸水与再生水可能具有一个最佳混合比例适宜土壤酶活性,由于微咸水与再生水混合灌溉研究也是初步进行,至于具体比例是多少以及微咸水与再生水混合灌溉对土壤酶活性的调控机制有待进一步探讨。

## 4 结论

随着微咸水与再生水混合液中微咸水比重的提升,土壤含水率和含盐量越高,但对土壤酶活性的影响有所差异。综合考虑土壤环境质量指标,基于第二代生物综合响应指数法,在淡水资源不足地区利用微咸水灌溉时,可以考虑用再生水替代清水与微咸水配合使用,微咸水—再生水混灌比例以1:2为宜。

此外,本试验仅考虑了5 g/L微咸水与再生水混合灌溉处理,尚未考虑不同矿化度微咸水与再生水的混合灌溉处理。其次,咸淡轮灌是目前较为适宜的微咸水利用方式,不同矿化度的微咸水与再生水轮灌处理也有待下一步试验研究。再者,试验采用的是盆栽试验,由于盆的高度有限,无法体现土壤盐分的剖面分布,无法进行长期试验研究,后期有待进行田间试验研究。

### 参考文献:

- [1] Yuan C F, Feng S Y, Huo Z L, et al. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212:424-432.
- [2] Loy S, Assi A T, Mohtar R H, et al. The effect of municipal treated wastewater on the water holding properties of a clayey, calcareous soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643:807-818.
- [3] Bustan A, Cohen S, Malach Y D, et al. Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(2):123-134.
- [4] Liu B X, Wang S Q, Kong X L, et al. Modeling and assessing feasibility of long-term brackish water irrigation in vertically homogeneous and heterogeneous cultivated lowland in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211:98-110.
- [5] Tahtouh J, Mohtar R, Assi A, et al. Impact of brackish groundwater and treated wastewater on soil chemical and mineralogical properties[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647:99-109.
- [6] 冯棣,张俊鹏,孙池涛,等.长期咸水灌溉对土壤理化性质和土壤酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3):171-176.
- [7] 刘春成,李毅,郭丽俊,等.微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8):39-45.
- [8] Álvarez-García M, Urrestarazu M, Guil-Guerrero J L, et al. Effect of fertigation using fish production wastewater on *Pelargonium x zonale* growth and nutrient content[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223:e105726.
- [9] Perulli G D, Bresilla K, Manfrini L, et al. Beneficial effect of secondary treated wastewater irrigation on nectarine tree physiology[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221:120-130.
- [10] Pedrero F, Camposo S, Pace B, et al. Use of reclaimed wastewater on fruit quality of nectarine in Southern Italy[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 203:186-192.
- [11] Chi Y B, Yang P L, Ren S M, et al. Effects of fertilizer types and water quality on carbon dioxide emissions from soil in wheat-maize rotations[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698:e134010.
- [12] 郑顺安,陈春,郑向群,等.再生水灌溉对土壤团聚体中有机碳、氮和磷的形态及分布的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(11):2053-2059.
- [13] 胡廷飞,王辉,胡传旺,等.灌溉水质和灌水方式对红壤斥水性及其理化性质的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(8):651-655,661.
- [14] 中华人民共和国生态环境部.GB 5084—2021,农田灌溉水质标准[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [16] Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands[J]. *Catena*, 1990, 18:173-183.
- [17] 杨培岭,王瑜,任树梅,等.咸淡水交替灌溉下土壤水盐分布与玉米吸水规律研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6):273-281.
- [18] 陈黛慈,王继华,关键飞,等.再生水灌溉对土壤理化性质和可培养微生物群落的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5):1304-1311.
- [19] 韩洋,齐学斌,李平,等.再生水和清水不同灌水水平对土壤理化性质及病原菌分布的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(8):32-38.
- [20] 商艳玲,李毅,朱德兰.再生水灌溉对土壤斥水性的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21):89-97.
- [21] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Soil water repellency: Its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance [J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 51(1):33-65.
- [22] 任长江,赵勇,龚家国,等.妫水流域土壤斥水性分布与影响因素研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(10):237-244.
- [23] Ndour N Y B, Baudoin E, Guissé A, et al. Impact of irrigation water quality on soil nitrifying and total bacterial communities[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 44(5):797-803.
- [24] 潘能,侯振安,陈卫平,等.绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(12):4081-4087.
- [25] 张彦,张惠文,苏振成,等.污水灌溉对土壤重金属含量、酶活性和微生物类群分布的影响[J]. *安全与环境学报*, 2006, 6(6):44-50.
- [26] 郭晓明,马腾,崔亚辉,等.污灌时间对土壤肥力及土壤酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(4):750-756.