

文章编号: 2097-096X(2024)-06-0570-09

## 再生水灌溉双酚 A 和壬基酚在玉米中的分布、转运及影响

胡雅琪<sup>1</sup>, 姜婷婷<sup>1,2</sup>, 马蒙<sup>1</sup>, 吴文勇<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048; 2. 石河子大学 水利建筑工程学院, 石河子 832000)

**摘要:** 再生水灌溉是缓解农业水资源短缺的重要措施, 然而再生水中内分泌干扰物的健康风险尚不清晰。本研究采用盆栽试验, 研究了双酚 A 和壬基酚在土壤-玉米系统中的累积和转运规律, 评价了双酚 A 和壬基酚对玉米的根系性状和玉米产量的影响。结果表明: (1) 土壤和玉米植株中双酚 A 和壬基酚的含量随着初始浓度的增加而增加。玉米根系中双酚 A 和壬基酚含量高于茎和叶, 根系中双酚 A 和壬基酚分别为 0.05~0.16 mg/kg 和 0.33~1.13 mg/kg。(2) 较高浓度处理对玉米根系和产量指标有明显的抑制作用, 分别对根长、根体积、根表面积、穗粗、穗长和百粒重存在抑制作用。(3) 双酚 A 和壬基酚在玉米各组织中转运能力较弱, 双酚 A 和壬基酚的转运系数大多都小于 1。

**关键词:** 再生水; 玉米; 壬基酚; 双酚 A; 迁移

**中图分类号:** X503

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.20240177

### 1 研究背景

目前, 全球面临水资源短缺和水质恶化的问题, 水资源压力日益严重<sup>[1-3]</sup>, 而再生水可以作为替代水源来缓解水资源短缺<sup>[4]</sup>。再生水的使用领域包含农业、林业、渔业和环境用水等, 其中农田灌溉应用最为广泛<sup>[5]</sup>。再生水中含有氮、磷、钾等养分, 可减少化肥的使用, 改善土壤质量<sup>[5]</sup>。同时, 再生水中也存在不同种类的污染物, 如重金属、病原微生物、药物、个人护理产品和内分泌干扰物等<sup>[6-7]</sup>。微污染物通常以痕量浓度存在于水中, 其含量从 ng/L 到  $\mu\text{g/L}$ <sup>[8]</sup>。它们在环境中的普遍存在及可能引起的不良生态效应日益受到关注<sup>[9]</sup>。

内分泌干扰物在自然环境中普遍存在, 它们存在于食品和饮料的包装材料、个人护理医药产品、杀虫剂、杀真菌剂、塑料和表面活性剂等各种产品中<sup>[10]</sup>。其中双酚 A (BPA) 和壬基酚 (NP) 是两种典型的内分泌干扰物, 国内外已有大量学者对水环境、污泥和水生生物中 BPA 和 NP 的分布和影响进行了研究<sup>[11-14]</sup>。BPA 和 NP 在水环境中检出率较高<sup>[15-16]</sup>。Ryu 等<sup>[14]</sup>在韩国污水处理厂进出水中检测到 NP 浓度分别为低于检测限 (nd)~42.55  $\mu\text{g/L}$  和 nd~9.55  $\mu\text{g/L}$ ; Guo 等<sup>[13]</sup>在中国污水处理厂进出水中检测到 BPA 浓度分别为 20.9 ng/L 和 905.2 ng/L。BPA 和 NP 在水中雌激素活性和生态风险均较高<sup>[17-18]</sup>, 对水环境中的生物存在潜在风险。研究表明, 内分泌干扰物雌激素会引起内分泌紊乱, 导致雄性鱼类双性性腺的发育、甲状腺破坏和体型减小及繁殖成功率降低等<sup>[15,19]</sup>。

目前也有部分学者对不同水质灌溉、淤泥施用和种植条件下土壤和植株 BPA 和 NP 残留量进行了调查研究。土壤是 BPA 和 NP 赋存的重要介质之一。Li 等<sup>[20]</sup>检测到灌区表层土壤 BPA 和 NP 的浓度为 0.04~0.21 mg/kg, 其中 NP 含量总体上高于普通农田土壤 NP 含量, 低于施用污泥的土壤 NP 含量, 表明污泥施用是农业土壤中 NP 的一个主要污染来源。BPA 和 NP 通过再生水农田灌溉进入土壤后, 主要包括迁移和降解两个过程。马馨怡等<sup>[21]</sup>研究发现不同水分状况下土壤活性微生物数量、多样性和

收稿日期: 2024-09-07; 网络首发时间: 2024-11-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/10.1788.TV.20241111.1609.001>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52079146)

作者简介: 胡雅琪 (1990-), 博士, 高级工程师, 研究方向为节水灌溉。E-mail: huyq2011@126.com

通信作者: 吴文勇 (1977-), 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为节水灌溉理论与装备研发应用。E-mail: wenyongwu@126.com

群落结构发生明显分异, 土壤水分增加显著增加了微生物数量, 但降低了活性微生物多样性。研究表明, 微生物对不同 NP 同分异构体的降解能力不同, 微生物对 NP119 和 NP128 的降解能力则可高达 99.7%, 但对 NP<sub>193a</sub> 降解率仅有 30.5%<sup>[22]</sup>。土壤残留的 BPA 和 NP 能向植株迁移并产生积累, 进而威胁人类健康。Li 等<sup>[20]</sup> 在冬小麦、玉米和果蔬的果实中检测到酚类物质存在, 总含量为 0.09~0.25 mg/kg。Lu 等<sup>[23]</sup> 通过水培实验在番茄和莴苣的不同组织中检测到 BPA 和 NP, 番茄在根部暴露途径下的 BPA 和 NP 含量高于叶片暴露途径, 而莴苣叶片暴露途径下的 BPA 含量高于叶片暴露途径。研究表明, NP 会影响绿豆气孔开度和叶绿素含量与水稻生长和根系发育, 在 2000 mg/kg 剂量下, 观察到水稻根系的长度、表面积和直径受到显著抑制, 绿豆根系总长度和表面积呈减小趋势<sup>[24]</sup>。许多内分泌干扰物具有亲脂性, 它们可以长时间储存在人类和动物的体内脂肪组织中<sup>[25]</sup>。因此, 研究 BPA 和 NP 在植物中的分布和累积, 对动物和人类的健康以及环境中新污染物控制至关重要。

目前较多研究关注单一土壤介质或水溶液中 NP 和 BPA 的分布, 而关于 NP 和 BPA 在土壤-植株系统中 BPA 和 NP 的研究较少。水培条件与植株实际生长环境存在一定差异, 土壤和植株之间复杂的相互作用会影响植株对有机化合物的吸收。因此, 研究 BPA 和 NP 在土壤-玉米系统中迁移累积具有一定意义。玉米作为主要粮食作物之一, 在世界各地广泛种植<sup>[26-27]</sup>。采用玉米作为试验作物, 选取 BPA 和 NP 为目标污染物, 研究再生水灌溉下(1)土壤水分和灌溉年限对土壤不同深度和玉米不同组织中 BPA 和 NP 累积的交互影响;(2)不同土壤水分和灌溉年限下对玉米不同组织中 BPA 和 NP 的转运系数的影响;(3)不同土壤水分和灌溉年限下 BPA 和 NP 对玉米作物的根系特征和产量指标的影响。

## 2 试验与方法

**2.1 研究区域与试验设计** 本研究于 2023 年在北京国家节水灌溉工程技术研究中心庞各庄试验站(北纬 39°35', 东经 116°20') 进行, 海拔 30 m。试验区域为暖温带半湿润大陆性季风气候, 夏天炎热多雨, 冬天寒冷干燥, 年平均温度 12.7 °C。年降水量 727 mm, 降水量年际变化较大, 6—9 月降水量占全年的 89.0%。该区域主要土壤类型包括粉质壤土和砂壤土。

本试验采用盆栽的高度、长度和宽度分别为 50 cm(有效高度为 45 cm)、30 cm 和 30 cm。将一定浓度的 BPA 和 NP 甲醇溶剂均匀喷洒在试验土壤, 充分混匀后待试剂挥发。按耕作层干容重(1.4 g/cm<sup>3</sup>) 进行回填, 每次回填土壤 5 cm 后, 进行压实和刮毛处理, 每个桶中土壤的干重为 56.7 kg。使盆栽里的土壤与地面齐平, 以确保有同样的生长条件。播种 5 g 玉米种子(农糯科 336), 播种深度 4~5 cm。

土壤中添加不同含量的 BPA 和 NP, 模拟再生水灌溉的不同年限。分别设 5 个浓度处理(T1—T5), 每个浓度处理设 60%、70% 和 80% 土壤水分下限, 分别用 A、B 和 C 代表, 设 3 个对照处理(CK<sub>A</sub>、CK<sub>B</sub> 和 CK<sub>C</sub>), 每个处理设 3 个重复。试验土壤 BPA 和 NP 背景值分别为 8.4 μg/kg 和 86.2 μg/kg。根据目前检测到再生水中 NP 和 BPA 的最高浓度分别为(2 μg/L 和 15 μg/L)<sup>[28-29]</sup>。5 个处理组的 BPA 和 NP 浓度分别为设计模拟再生水灌溉的 10、50、100、500 和 1000 年, 5 个处理的 BPA 浓度分别为 0.021、0.107、0.214、1.071 和 2.143 mg/kg。5 个处理的 NP 浓度分别为 0.161、0.804、1.607、8.036 和 16.071 mg/kg。忽略土壤中 BPA 和 NP 的衰减。

### 2.2 样品采集与测定方法

**2.2.1 土壤中 BPA 和 NP 测定** 将试验后玉米收获后, 分别从 5 cm、10 cm 和 15 cm 的不同深度收集土壤。将土壤冷冻干燥, 随后进行 0.9 mm 筛分。在分析前, 将土壤样品在 -20 °C 储存。取 10 g 土壤样品, 加入一定量的替代物(4-n-NP, 25 mg/L), 搅拌后密闭过夜, 用滤纸包好后放入索氏提取器, 用甲烷和二氯甲烷(体积比 9:1) 混合液 220 mL 作为提取液。样品提取 12 h 后, 用无水硫酸钠对提取液进行过滤脱水。使用旋转蒸发仪(50 °C) 和氮气仪(50 °C) 浓缩至 1 mL, 经 2 μm 有机滤膜后, 转移至 1.5 mL 棕色样品瓶, 上机测试或放入 -20 °C 冰箱保存待测。

使用气相色谱-质谱联用仪(GC 7890B-MS 5977B) 进行样品分析。DB-5MS UI 毛细管色谱柱(30 m×0.25 μm×0.25 mm) 为安捷伦公司生产, 进样口温度和检测器温度分别设置为 250 °C 和 280 °C, 采用氮

为载气，流速 1 mL/min，不分流进样。离子源为电子轰击源；离子源温度 230 ℃；四级杆温度 150 ℃；电子能量 70 eV；电子倍增器电压 1278 V；扫描范围 50~300 amu；扫面方式采用全扫描(San)和选择性离子扫面(SIM)两种模式。利用特征峰保留时间和特征离子进行定性分析，利用基峰面积对样品进行定量分析。

2.2.2 玉米植株中 BPA 和 NP 测定 玉米成熟后，分别收集玉米根、茎、叶和籽粒，用去离子水清洗植物组织根后自然风干。将玉米的所有根、茎、叶和果实称重并粉碎后进行 0.25 mm 筛分。分析前将植物样品全部在-20 ℃下保存。取 2 g 根、2 g 茎、2 g 叶和 5 g 果实，分别加入一定量的替代物(4-n-NP, 25 mg/L)，搅拌后密闭过夜，用滤纸包好后放入索氏提取器，用 220 mL 正己烷作为提取液。样品提取 12 h 后，用无水硫酸钠对提取液进行过滤脱水。使用旋转蒸发仪(50 ℃)和氮气仪(50 ℃)浓缩至 1 ml，经 2 μm 有机滤膜后，转移至 1.5 ml 棕色样品瓶，上机测试或放入-20 ℃冰箱保存待测。玉米样品使用气相色谱-质谱联用仪(GC 7890B-MS 5977B)进行样品分析步骤与土壤样品分析步骤一致。

2.2.3 玉米根系特征测定 玉米成熟后，收集玉米根系样品，将采集的根系采用离子水清洗后，通过扫描仪扫描玉米根系样品，使用 Win RHIZO 根系分析软件分析玉米根系样品，获得根长、根体积、根表面积和平均直径等相关指标分析。

2.2.4 玉米产量指标测定 玉米成熟后，收集玉米的果实样品，测试穗粗、穗长和秃尖长，用精度 0.01 g 电子天平称取玉米果实百粒重。采用 SPSS 统计软件分析对照组和处理组的根系特征和玉米产量因素的差异性。

## 2.3 数据分析

2.3.1 样品 BPA 和 NP 的浓度 样品中 BPA 和 NP 的浓度计算公式如下：

$$C_i = \frac{A_i}{A_{sub}} \times C_{sub} \times \alpha \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{A_{sub'}}{A_i'} \quad (2)$$

式中， $C_i$  为样品中目标物的浓度，mg/kg； $A_i$  为样品中目标物的峰面积； $A_{sub}$  为样品中替代物的峰面积； $C_{sub}$  为样品中替代物的浓度，mg/kg； $\alpha$  为校正系数； $A_{sub'}$  为单位质量替代物的峰面积； $A_i'$  为单位质量目标物的峰面积， $A_{sub'}$  和  $A_i'$  由目标物和替代物的混合标液测得。

2.3.2 土壤 BPA/NP 加权平均浓度 土壤 BPA/NP 加权平均浓度计算公式如下：

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n C_{si} \rho_i \Delta H_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i \Delta H_i} \quad (3)$$

式中： $C_{si}$  为第  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 层土壤的 BPA/NP 浓度，mg/kg； $\rho_i$  为第  $i$  层土壤的容重，g/cm<sup>3</sup>； $\Delta H_i$  为第  $i$  层土壤的厚度，cm； $C_s$  为土壤 BPA/NP 加权平均浓度，mg/kg。

2.3.3 玉米 BPA/NP 加权平均浓度 玉米中 BPA/NP 加权平均浓度计算公式如下：

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^4 C_{pi} M_i}{\sum_{i=1}^4 M_i} \quad (4)$$

式中： $C_{pi}$  为玉米样组织  $i$  (根、茎、叶和果) 中的 BPA/NP 浓度，mg/kg； $M_i$  为玉米样组织  $i$  的干重，g； $C_p$  为玉米 BPA/NP 加权平均浓度，mg/kg。

2.3.4 转运系数 转运系数(TF)是植株地上部分组织中 BPA/NP 的含量与其在根部组织含量的比值，反映 BPA/NP 在植株不同组织间的迁移分配能力。玉米 BPA/NP 转运系数计算公式如下：

$$TF_i = \frac{C_{pi}}{C_{root}} \quad (5)$$

式中： $C_{pi}$ 为玉米样组织*i*(一般为茎、叶和果)中的BPA/NP浓度，mg/kg； $C_{root}$ 为玉米样根部组织BPA/NP的浓度，mg/kg； $TF_i$ 为玉米样组织*i*的转运系数，茎、叶和果的转运系数分别表示为 $TF_2$ 、 $TF_3$ 和 $TF_4$ 。

### 3 结果与分析

**3.1 土壤中BPA和NP的分布** 如图1所示，在不同浓度和水分处理下的表层土层深度中BPA和NP的浓度总范围分别为0.01~0.13 mg/kg和0.04~1.57 mg/kg。土壤中BPA和NP的含量随着处理浓度的增加而增加。与5 cm和15 cm土层的BPA和NP含量相比，10 cm土层的NP和BPA含量较高。这可能是由于内分泌干扰物的移动性较低，易于固定在表层土壤中<sup>[30]</sup>。对不同土层深度进行了差异性分析，在60%的水分处理下，T2、T3和T5处理组中不同深度土层中BPA浓度差异显著( $p<0.05$ )，对于70%和80%的水分处理条件下，分别除去T1和T4处理组不同深度土层中BPA浓度差异显著( $p<0.05$ )。在60%、70%、和80%的水分处理下，T3、T4和T5的浓度处理中不同深度土层中NP浓度差异极显著( $p<0.01$ )。土壤中NP和BPA的含量受土壤水分处理的影响较弱(图1)。

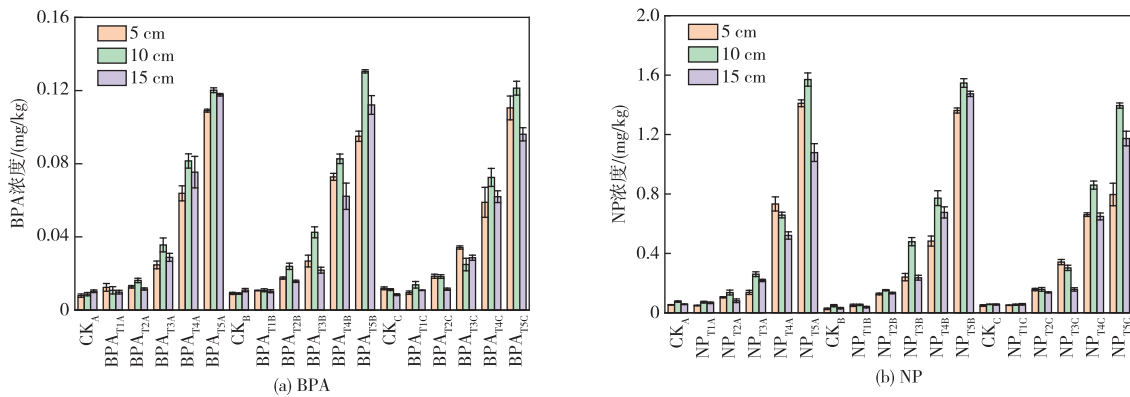


图1 不同土壤深度BPA和NP残留浓度

Fig.1 BPA and NP residue concentrations at different soil depths

**3.2 玉米各组织中BPA和NP的累积** 由图2所示，测定了对照组和处理组在不同玉米组织中NP的浓度值。对于CK<sub>A</sub>和T1—T5处理，根中BPA和NP的浓度高于茎和叶，茎中浓度高于叶片。有研究发现在水培体条件下，NP在羽衣甘蓝根部达到339.2 μg/kg，积累量远大于茎和叶<sup>[31]</sup>。由图2所示，除去T2<sub>B</sub>处理，其他处理组均表现为根中NP浓度最高，而在CK<sub>A</sub>、T1<sub>A</sub>、CK<sub>B</sub>和T1<sub>B</sub>中，存在叶中NP浓度高于茎，其他处理组叶中NP含量低，对于对照组和T1—T5处理组，根中BPA的浓度高于茎和叶，茎中浓度高于叶片，果实籽粒中未检测到BPA和NP存在。玉米根中BPA和NP含量随着土壤中添加NP初始浓度的增加而呈现增加趋势，并且初始浓度越高，根中BPA和NP的积累更加显著，茎中BPA和NP也呈现出随着初始增加量而增加趋势，叶片中没有检测到此类现象的发生。在80%FC处理下T1<sub>B</sub>、T3<sub>B</sub>和T4<sub>B</sub>处理的茎部和T3<sub>B</sub>—T5<sub>B</sub>处理根部的NP加权平均浓度最高，CK<sub>B</sub>、T1<sub>B</sub>—T5<sub>B</sub>处理的茎部和CK<sub>B</sub>和T5<sub>B</sub>处理根部BPA加权平均浓度最高(图2)。不同水分状况下会影响土壤微生物活性、多样性和群落结构<sup>[21]</sup>。Hueso等<sup>[32]</sup>研究发现，土壤含水率越高，土壤中氧气含量越低，含氧量低会影响土壤微生物的代谢和活性物质分泌，降低生物降解效果。

**3.3 玉米不同组织BPA和NP的转运** 如图3所示，玉米中BPA在茎-根、叶-根和植株平均的 $TF$ 范围分别为0.1457~0.727和0.4794~0.8776。玉米中NP在茎-根、叶-根和植株平均的 $TF$ 范围分别为0.28~0.83和0.48~1.03。除了T3<sub>B</sub>中叶-根BPA和NP的 $TF$ 大于1，其它处理中BPA和NP的 $TF$ 均小于1，表明BPA和NP在玉米中的转运能力较弱。在玉米BPA的转运中，可以看出三个水分处理下，叶-根的 $TF$ 随着BPA初始浓度的增加而逐渐降低，茎-根没有此类现象。茎-根BPA的 $TF$ 始终大于叶-根的 $TF$ ，表明BPA在茎中的转运能力大于叶片。在玉米NP的转运中，在60%FC下叶-根和

平均的 BPA 的  $TF$  和 70%FC 下茎-根、叶-根和平均的 BPA 的  $TF$  均表现出先较小后增大的变化趋势。除  $CK_A$ 、 $TI_A$ 、 $CK_B$  和  $TI_B$  处理外，茎-根 NP 的  $TF$  始终大于叶-根的  $TF$ 。

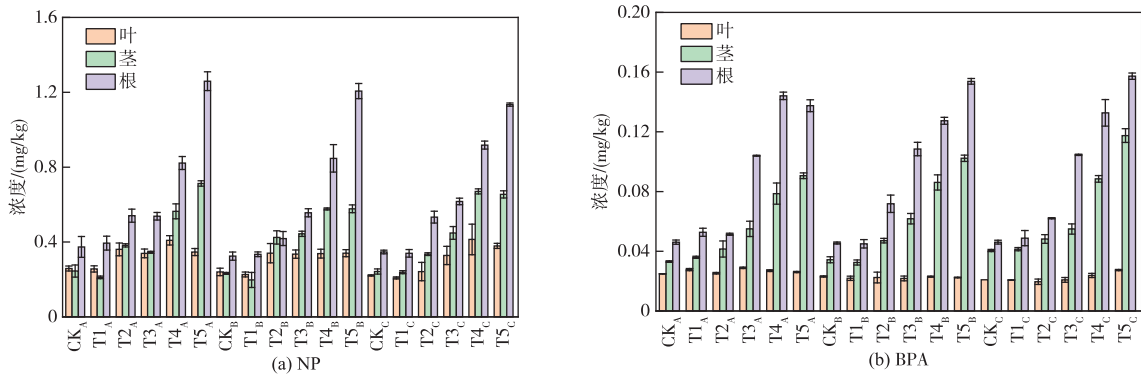


图 2 玉米各组织中 BPA 和 NP 的累积  
Fig.2 Accumulation of BPA and NP in various tissues of maize

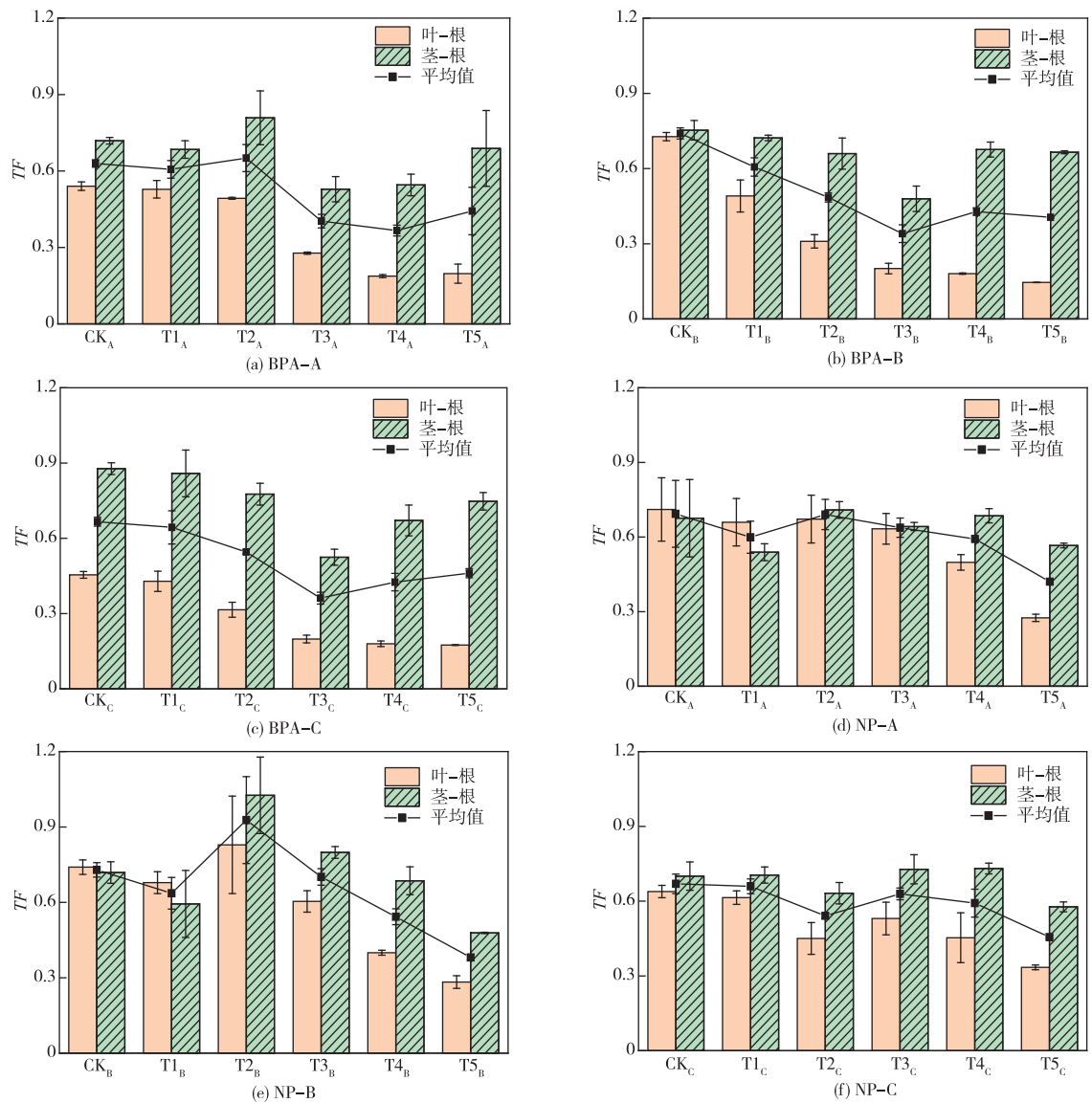


图 3 玉米各组织转化系数的变化  
Fig.3 Variation of transformation coefficients in various tissues of maize

**3.4 BPA 和 NP 对玉米根系特征的影响** 通过图 4 结果发现, BPA 和 NP 会抑制玉米根系生长。和 CK 结果相比, 分别平均降低了 6.79%、4.47%、8.92% 和 5.58%。其中 T1—T3 的根长、根体积、根表面积和平均直径存在高于 CK 的现象。然而, 在 T4 和 T5 高浓度处理下, 对根长、根体积、根表面积抑制较明显( $p < 0.05$ )。其中 T4 和 CK 相比根长、根体积和根表面积分别降低了 11.18%、6.41% 和 14.65%, T5 和 CK 相比根长、根体积和根表面积分别降低了 15.86%、10.23% 和 19.75%。Pan 等<sup>[33]</sup> 采用南芥为作物, 研究发现低剂量 BPA 可增加幼苗鲜重、主根长度和侧根, 而高剂量 BPA 对植株有抑制作用, 这与本研究结果相似。

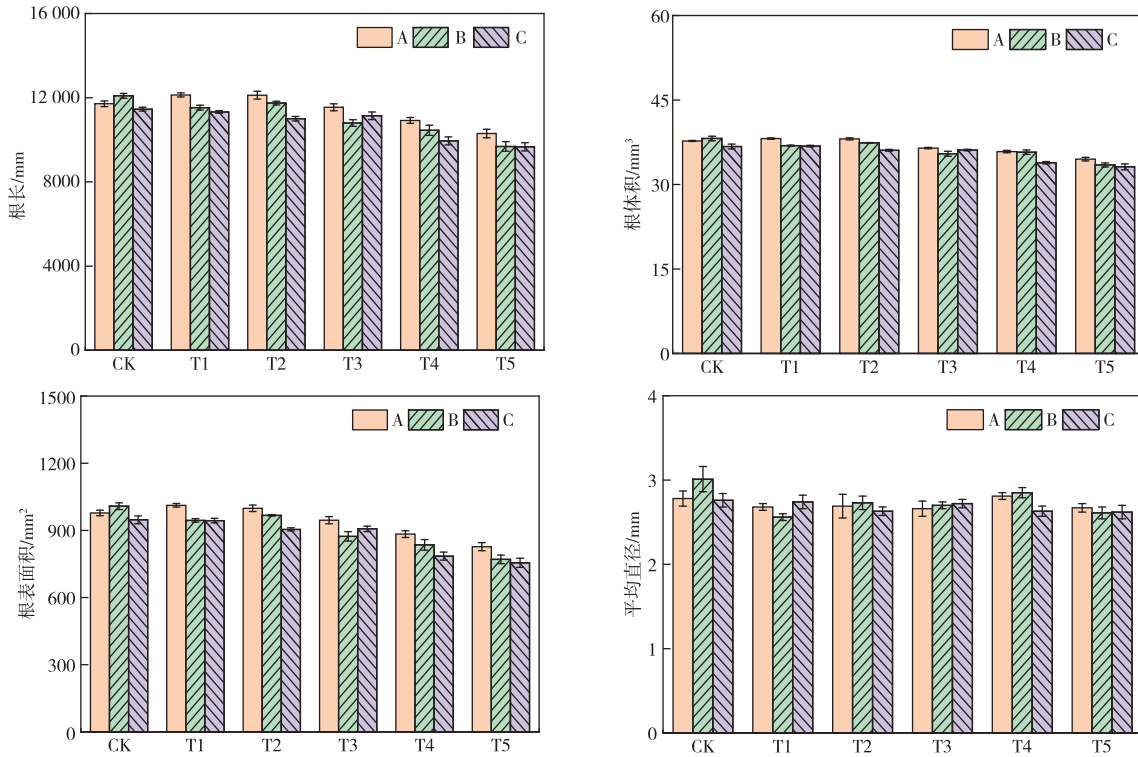


图 4 BPA 和 NP 对玉米根系的影响

Fig.1 Effect of BPA and NP on maize root system

**3.5 BPA 和 NP 对玉米产量指标的影响** 如表 1 所示, T1—T5 处理下对玉米穗粗、穗长和百粒重有抑制作用, 较 CK 组平均降低 5.44%、7.50% 和 10.54%。对于穗粗, 不同水分处理下 T1—T5 处理较 CK 组下降 4.29%~20.28%, 对于穗长, T1—T5 处理较 CK 组下降-2.83%~24.7%, 对于百粒重, T1—T5 处理较 CK 组下降-2.81%~24.9%, 对于秃尖长, T1—T5 处理较 CK 组上升了 0~184.2%。T1—T3 处理存在较 CK 组的穗粗、穗长和百粒重降低较小或者增加的现象。对于 T4 和 T5 处理对玉米穗粗、穗长和百粒均有不同程度降低, 表明较高浓度的 NP 和 BPA 对玉米有明显的抑制作用( $p < 0.05$ )。之前有研究发现低浓度的 BPA(1.0~5.0 mg/L)可以引起大豆株高、鲜重、干重和叶面积的增加, 而高浓度的 BPA(10.0~50.0 mg/L)对大豆生长表现出抑制作用<sup>[34]</sup>。植物吸收的内分泌干扰物影响植物的生长, 这可能与植物体内赤霉素、叶绿素和叶绿素荧光等物质的光响应有关<sup>[35]</sup>。在 60%FC 水分下限条件下, T1<sub>A</sub> 和 T3<sub>A</sub>—T5<sub>A</sub> 处理的穗长、CK<sub>A</sub> 和 T4<sub>A</sub> 处理的穗粗及 T2<sub>A</sub> 和 T5<sub>A</sub> 的百粒重均较其他水分条件下有所增加。60%FC 水分下限可能对作物造成轻微胁迫, 在部分生育期对作物生长具有促进作用。

## 4 结论

(1) 土壤和玉米各组织中 BPA 和 NP 的含量随着土壤初始浓度的增加而增加。不同深度土层中 BPA 和 NP 浓度差异显著, 10 cm 土层深度的 NP 和 BPA 含量较高。NP 和 BPA 从玉米的根、茎、叶到

表 1 不同处理下玉米产量指标的变化百分比

Table 1 Percentage change in maize yield indicators under different treatments

处理	穗长/%	穗粗/%	秃尖长/%	百粒质量/%
T1 <sub>A</sub>	2.53	-0.70	36.84	-3.71
T2 <sub>A</sub>	-3.16	-6.29	52.63	-1.75
T3 <sub>A</sub>	-0.03	-0.08	1.11	-0.12
T4 <sub>A</sub>	-12.42	-6.99	136.84	-17.92
T5 <sub>A</sub>	-14.11	-17.48	184.21	-20.39
T1 <sub>B</sub>	-7.11	3.50	0.00	-13.14
T2 <sub>B</sub>	-8.89	-2.80	10.00	-17.64
T3 <sub>B</sub>	-0.14	-0.07	0.65	-0.16
T4 <sub>B</sub>	-23.32	-11.19	85.00	-24.74
T5 <sub>B</sub>	-24.70	-20.28	110.00	-24.93
T1 <sub>C</sub>	2.83	4.29	21.05	2.18
T2 <sub>C</sub>	-1.09	2.86	47.37	-0.94
T3 <sub>C</sub>	-0.07	0.01	0.32	-0.16
T4 <sub>C</sub>	-10.68	-12.14	126.32	-16.53
T5 <sub>C</sub>	-12.20	-14.29	152.63	-18.19

籽粒的迁移减弱，根中 NP 和 BPA 浓度高于其它组织。土壤中 NP 和 BPA 的含量受土壤水分处理的影响较弱，而玉米根和茎中 NP 在 80%FC 水分条件下的含量加权平均浓度高于其他水分处理。而玉米的叶片组织中 BPA 和 NP 受土壤水分的影响不明显。

(2) BPA 和 NP 的转运系数大多都小于 1，表明 BPA 和 NP 在玉米各组织中转运能力较弱。叶-根的 TF 随着 BPA 初始浓度的增加而逐渐降低，茎-根没有此类现象。茎-根 BPA 的 TF 始终大于叶-根的 TF，表明 BPA 在茎中的转运能力大于叶片。除 CK<sub>A</sub>、T1<sub>A</sub>、CK<sub>B</sub> 和 T1<sub>B</sub> 处理外，茎-根 NP 的 TF 始终大于叶-根 TF。

(3) 在 BPA 和 NP 胁迫下玉米的产量指标和根系特征表现出相似特征。T1—T3 处理组的 BPA 和 NP 对根系生长抑制作用不明显，而 T4 和 T5 处理组对根长、根体积和根表面积存在明显抑制现象。T4 和 T5 处理组玉米穗粗、穗长和百粒重也存在抑制作用。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 秦景, 牛文龙. 北京西南部山前平原区地下水水质评价及其影响因素[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(3): 161-169. (QIN Jing, NIU Wenlong. Water quality assessment and influencing factors of groundwater in the piedmont plain area in southwest Beijing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(3): 161-169. (in Chinese))
- [ 2 ] 马巍, 苏建广, 杨洋, 等. 洱海水质演变特征及主要影响因子分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(2): 112-119, 128. (MA Wei, SU Jianguang, YANG Yang, et al. Study on the evolution characteristics of water quality and its key impact factors of Erhai Lake[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(2): 112-119, 128. (in Chinese))
- [ 3 ] 班静雅, 程锐, 马巍, 等. 雁栖河流域水质的关键影响因素研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(2): 153-162. (BAN Jingya, CHENG Rui, MA Wei, et al. Study on key factors affecting water quality in Yanqi Watershed[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(2): 153-162. (in Chinese))
- [ 4 ] KHAN M M, SIDDIQI S A, FAROOQUE A A, et al. Towards sustainable application of wastewater in agriculture: a review on reusability and risk assessment[J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1397.

- [ 5 ] ZHAO P, MA M, HU Y, et al. Comparison of international standards for irrigation with reclaimed water[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 274: 107974.
- [ 6 ] FEKADU S, ALEMAYEHU E, DEWIL R, et al. Pharmaceuticals in freshwater aquatic environments: A comparison of the African and European challenge[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 324–337.
- [ 7 ] 马金宝, 谭亚男, 袁建伟, 等. 沂河流域临沂市农业面源污染定量估算及特征解析[J]. *中国水利水电科学研究院学报(中英文)*, 2023, 21(5): 490–500. (MA Jinbao, TAN Yanan, YUAN Jianwei, et al. Quantitative estimation and characteristic analysis of agricultural non-point source pollution in Yihe River Basin of Linyi City[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2023, 21(5): 490–500. (in Chinese))
- [ 8 ] LUO Y, GUO W, NGO H H, et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 473–474: 619–641.
- [ 9 ] TRAN N H, REINHARD M, GIN K Y H. Occurrence and fate of emerging contaminants in municipal wastewater treatment plants from different geographical regions—a review[J]. *Water Research*, 2018, 133: 182–207.
- [ 10 ] CHEN Y, YANG J, YAO B, et al. Endocrine disrupting chemicals in the environment: Environmental sources, biological effects, remediation techniques, and perspective[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 310: 119918.
- [ 11 ] KENT J, TAY J H. Treatment of  $17\alpha$ -ethinylestradiol, 4-nonylphenol, and carbamazepine in wastewater using an aerobic granular sludge sequencing batch reactor[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1270–1278.
- [ 12 ] BERTIN A, DAMIENS G, CASTILLO D, et al. Developmental instability is associated with estrogenic endocrine disruption in the Chilean native fish species, *Trichomycterus areolatus* [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136638.
- [ 13 ] GUO W, LI J, LUO M, et al. Estrogenic activity and ecological risk of steroids, bisphenol A and phthalates after secondary and tertiary sewage treatment processes[J]. *Water Research*, 2022, 214: 118189.
- [ 14 ] RYU H D, HAN H, PARK T J, et al. New findings on the occurrence, removal, and risk assessment of nonylphenol and octylphenol in industrial wastewater treatment plants in Korea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2024, 461: 132615.
- [ 15 ] ZHOU G J, LI X Y, LEUNG K M Y. Retinoids and oestrogenic endocrine disrupting chemicals in saline sewage treatment plants: Removal efficiencies and ecological risks to marine organisms [J]. *Environment International*, 2019, 127: 103–113.
- [ 16 ] YU Q, YANG X, ZHAO F, et al. Spatiotemporal variation and removal of selected endocrine – disrupting chemicals in wastewater treatment plants across China: Treatment process comparison[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155374.
- [ 17 ] XU G, MA S, TANG L, et al. Occurrence, fate, and risk assessment of selected endocrine disrupting chemicals in wastewater treatment plants and receiving river of Shanghai, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(24): 25442–25450.
- [ 18 ] BEN W, ZHU B, YUAN X, et al. Occurrence, removal and risk of organic micropollutants in wastewater treatment plants across China: Comparison of wastewater treatment processes[J]. *Water Research*, 2018, 130: 38–46.
- [ 19 ] ZHOU Y, MENG J, ZHANG M, et al. Which type of pollutants need to be controlled with priority in wastewater treatment plants: Traditional or emerging pollutants? [J]. *Environment International*, 2019, 131: 104982.
- [ 20 ] LI Y, LIU H, ZHANG L, et al. Phenols in soils and agricultural products irrigated with reclaimed water[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 276: 116690.
- [ 21 ] 马馨怡, 高威, 李颜, 等. 基于细胞水平高通量测序的土壤水分对活性微生物的影响研究[J]. *生态学报*, 2024(16): 1–12. (MA Xinyi, GAO Wei, LI Yan, et al. Effect of soil water status on active microbes at cellular level based on high-throughput sequencing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024(16): 1–12. (in Chinese))
- [ 22 ] GABRIEL F L P, ROUTLEDGE E J, HEIDLBERGER A, et al. Isomer-specific degradation and endocrine disrupting activity of Nonylphenols[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(17): 6399–6408.
- [ 23 ] LU J, WU J, STOFFELLA P J, et al. Uptake and distribution of bisphenol A and nonylphenol in vegetable crops irrigated with reclaimed water[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 283: 865–870.
- [ 24 ] KIM D, KWAK J I, AN Y J. Physiological response of crop plants to the endocrine-disrupting chemical nonylphe-



- nol in the soil environment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 251: 573–580.
- [ 25 ] PALANZA P, PATERLINI S, BRAMBILLA M M, et al. Sex-biased impact of endocrine disrupting chemicals on behavioral development and vulnerability to disease: Of mice and children[J]. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 2021, 121: 29–46.
- [ 26 ] PALANISAMY C P, CUI B, ZHANG H, et al. A comprehensive review on corn starch-based nanomaterials: properties, simulations, and applications[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 2161.
- [ 27 ] CORSATO ALVARENGA I, DAINTON A N, ALDRICH C G. A review: nutrition and process attributes of corn in pet foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(31): 8567–8576.
- [ 28 ] SUN Y, SHU R, LI C, et al. Gram-negative periodontal bacteria induce the activation of toll-like receptors 2 and 4, and cytokine Production in human periodontal ligament cells [J]. *Journal of Periodontology*, 2010, 81(10): 1488–1496.
- [ 29 ] SIDHU H S, WILSON P C, O’CONNOR G A. Endocrine-disrupting compounds in reclaimed water and residential ponds and exposure potential for dislodgeable residues in turf irrigated with reclaimed water[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2015, 69(1): 81–88.
- [ 30 ] HU Y, WU W, XU D, et al. Occurrence, uptake, and health risk assessment of nonylphenol in soil-celery system simulating long-term reclaimed water irrigation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 406: 124773.
- [ 31 ] DODGEN L K, LI J, PARKER D, et al. Uptake and accumulation of four PPCP/EDCs in two leafy vegetables [J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182: 150–156.
- [ 32 ] HUESO S, GARCÍA C, HERNÁNDEZ T. Severe drought conditions modify the microbial community structure, size and activity in amended and unamended soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 50: 167–173.
- [ 33 ] PAN W J, XIONG C, WU Q P, et al. Effect of BPA on the germination, root development, seedling growth and leaf differentiation under different light conditions in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(10): 2585–2592.
- [ 34 ] QIU Z, WANG L, ZHOU Q. Effects of bisphenol A on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in above-ground organs of soybean seedlings[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(3): 1274–1280.
- [ 35 ] NELSON D C, RISEBOROUGH J A, FLEMMATTI G R, et al. Karrikins discovered in smoke trigger arabidopsis seed germination by a mechanism requiring gibberellic acid synthesis and light[J]. *Plant Physiology*, 2009, 149(2): 863–873.

## Distribution, transport and effects of bisphenol A and nonylphenol in corn with reclaimed water irrigation

HU Yaqi<sup>1</sup>, JIANG Tingting<sup>1,2</sup>, MA Meng<sup>1</sup>, WU Wenyong<sup>1,2</sup>

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China*;

2. *College of Water Resources and Construction Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China*)

**Abstract:** Reclaimed water irrigation is an important measure to alleviate water scarcity in agriculture. However, the health risks of endocrine disruptors in reclaimed water are unclear. In this study, we investigated the accumulation and transport patterns of nonylphenol and bisphenol A in the soil-corn system using a pot experiment. We evaluated the effects of nonylphenol and bisphenol A on root characteristics and maize yield. The results show that 1) the levels of nonylphenol and bisphenol A in soil and maize plants increased with initial concentration. The levels of nonylphenol and bisphenol A in the root system of maize are higher than those in the stems and leaves, and the levels of nonylphenol and bisphenol A in the root system range from 0.0450 to 0.1575 mg/kg and from 0.3344 to 1.1344 mg/kg, respectively. 2) The treatments at higher concentrations has significant inhibitory effects on maize root and yield indices, and there are inhibitory effects on root length, root volume, root surface area, cob thickness, cob length, and 100 kernel weight, respectively. 3) Bisphenol A and nonylphenol have weak transport capacity in various tissues of maize, and the transport coefficients of bisphenol A and nonylphenol are mostly less than 1.

**Keywords:** reclaimed water; corn; nonylphenol; bisphenol A; migration

(责任编辑: 王学风)