

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20241125005 CSTR: 32062.14.AJE.1673-5897.20241125005

吴冕, 刘琳, 闫亮, 等. 河套灌区典型区域地下水中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(2): 105-111.

WU M, LIU L, YAN L, et al. Distribution characteristics of phthalic acid esters in groundwater in typical area of the Hetao Irrigation District [J]. Asian journal of ecotoxicology, 2025, 20(2): 105-111.

河套灌区典型区域地下水中邻苯二甲酸酯的分布特征

吴冕^{1,2}, 刘琳², 闫亮², 廖思远², 邓梓懿², 罗永丽², 赵高峰^{2,*}, 孙喜梦², 蒲玥², 辛言君¹, 周成智¹

1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109

2. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

收稿日期: 2024-11-25 录用日期: 2024-12-26

摘要: 河套灌区长期大规模使用农膜导致邻苯二甲酸酯(phthalic acid esters, PAEs)等农膜增塑剂在灌区残留, 由此引起的污染问题应受到关注。为探究河套灌区 PAEs 在地下水中的分布特征, 选取五原县为研究区域。分别采集春灌前、春灌后、秋浇前和秋浇后灌区的地下水样品, 采用气相色谱-质谱法对样品中 6 种 PAEs 进行分析。结果表明 2 个灌溉期内地下水中 PAEs 的浓度为 0.14 ~ 9.80 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。春灌期间地下水中邻苯二甲酸二乙酯(DEP)和邻苯二甲酸二甲酯(DMP)为主要组分。秋浇后, 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)和邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)成为地下水中主要的 PAEs 组分。春灌后 PAEs 浓度升高了 20.3%, 秋浇后 PAEs 浓度升高了 115.5%。灌溉水下渗携带 PAEs 进入地下水环境是灌溉后地下水 PAEs 浓度升高的重要原因。研究结果可为河套灌区地下水 PAEs 的污染防控提供数据支持。

关键词: 邻苯二甲酸酯; 地下水; 分布特征; 河套灌区

文章编号: 1673-5897(2025)2-105-07 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Distribution Characteristics of Phthalic Acid Esters in Groundwater in Typical Area of the Hetao Irrigation District

WU Mian^{1,2}, LIU Lin², YAN Liang², LIAO Siyuan², DENG Ziyi², LUO Yongli², ZHAO Gaofeng^{2,*}, SUN Ximeng², PU Yue², XIN Yanjun¹, ZHOU Chengzhi¹

1. College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Received 25 November 2024 accepted 26 December 2024

Abstract: The long-term and large-scale use of agricultural film in the Hetao Irrigation District has resulted in residual agricultural film plasticizers such as phthalic acid esters (PAEs). The contamination caused by PAEs should be given attention in the irrigation district. In order to investigate the distribution characteristics of PAEs in groundwater in Hetao Irrigation District, Wuyuan County was selected as the research area. Groundwater samples were collected before spring irrigation, after spring irrigation, before autumn irrigation, and after autumn irrigation, re-

基金项目: 国家重点研发计划“流域面源污染防控技术与应用示范”(2021YFC3201501); 国家重点研发计划“面向水生态损害的证据固定和鉴定评估关键技术研究”(2023YFC3304303); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2025YC39)

第一作者: 吴冕(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新污染物环境化学行为, E-mail: 1214431800@qq.com

* **通信作者** (Corresponding author), E-mail: zhaogaofeng@caas.cn

spectively. The six kinds of PAEs in the samples were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry. The results showed that the concentration of PAEs in groundwater was $0.14-9.80 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ during the two irrigation periods. Diethyl phthalate (DEP) and dimethyl phthalate (DMP) were the major constituents in groundwater during spring irrigation. Dibutyl phthalate (DBP) and di(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) became the major PAE constituents in groundwater after autumn irrigation. The concentration of PAEs increased by 20.3% after spring irrigation and by 115.5% after autumn irrigation, respectively. The infiltration of irrigation water containing PAEs into the groundwater environment is an important reason for the increase of PAEs concentration in groundwater after irrigation. The results can provide data support for PAEs pollution control in Hetao Irrigation District.

Keywords: PAEs; groundwater; distribution characteristics; Hetao Irrigation District

0 引言

河套灌区是中国3个特大型灌区之一,灌区的灌溉面积超过6.7万 hm^2 ,是亚洲最大的一首制灌区,其社会、经济效益在黄河流域乃至全国都占有重要地位。河套灌区因其显著的农业经济效益而大力发展农业,这对区域经济发展起到了积极推动作用的同时也对该地区原本脆弱的生态系统带来了严峻的考验。因此河套灌区农业绿色发展不仅是保护当地生态环境、提高农产品质量的需要,也是实现农业可持续发展、适应气候变化的必然选择。

农膜覆盖栽培技术在增温保墒、抗旱节水、增产增收方面作用显著^[1]。为了解决农业生产问题、保障粮食安全,河套灌区开始陆续推行地膜覆盖种植技术,至今覆膜年限达30年^[2]。河套灌区的巴彦淖尔市连续多年成为内蒙古地膜覆盖面积最大的地级市。农膜中的塑料添加剂使用量巨大,占有塑料添加剂的 $1/3$ ^[3-4],而增塑剂中50%以上为邻苯二甲酸酯(phthalic acid esters, PAEs)^[5]。PAEs包含1个平面苯环和2条线性脂肪链,其分子量和化学性质随侧链基团结构的变化而变化。高分子量PAEs,如邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯(DEHP)、邻苯二甲酸二异壬酯(DINP)和邻苯二甲酸二异癸酯(DIDP)等主要用作聚氯乙烯材料的增塑剂,在农业薄膜中有广泛的使用^[6],而邻苯二甲酸二甲酯(DMP)、邻苯二甲酸二乙酯(DEP)和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)等低分子量PAEs主要用于个人护理产品、溶剂黏合剂和药品^[7],因此,PAEs是被广泛使用的增塑剂。本研究重点关注的是已被我国列为优先监测污染物的DMP、DEP、DBP、邻苯二甲酸丁基苄基酯(BBP)、DEHP和邻苯二甲酸异辛酯(DOP)。农膜长时间暴露在户外高温、紫外线照射条件下,含有的PAEs由于缺乏化学键的束缚,容易从农膜中释放到环境中^[8]。据报道,我国全年的农膜残留量超过46万t,

从残留的农膜中释放出的PAEs约为91.5 t^[9]。KONG等^[10]研究发现农膜释放的PAEs在自然介质中不断迁移,对农业环境造成污染。本研究以河套灌区巴彦淖尔市五原县为研究区,探究地下水中6种典型PAEs的分布特征,为河套灌区地下水PAEs的污染防控提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本研究以内蒙古自治区巴彦淖尔市五原县为研究区(图1),该县是全国首批26个农业面源污染治理与监督指导试点县(市、区)之一。研究区内230万亩耕地全部为引黄自流灌溉,种植条件十分优越,为全国粮食油料和畜牧业发展重点县。全年集中灌溉事件为5月初春灌、10月末秋浇,其余灌水时间为局部灌溉。研究区地下水埋深年内动态变化可分为4个阶段:春灌前、春灌后、秋浇前和秋浇后。

1.2 样品采集

本研究于2023年春灌前、春灌后、秋浇前和秋浇后分别采集地下水样品,依照蛇形采样法,于各排干布设T1~T15共计15个采样点位,每点采集地下水样品500 mL。具塞磨口棕色玻璃瓶盛装,于4℃冷藏,避光保存。

1.3 标准品与试剂

DMP、DEP、DBP、BBP、DEHP和DOP的混合标准品购自AccuStandard(美国)。色谱纯的正己烷、甲苯等均购自Merck(德国),其余实验用药品、试剂均不低于分析纯。所有实验用水采用Milli-Q净化系统(Millipore,美国)处理后的超纯水($18.2 \text{M}\Omega\cdot\text{cm}$)。

1.4 样品前处理方法

混合均匀的地下水样品通过孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 玻璃纤维滤膜过滤。量取过滤后的50 mL样品于聚四氟乙烯离心管中,加入2 g氯化钠,混匀。移取10

mL 正己烷于离心管中,涡旋混匀 30 min,静置 10 min。用玻璃注射器取上层清液 1 mL,经无水硫酸钠过滤后收集,置于进样瓶中待测。

1.5 PAEs 仪器测定方法

气相色谱条件:进样口温度为 250 °C;进样方式为无分流进样;载气为氦气;流速为 1.2 mL·min⁻¹;升温程序为初始柱温 50 °C,保持 1 min,以 15 °C·min⁻¹升至 200 °C,保持 1 min,再以 8 °C·min⁻¹升至 280 °C,保持 3 min;进样量为 1 μL。

质谱条件:电离方式为电子轰击源;离子源温度为 230 °C;离子化能量为 70 eV;色谱与质谱接口温度为 280 °C;扫描方式为选择离子扫描模式;溶剂延迟时间为 2 min。

1.6 质量保证与质量控制

实验过程中每 10 个样品中分析一个程序空白和一个溶剂空白。DMP、DEP、DBP、BBP、DEHP 和 DOP,6 种 PAEs 的平均回收率分别如下:96.0%、96.8%、99.3%、100.6%、98.6% 和 95.9%。方法检出限:0.015、0.035、0.081、0.011、0.015 和 0.006 μg·L⁻¹。相对标准偏差:8.38%、4.80%、4.07%、6.00%、3.13% 和 3.26%。

2 结果

2.1 五原县地下水中 PAEs 的分布特征

五原县地下水中 PAEs 区域分布特征如图 2 所示,15 个采样点地下水中 ΣPAEs 的浓度范围在 0.14~9.80 μg·L⁻¹之间,平均值为 3.32 μg·L⁻¹,中值为 2.79 μg·L⁻¹,且 6 种 PAEs 在五原县地下水中均有检出。地下水中 PAEs 主要组分为 DEP、DBP 和 DMP,其中占比最高的 DEP 浓度占 ΣPAEs 的 31.7%。高分子量 PAEs 在农田较为集中的西南部地区(T8、T10、T12、T13、T14)检出较多;而低分子量 PAEs 在五原县城所在的东北部地区(T2、T3、T5、T6、T7)有较多检出。

五原县春灌前地下水中 PAEs 分布如图 2(a)所示,春灌前五原县地下水中 ΣPAEs 浓度在 0.23~9.28 μg·L⁻¹之间,平均值为 3.01 μg·L⁻¹,中值为 2.64 μg·L⁻¹。春灌前地下水中 PAEs 主要组分为 DEP、DMP,其中占比最高的 DEP 浓度占 ΣPAEs 的 36.5%。从五原县春灌前地下水中 ΣPAEs 的分布情况来看,五原县中南部(T6、T7、T8)地下水中 ΣPAEs 浓度最高。T6、T7、T8 距离五原县城区较近,居民生活污水或工业废水中含有的 PAEs 可能也随水流渗入地下水,从而导致中南部地下水中

PAEs 浓度较高。图 2(b)展示了五原县春灌后地下水中 PAEs 浓度,春灌后五原县 ΣPAEs 浓度在 1.06~9.80 μg·L⁻¹之间,平均值为 3.62 μg·L⁻¹,中值为 3.49 μg·L⁻¹。春灌后地下水中 PAEs 主要组分为 DEP、DMP,其中占比最高的 DEP 浓度占 ΣPAEs 的 49.3%。

如图 2(c)所示,秋浇前五原县地下水中 ΣPAEs 的浓度在 0.14~5.61 μg·L⁻¹之间,平均值为 1.23 μg·L⁻¹,中值为 1.04 μg·L⁻¹。秋浇前地下水中 PAEs 主要组分为 DEP、DBP、DMP,其中占比最高的 DEP 浓度占 ΣPAEs 的 34.3%。春灌后至秋浇前地下水中 PAEs 浓度显著下降,与这个现象不同的是五原县总排干附近地下水(T1、T2)中 DMP、DBP 浓度有上升趋势,表明 DBP、DMP 会随着各级灌溉系统排水迁移并可能在总排干发生聚集。图 2(d)显示了五原县秋浇后地下水中 ΣPAEs 的浓度在 1.25~5.84 μg·L⁻¹之间,平均值为 2.65 μg·L⁻¹,中值为 2.03 μg·L⁻¹。秋浇后地下水中 PAEs 主要组分为 DBP、DEHP,其中占比最高的 DBP 浓度占 ΣPAEs 的 33.3%。由此可见,灌区秋浇对地下水中 PAEs 的种类和浓度分布产生了显著的影响。

2.2 地下水中 PAEs 在灌溉周期内的变化特征

灌溉周期内 6 种目标 PAEs 的变化情况如图 3 所示。春灌前五原县地下水中以 DEP 和 DMP 为主要组分,其中 DEP 在 ΣPAEs 中占比最高为 36.5%。春灌显著提高了五原县地下水中 PAEs 的浓度,DEP 占比升至 49.3%,DMP 仍保持较高浓度。春灌期间,灌溉水通过土壤渗透进入地下水携带的 PAEs 显著增加了地下水中 PAEs 浓度。秋浇前,地下水中 PAEs 浓度下降至 0.14~5.61 μg·L⁻¹,平均值为 1.23 μg·L⁻¹,这与春灌后的高值形成对比。DEP 仍为占比最高的 PAE 为 34.3%,其中 T1、T2(总排干附近)地下水中的 DMP 和 DBP 浓度上升,反映了灌区排水系统中水环境中的 PAEs 可能存在聚集效应。秋浇后,DBP 和 DEHP 成为地下水中主要的 PAEs 组分,其中 DBP 占比最高为 33.3%。

DEP 为春灌期间地下水中占比最高的 PAEs 组分,春灌前占 ΣPAEs 的 36.5%,春灌后 DEP 浓度显著上升,占比 49.3%,春灌明显促进了 DEP 向地下水的迁移。秋浇前 DEP 仍为主要 PAEs 之一,但占比降至 27.6%,而秋浇后 DEP 占比下降趋势更明显,说明其在秋浇期间的迁移量有别于其他同类 PAEs。春灌前至春灌后 DMP 作为主要组分之一,

春灌后浓度有显著提升,而秋浇前至秋浇后 DMP 在秋浇前仍有较高浓度,说明 DMP 在春灌和秋浇期间迁移进入地下水的量较大。DOP 在春灌前后

浓度从 $0.32 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $0.49 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;秋浇前后浓度从 $0.02 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升高至 $0.29 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,其浓度受春灌和秋浇的影响明显。

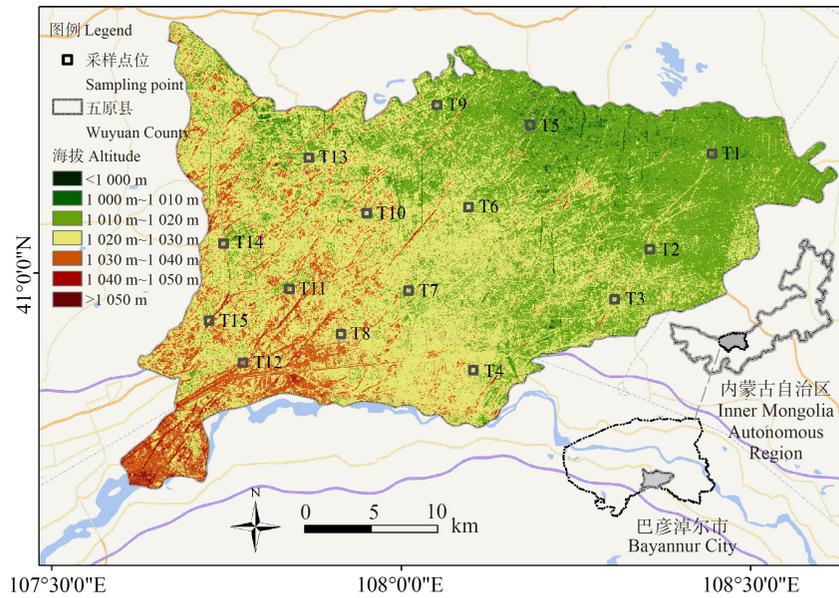
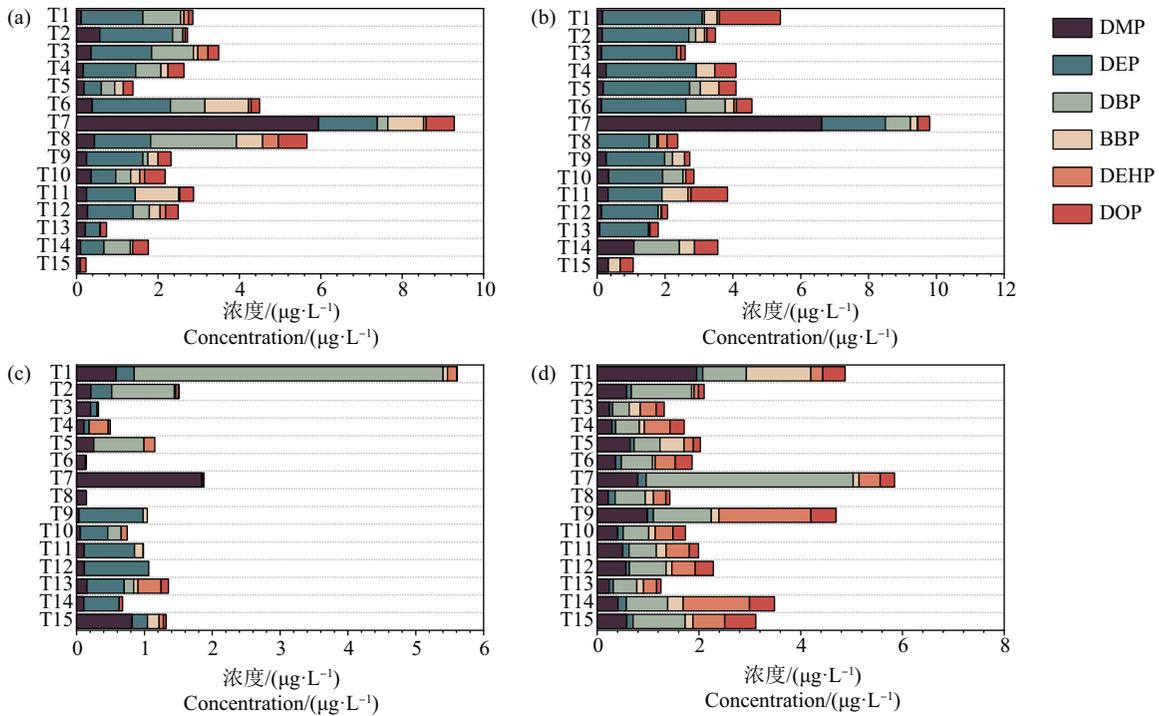


图 1 样点分布图(审图号:蒙 S(2020)032 号)

Fig. 1 Plot of sampling site distribution (The map approval number is Meng No. S(2020)032)



注:(a)春灌前,(b)春灌后,(c)秋浇前,(d)秋浇后。

Note: (a) Before spring irrigation, (b) After spring irrigation, (c) Before autumn irrigation, and (d) After autumn irrigation.

图 2 五原县 T1 ~ T15 地下水 PAEs 浓度

Fig. 2 The concentration of PAEs in groundwater of T1-T15 in Wuyuan County

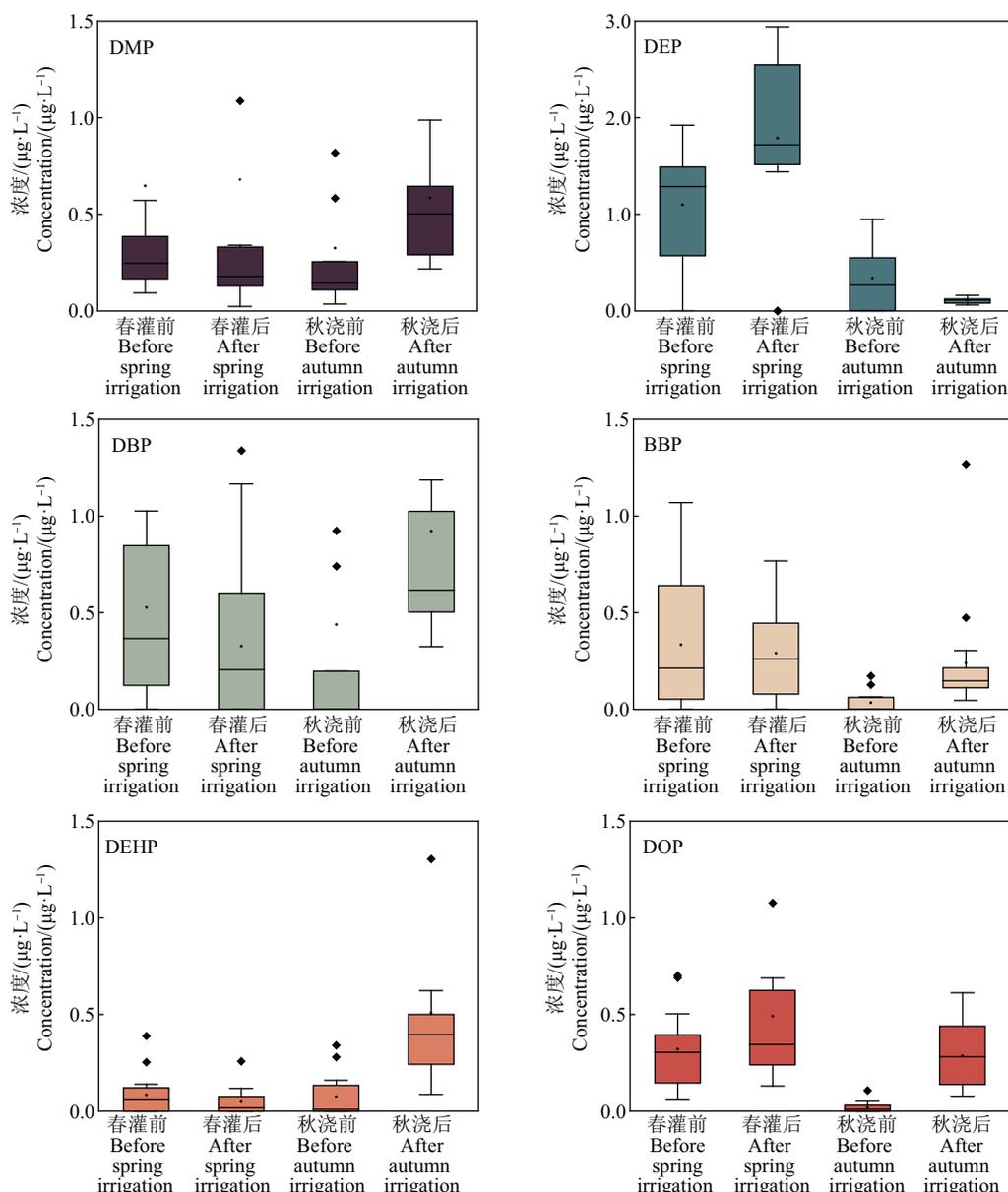


图 3 全年灌溉周期内五原县地下水中 6 种 PAEs 浓度变化

Fig. 3 The concentration changes of six PAEs in groundwater of Wuyuan County during the annual irrigation cycle

3 讨论

表 1 比较了五原县地下水中检出的 PAEs 浓度与文献报道的其他地区地下水中 PAEs 的浓度水平。结果显示,河套灌区五原县地下水 PAEs 的水平属于中高污染水平;高于珠江流域、长江流域、和太湖流域报道的水平,但低于滹沱河流域和淮河流域相关研究区的水平;对比黄河流域相关研究区也是处于较高污染水平。与河套灌区不同,淮河流域农业和工业并重,人口稠密,淮河流域内高强度的人类活动和工业排放可能是直接导致该流域地下水中 PAEs 污染的原因。滹沱河流域位于华北平原,农业

和工业活动比较集中。该地区地下水中 PAEs 的浓度与五原县相比较高,且主要以 DBP 为主要组分,这与当地密集的工业排放相关。珠江流域、长江流域、太湖流域位于中国南部,该类地区的地下水中 PAEs 浓度相对较低,这可能与其地下水量丰沛以及较强的环境监管和治理措施有关。

灌溉水可携带 PAEs 渗透进入地下水,春灌前 PAEs 浓度水平较低,而春灌后 PAEs 有了显著提高,表明春灌对灌区地下水中的 PAEs 具有重要影响。DEP 和 DMP 因其较低的分子量和较高的水溶性,在灌区环境中具有较高的迁移能力,春灌可促使

表1 相关研究中地下水 PAEs 浓度
Table 1 Concentration of PAEs in groundwater in relevant studies

地区 Region	DMP	DEP	DBP	BBP	DEHP	DOP	Σ PAEs	参考文献 Reference
珠江流域(中国广东) Pearl River Basin (Guangdong, China)	0.01	0.05	0.39	0.01	0.47	0.01	0.93	[11]
滹沱河流域(中国河北) Hutuo River Basin (Hebei, China)	0.17	0.01	2.55	—	0.39	0.06	3.13	[12]
淮河流域(中国江苏) Huaihe River Basin (Jiangsu, China)	0.82	2.09	5.00	0.05	6.47	0.01	14.45	[13]
长江流域(中国湖北) Yangtze River Basin (Hubei, China)	—	—	1.02	—	0.31	—	1.33	[14]
太湖流域(中国江苏) Taihu Lake Basin (Jiangsu, China)	—	0.14	0.39	0.18	0.84	0.39	1.94	[15]
黄河流域上游(中国青海) Upper Yellow River Basin (Qinghai, China)	—	—	0.79	—	1.20	—	1.99	[16]
黄河流域上游(中国宁夏) Upper Yellow River Basin (Ningxia, China)	—	0.04	—	—	—	—	0.04	[16]
黄河流域中游(中国山西) Middle Yellow River Basin (Shanxi, China)	—	—	0.47	—	—	—	0.47	[16]
黄河流域中游(中国河南) Middle Yellow River Basin (Henan, China)	—	—	—	—	0.72	—	0.72	[16]
黄河流域下游(中国山东) Late Yellow River Basin (Shandong, China)	—	—	0.32	—	—	—	0.32	[16]
恒河流域(印度) Ganges Valley (India)	—	—	154.41	9.61	3 203.33	—	3 367.35	[17]
尼日尔河流域(尼日利亚) Niger River Basin (Nigeria)	<0.05 ~ 0.13	<0.05 ~ 0.55	<0.05 ~ 0.54	<0.05 ~ 0.05	<0.05 ~ 3.71	<0.05 ~ 0.48	<0.05 ~ 4.24	[18]
河套灌区(中国五原县) Hetao Irrigation District (Wuyuan County, China)	0.56	0.83	0.55	0.22	0.18	0.28	2.60	本研究 This research

这些化合物向地下水迁移,导致其在地下水中的浓度比例增加,研究也发现 DEP 和 DMP 是五原县春灌前后地下水中 PAEs 的主要组分。HU 等^[9]的研究发现我国各地土壤中 DEHP 浓度与当地农膜消耗量之间有较高的相关性,DEHP 和 DBP 等高分子量 PAEs 是农膜中增塑剂的主要成分。本研究发现,秋浇活动改变了五原县地下水中 PAEs 的浓度分布和组分占比,DBP 和 DEHP 成为秋浇后地下水中主要的 PAEs 组分。

4 结束语

(1)五原县地下水 PAEs 浓度高于珠江、长江流域,但低于滹沱河与淮河流域,其污染水平与农业集约化程度和农膜残留量高度关联。

(2)灌溉水下渗是驱动 PAEs 向地下水迁移的关键途径,春灌和秋浇后地下水中 PAEs 浓度分别增

加 20.3% 和 115.5%,揭示了高强度农业活动对地下水环境的潜在威胁。

(3)PAEs 组分分布呈现季节性分异特征,高水溶性和迁移能力使其更易随灌溉水入渗,表现为春灌期以低分子量 DEP、DMP 为主,秋浇后高分子量 DBP、DEHP 占比显著提升。

通信作者简介:赵高峰(1978—),男,博士,研究员,主要研究方向为风险污染物的筛查与评价。

5 参考文献

- [1] 包明哲,红梅,赵巴音那木拉,等. 内蒙古河套灌区农田地膜残留量分布特征及影响因素[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 45-54.
- BAO M Z, HONG M, ZHAO B, et al. Distribution characteristics and influencing factors concerning residual

- quantity of agricultural mulch film in Hetao irrigation area, Inner Mongolia[J]. *Journal of agricultural resources and environment*, 2023, 40(1): 45-54.
- [2] 白云龙, 李晓龙, 张胜, 等. 内蒙古地膜残留污染现状及残膜回收利用对策研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2015 (6): 139-145.
- BAI Y L, LI X L, ZHANG S, et al. Study on the current situation of plastic film residue pollution and the countermeasures for the recovery and utilization of residual film in Inner Mongolia[J]. *Soil and fertilizer sciences in China*, 2015(6): 139-145.
- [3] CHENG H F, LUO H, HU Y A, et al. Release kinetics as a key linkage between the occurrence of flame retardants in microplastics and their risk to the environment and ecosystem: a critical review[J]. *Water research*, 2020, 185: 116253.
- [4] TUAN TRAN H, LIN C, BUI X T, et al. Phthalates in the environment: characteristics, fate and transport, and advanced wastewater treatment technologies[J]. *Bioresource technology*, 2022, 344: 126249.
- [5] ZHAO E, XU Z N, XIONG X, et al. The impact of particle size and photoaging on the leaching of phthalates from plastic waste[J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 367: 133109.
- [6] LAW K L, SOBKOWICZ M J, SHAVER M P, et al. Untangling the chemical complexity of plastics to improve life cycle outcomes[J]. *Nature reviews materials*, 2024, 9 (9): 657-667.
- [7] CAPOLUPO M, SØRENSEN L, JAYASENA K D R, et al. Chemical composition and ecotoxicity of plastic and car tire rubber leachates to aquatic organisms[J]. *Water research*, 2020, 169: 115270.
- [8] CHEN X Y, LI X X, LI Y. Toxicity inhibition strategy of microplastics to aquatic organisms through molecular docking, molecular dynamics simulation and molecular modification[J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2021, 226: 112870.
- [9] ZHANG Q Q, MA Z R, CAI Y Y, et al. Agricultural plastic pollution in China: generation of plastic debris and emission of phthalic acid esters from agricultural films[J]. *Environmental science & technology*, 2021, 55 (18): 12459-12470.
- [10] KONG X, JIN D C, JIN S L, et al. Responses of bacterial community to dibutyl phthalate pollution in a soil-vegetable ecosystem[J]. *Journal of hazardous materials*, 2018, 353: 142-150.
- [11] ZHANG Y, SUN J, CHEN X, et al. The distribution characteristics and source of phthalic acid esters in groundwater of Dongguan [J]. *Environmental pollution control*, 2011, 8: 57-61
- [12] 昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 等. 滹沱河冲洪积扇地下水中酞酸酯的污染现状与分布特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(8): 3041-3048.
- CHANG S, ZHAO X R, LIU Y, et al. Distribution characteristics and pollution status of phthalate esters in the groundwater of Hutuo River pluvial fan[J]. *Environmental science*, 2016, 37(8): 3041-3048.
- [13] 蒋丽佳, 许秋瑾, 梁存珍, 等. 江苏某县地下水邻苯二甲酸酯类的检测与风险评价[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(4): 5-10.
- JIANG L J, XU Q J, LIANG C Z, et al. Detection and risk assessment of phthalates in groundwater in a country of Jiangsu Province[J]. *Environmental monitoring in China*, 2013, 29(4): 5-10.
- [14] 王程, 刘慧, 蔡鹤生, 等. 武汉市地下水中酞酸酯污染物检测及来源分析[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(10): 118-123.
- WANG C, LIU H, CAI H S, et al. Source analysis and detection of trace phthalate esters in groundwater in Wuhan [J]. *Environmental science & technology*, 2009, 32(10): 118-123.
- [15] 杨彦, 于云江, 李定龙, 等. 太湖流域(苏南地区)农业活动区人群 PAEs 健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(6): 1097-1105.
- YANG Y, YU Y J, LI D L, et al. PAEs health risk assessment of agriculture area in Taihu Lake Basin (Southern Jiangsu Province)[J]. *China environmental science*, 2013, 33(6): 1097-1105.
- [16] LI X H, TIAN T, SHANG X C, et al. Occurrence and health risks of organic micro-pollutants and metals in groundwater of Chinese rural areas [J]. *Environmental health perspectives*, 2020, 128(10): 107010.
- [17] SAHA S, NARAYANAN N, SINGH N, et al. Occurrence of endocrine disrupting chemicals (EDCs) in river water, ground water and agricultural soils of India[J]. *International journal of environmental science and technology*, 2022, 19(11): 11459-11474.
- [18] EDJERE O, OGWUCHE C E, BASSEY U, et al. Consideration of phthalates distribution in underground water in some selected regions in Delta State, Southern Nigeria[J]. *Ovidius University annals of chemistry*, 2020, 31(1): 44-48.
- [19] HU X Y, WEN B, SHAN X Q. Survey of phthalate pollution in arable soils in China[J]. *Journal of environmental monitoring*, 2003, 5(4): 649-653. ◆