张发文,邓正云,杨 铮,等.汇流对黄河郑州段沉积物微塑料污染分布的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3884-3895.
Zhang F W, Deng Z Y, Yang Z, et al. The impact of confluence on the distribution of microplastic pollution in sediments of the Yellow River (Zhengzhou Section) [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3884-3895.

# 汇流对黄河郑州段沉积物微塑料污染分布的影响

张发文[1],邓正云[1],杨 铮[1],罗永强[1],赵长民[2],李和通[2],蒋莉萍[1],桂 新[1],马 丽[1*] (1.河南农业大学林学院,河南 郑州 450046；2.河南省郑州生态环境监测中心,河南 郑州 450007)

**摘要**：为探究汇流对黄河中下游沉积物中微塑料分布和污染的影响,采集了黄河郑州段 24 个沉积物样本,通过体视显微镜和傅里叶红外光谱对微塑料进行定量和定性分析,探讨其污染分布特征;利用聚类分析考察干、支流微塑料污染分布之间的关系.结果表明:丰水期和枯水期沉积物中微塑料丰度均值分别为(1340.97 ± 314.84) n/kg 和(2372.22 ± 604.17) n/kg;总体来看,微塑料丰度呈现支流>干流、下游>上游的趋势;其中纤维状微塑料占比最高,颜色以蓝色、黑色和透明为主;粒径<2mm 居多;主要聚合物类型是聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),其主要来源是洗涤废水排放和生活垃圾丢弃;汇流后微塑料形状和种类组成丰富度增加,主导色(蓝、黑、透明)占比降低,小粒径(<2mm)占比增加.这说明支流作为源,汇流后改变了干流沉积物微塑料的组成和分布,甚至影响其迁移.

**关键词**：微塑料；沉积物；汇流；污染分布；影响
**中图分类号**：X522 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3884-12

**The impact of confluence on the distribution of microplastic pollution in sediments of the Yellow River (Zhengzhou Section).**

ZHANG Fa-wen[1], DENG Zheng-yun[1], YANG Zheng[1], LUO Yong-qiang[1], ZHAO Chang-min[2], LI He-tong[2], JIANG Li-ping[1], GUI Xin[1], MA Li[1*] (1.College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China；2.Zhengzhou Ecological Environment Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450007, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3884~3895

**Abstract**：A total of 24 sediment samples were collected from the Yellow River Zhengzhou Section to explore the influence of confluence on the distribution and pollution of microplastics in the sediments of the middle and lower reaches of the Yellow River. To investigate the pollution distribution characteristics of microplastics, quantitative and qualitative analysis were conducted by using stereomicroscopy and fourier transform infrared spectroscopy method. Subsequently, cluster analysis was performed to examine the relationship of the microplastics pollution distribution between the main and tributary streams. The results showed that the mean values of microplastic abundance in the sediments were (1340.97 ± 314.84) n/kg and (2372.22 ± 604.17) n/kg during the wet season and dry season, respectively. Overall, the abundance of microplastics showed a trend of higher tributary than main stream, and higher downstream than upstream. Among them, fibrous microplastics accounted for the highest proportion, and dominated by blue, black, and transparent, with the majority of the particle size less than 2mm. The main polymer type was polyethylene terephthalate (PET), and the waste water discharges from washing and household waste disposal were identified as the major sources. Moreover, increased diversity in shapes and types of microplastic were observed after confluence, with a reduction in the fraction of the dominant colours (blue, black, clear) and an expansion in the proportion of small particle sizes (<2mm). This indicates that the tributaries, as the source, contributed to the composition and distribution of microplastics in the main stream sediments after confluence, even affecting their migration.

**Key words**：microplastics；sediments；confluence；pollution distribution；impact

随着塑料制品广泛应用于日常生活和工农业生产中[1],微塑料进入空气、土壤、地表水和沉积物等环境介质中并大量积累[2-5].由于塑料的难降解性、生物蓄积性和生物毒性等作用,不仅会破坏生态系统、对农业生产力和食品安全产生长期影响甚至还会危害人体健康[6].

河流作为通道,在微塑料向湖泊和海洋运输过程中起着至关重要的作用[7].目前,在印度 Beas 河[8]、卢尔瓦河[9]、波兰的维斯瓦河[10]、Orange-Senqu 河[11]、我国长江[12]、黄河[13]和珠江流域[14],甚至南北极地区都有检出[15-16],且不同区域水体微塑料分布存在空间差异性.河流是微塑料在环境中迁移和

**收稿日期**：2024-12-17
**基金项目**：河南省重点研发与推广专项(232102320251);黄河流域生态保护和高质量发展联合研究项目(2022-YRUC-01-050208-05);国家级大学生创新训练计划项目(202410466036)
* 责任作者, 讲师, malizhk@henau.edu.com

扩散的重要途径[4].水流交汇是天然河道普遍存在的自然现象,支流汇入可能会影响微塑料的赋存特征甚至运输特性,并扰乱它们在汇流处的分布模式[17].汇流处是排水网络中栖息地的重要控制节点[18].水体中污染物在汇流作用下沿水流方向移动,汇流处是微塑料污染的聚集区[19-20].微生物、重金属和病毒等有害物质会吸附在微塑料上,对生态和生物产生不利影响[6].复杂的汇流结构会导致微塑料的流量增加,自然河流汇流中观察到微塑料的丰度较高[20].然而,干支流交汇区水流流态差异较大,水流中的污染物和其他物质在不同水力分区影响下表现出不同分布滞留特征[21],河道交汇区微塑料赋存特征受水动力分区影响[22].微塑料在通过交汇区时,其运动与赋存特性发生变化,可见支流汇入对微塑料在河流内富集和向下游输运有极大影响.

黄河郑州段位于黄河中下游,泥沙量大,中下游河段的地势较高使得部分区域泥沙淤积,而小浪底水库自调水调沙以来,人为干扰活动大幅度增加,因此,该区域是黄河生态保护的重点.沉积物作为河流水体微塑料污染的汇,可反映当地的长期污染水平[23].支流是干流微塑料污染的源,但支流汇入对干流中微塑料分布和运输的影响仍不太清楚.因此,本研究探讨支流汇入对黄河干流沉积物微塑料污染分布的影响,以期为后续开展黄河流域沉积物微塑料迁移研究提供参考.

## 1　材料与方法

### 1.1　研究区域概况

黄河郑州段位于黄河中下游的交汇地带,是黄河流域的重要组成部分,郑州境内全长 163km,宽 5~10km,流域面积达 1830km$^2$,该河段迂急多变,宽浅疏散,夏季水位高,水量充沛,冬季则进入枯水期.区域内黄河水系的主要支流有:伊洛河、汜水河、枯河和沁河等.

根据研究区域地形条件和河道汇流情况,结合样品代表性原则,共设置 12 个采样断面(图 1),选择黄河郑州段 4条支流共布设个4采样点(分别为S2-伊洛河河口断面;S5-汜水河河口断面;S8-沁河河口断面;S11-枯河河口断面),在黄河干流设置 8 个采样点(S1,S4,S7,S10 为支流入黄前对照断面;S3,S6,S9,S12 为支流入黄后控制断面).2023 年丰水期和枯水期进行采样,现场采集沉积物样品,密封后做好标记,带回实验室备用.

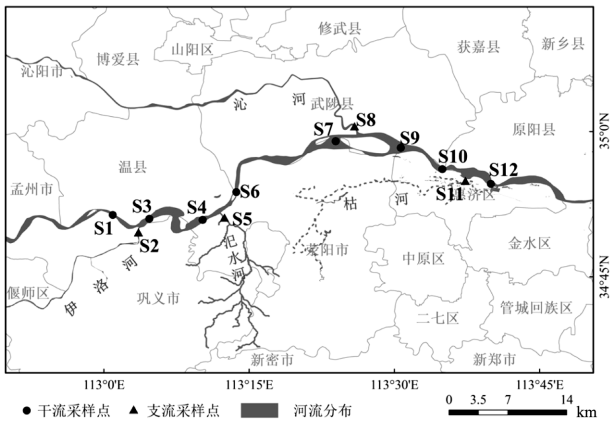



图 1　沉积物样点分布示意

Fig.1　Schematic diagram of the distribution of sediment sampling points

### 1.2　样品处理与分析

1.2.1　微塑料的定量　将待测沉积物样品经烘箱低温烘干至完全干燥,根据实际情况取适量样品于 250mL 烧杯中,编号并准确记录样品重量.选择饱和 NaCl($\rho$=1.21g/cm$^3$)作为浮选剂[24].3 次浮选过后,加入 30%$H_2O_2$ 溶液以去除有机物,后经 1.6μm 玻璃纤维滤膜过滤,收集滤膜.采用体视显微镜“Z”字形观察玻璃纤维滤膜,以便于观察整个滤膜,减小误差.同时,对样品中的疑似微塑料进行识别和拍照,根据照片中物体的颜色、形状、硬度和透明度、表面结构和光滑度等特性判断其是否为微塑料,并按照颜色和形状等进行分类和计数.

1.2.2　微塑料的定性　采用傅里叶变换红外光谱仪对微塑料成分种类进行精确鉴定.利用显微镜将疑似微塑料样品挑至压片器上进行压片,并加载到载物台进行鉴定.将获得的光谱图与 OMNIC 自带的标准聚合物光谱库进行比对,以确定微塑料的聚合物类型.其中,与标准谱有 65%以上的匹配度认定为相应的物质.

### 1.3　质量保证与控制

为避免采样和实验过程中带来外源微塑料污染,采样时使用不锈钢工具,采样人员在采样过程中身着棉质衣物或实验服,且在每个点位采样前后清

洗采样工具,采样完成后将样品用铝箔袋收集密封带回实验室备用.室内分析时,实验人员在实验过程中身着棉质衣物或实验服,实验前使用 Milli-Q 超纯水润洗所有仪器,所有实验所用液体使用前过滤,设置空白对照执行相同操作以估算实验环境中微塑料的背景污染水平,实验过程使用铝箔或盖子遮盖敞口仪器.

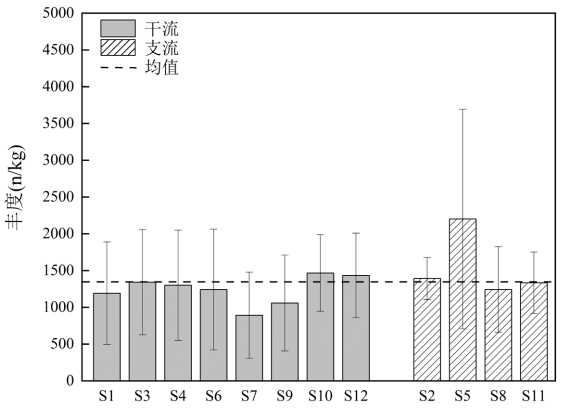
### 1.4 数据分析

采样图使用 ArcGIS 10. 2 软件进行绘制,结果中所涉及的柱状图、箱线图和环形图等使用 Origin 2021 进行处理和绘制,采用 Excel 进行样品的标准偏差统计,在柱状图中以误差棒表示.

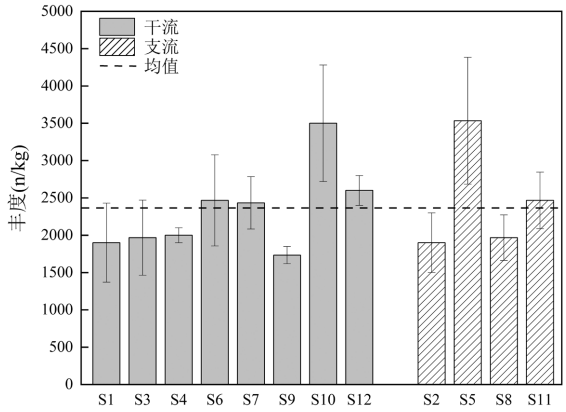
## 2 结果与分析

### 2.1 不同时期微塑料丰度及组成特征

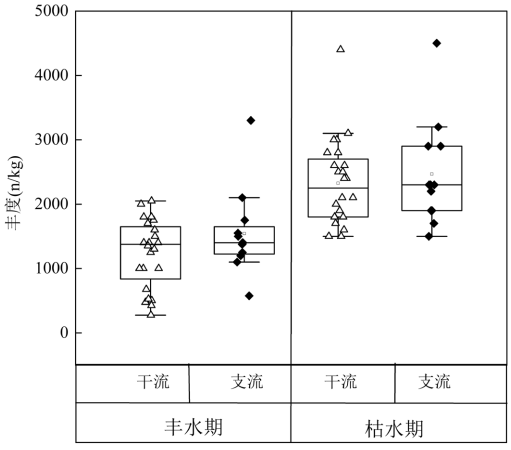
由图 2 可知,黄河郑州段各样点沉积物中微塑料检出率达到 100%.丰水期平均丰度为(1340.97 ± 314.84)n/kg,分布范围在 891.67~2200.00n/kg 之间,其中,样点 S7 微塑料丰度最低,为 891.67n/kg,而 S5 微塑料丰度高达 2200.00n/kg,各样点间微塑料丰度存在异质性,呈现下游>上游,支流>干流的趋势.枯水期平均丰度为(2372.22±604.17)n/kg,分布范围为 1733.33~3533.33n/kg,其中,样点 S9 微塑料丰度最低,为 1733.33n/kg,而 S5 微塑料丰度最高为 3533.33n/kg,呈现下游>上游,支流>干流的趋势.从时间尺度上看,枯水期沉积物微塑料丰度明显高于丰水期;空间对比发现,不同时期均呈现支流>干流的规律.结果显示,干流沉积物微塑料丰度值较支流更集中,微塑料丰度在空间上分布不均,不同时间及不同流域间存在差异.



(a)丰水期



(b)枯水期



(c)不同时期丰度对比

图 2 不同时期微塑料丰度分布示意

Fig.2 Schematic distribution of microplastic abundances in different periods

### 2.2 不同时期微塑料形貌分布特征

**2.2.1 微塑料形状组成及分布特征** 由图 3 可知,纤维是黄河郑州段沉积物微塑料最常见的形状.结果表明,100%的采样点中纤维微塑料分布占比>79%.纤维、碎片、薄膜和颗粒微塑料形状分布差异不明显,各样点均以纤维为主.

**2.2.2 微塑料颜色组成及分布特征** 黄河郑州段沉积物中微塑料检测出透明、黑、红、蓝、绿、黄和其它颜色等,其颜色组成较丰富.由图 4 可知,各样点沉积物中微塑料以黑、蓝和透明为主导色.丰水期黑色占比最高,干流 33.5%,支流 26.1%;其次是蓝色,干流 25.9%,支流 22.8%,透明色也较为常见,干流占比 24.8%,支流 15.1%,值得一提的是,支流中绿色占比高达 20.0%,而干流中仅有 3.9%,且样点 S5 中绿色占比>50%.枯水期蓝色占比最高,干流 30.6%,支流 30.4%;其次是黑色,干流 29.2%,支流 28.4%,干支流颜色分布规律一致,均为蓝>黑>透明>红>其它>绿>黄.

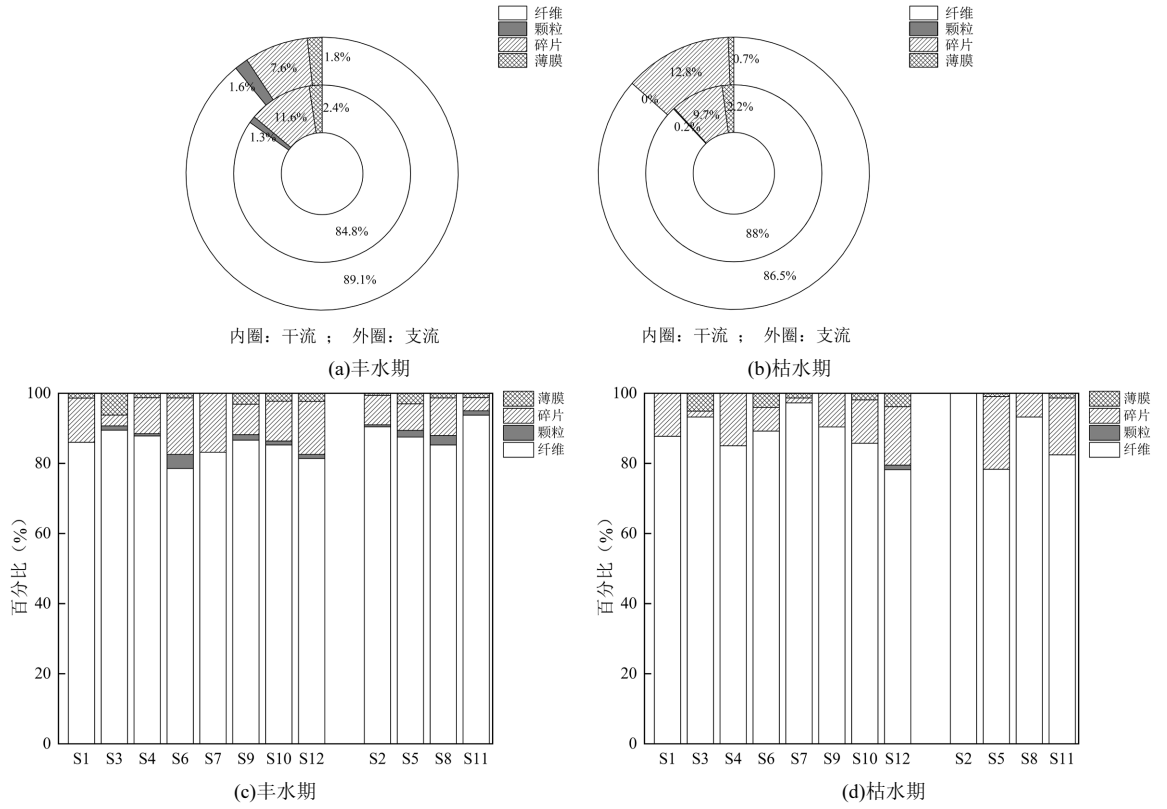



图 3　不同时期微塑料形状分布示意

Fig.3　Schematic distribution of microplastic shapes in different periods

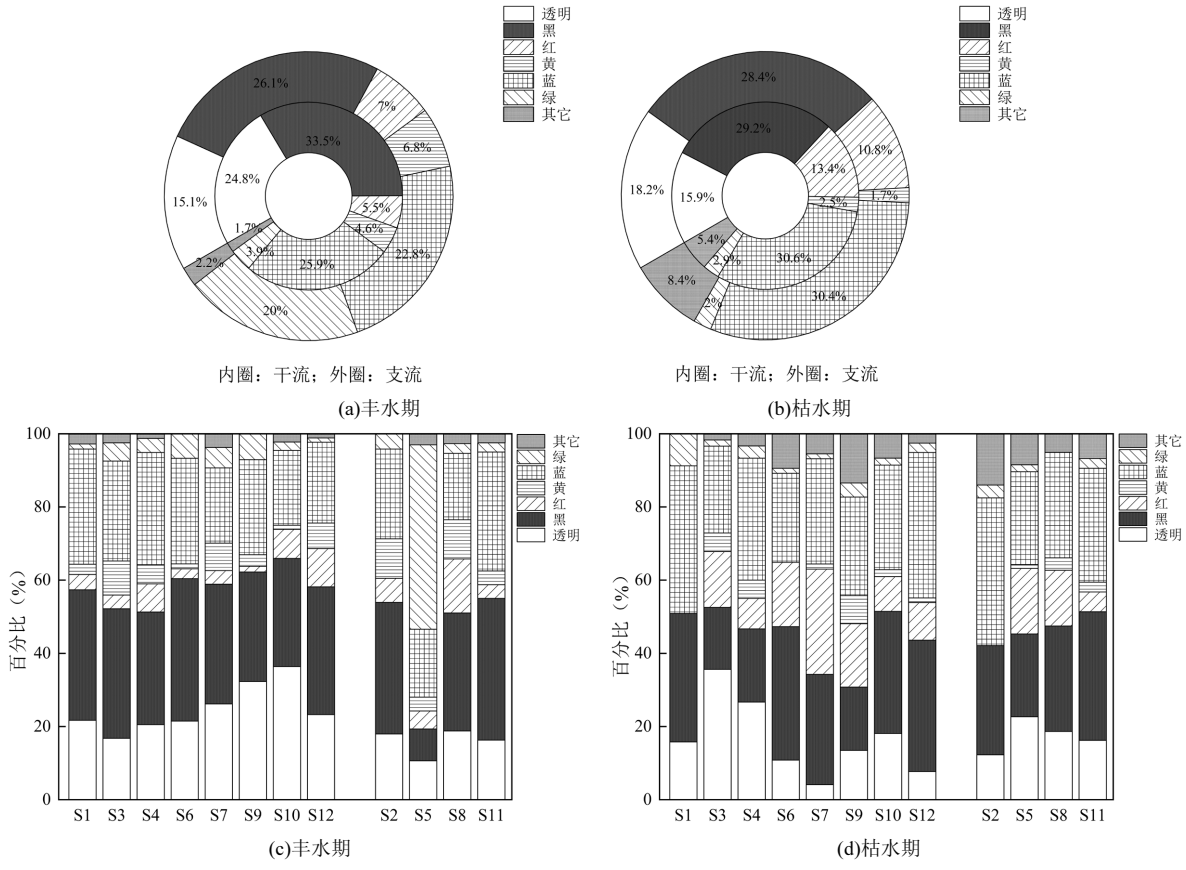



图 4　不同时期微塑料颜色分布示意

Fig.4　Schematic distribution of microplastic colors in different periods

2.2.3 微塑料的尺寸组成及分布特征 将微塑料粒径按<0.5、0.5~1、1~2、2~3 和 3~5mm 共 5 个尺寸进行归类(将<2mm 归为小粒径微塑料).如图 5 所示,各样点的微塑料粒径分布无明显差异,其中粒径<2mm 的小粒径微塑料为主要存在形态.丰水期沉积物中微塑料主要以粒径<0.5(干流 35.9%,支流 33.2%)、0.5~1(干流 32.5%,支流 32.0%)和 1~2mm(干流 20.6%,支流 25.9%)存在.除样点 S7 外,其余样点均有少量大粒径(2~5mm)微塑料检出.枯水期沉积物中微塑料主要以粒径<0.5(干流 39.2%,支流 47.0%)、0.5~1(干流 34.4%,支流 32.1%)和 1~2mm(干流 21.1%,支流 17.9%)存在,与丰水期相比,枯水期大粒径(2~5mm)占比降低,仅有部分样点少量检出.总体上看,黄河郑州段沉积物中小粒径微塑料占比较高,枯水期小粒径占比高于丰水期,不同水域及不同点位间沉积物中微塑料粒径分布有差异.

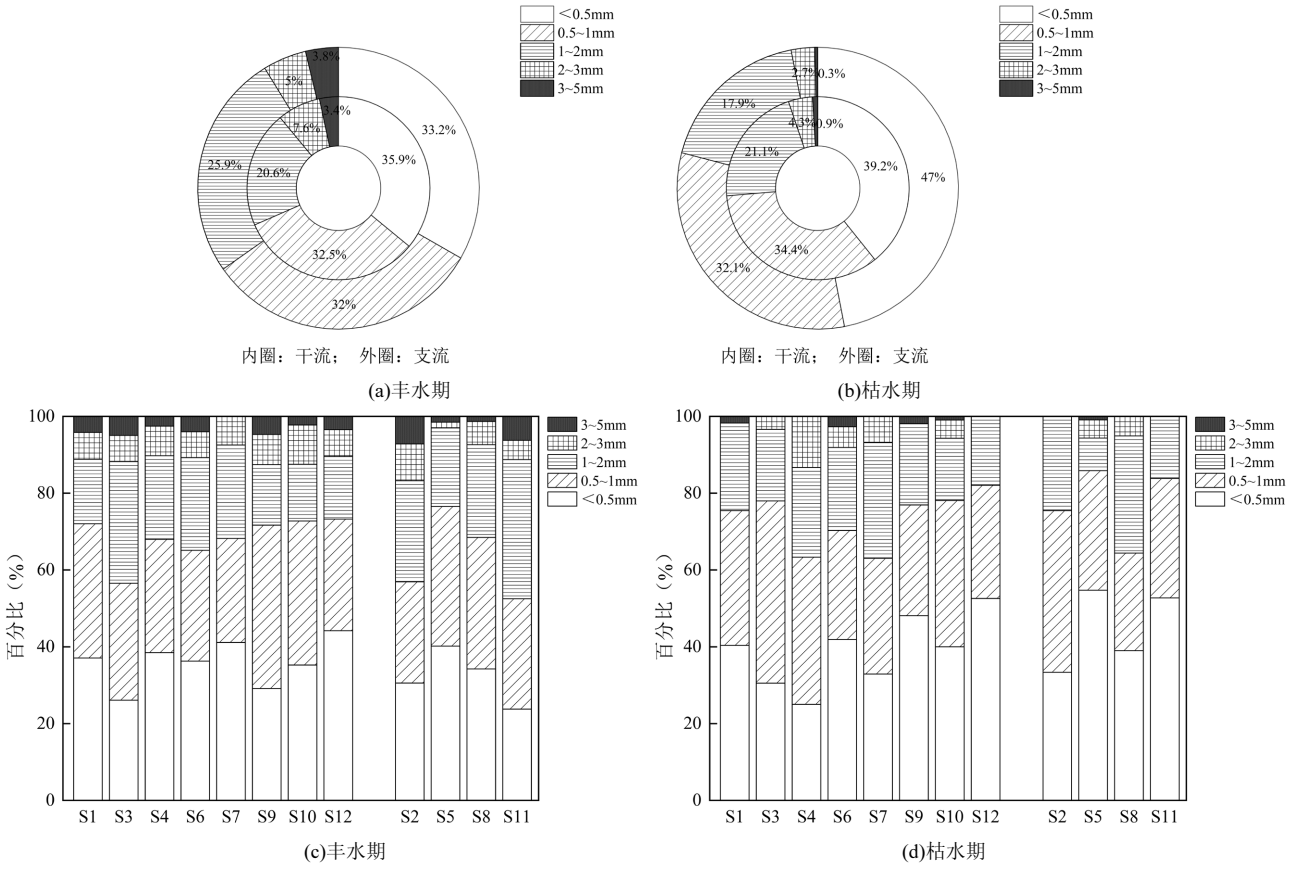



图 5 不同时期微塑料尺寸分布示意

Fig.5 Schematic distribution of microplastic sizes in different periods

2.3 不同时期微塑料种类组成特征

显微傅里叶红外光谱分析结果表明,随机挑选出的疑似微塑料共鉴定出 7 种类型,分别为聚对苯二甲酸乙二醇(PET)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚乙烯醇(PVA)、聚酰胺(PA)、聚丙烯-聚乙烯共混物(PE + PP)和其它,PET 和 PE + PP 为本研究区最常见的类型.如图 6 所示,丰水期沉积物微塑料种类占比最高是 PET,干流 48.1%,支流 60.6%;其次是 PE + PP,干流 19.4%,支流 15.2%;PP 占比最少,仅为干流 1.8%,支流 1.0%;值得一提的是,样点 S6 中 PVA 占比>50.0%,S7 中 PET 占比>80%.枯水期沉积物微塑料种类占比最高的是 PET,干流 55.2%,支流 68.1%;其次是 PE + PP,干流 15.7%,支流 13.2%;PP 占比最少(1.4%),仅在干流出现;样点 S6 和 S7 中 PVA 占比较高.总的来说,黄河流域沉积物微塑料以 PET 和 PE + PP 为主,其中,PET 以纤维为主,绿、蓝和黑色占比居多,主要粒径分布在<2mm.不同水域及不同点位间微塑料种类分布存在差异,与丰水期相比,枯水期的 PET 占比增加,其它种类占比降低.

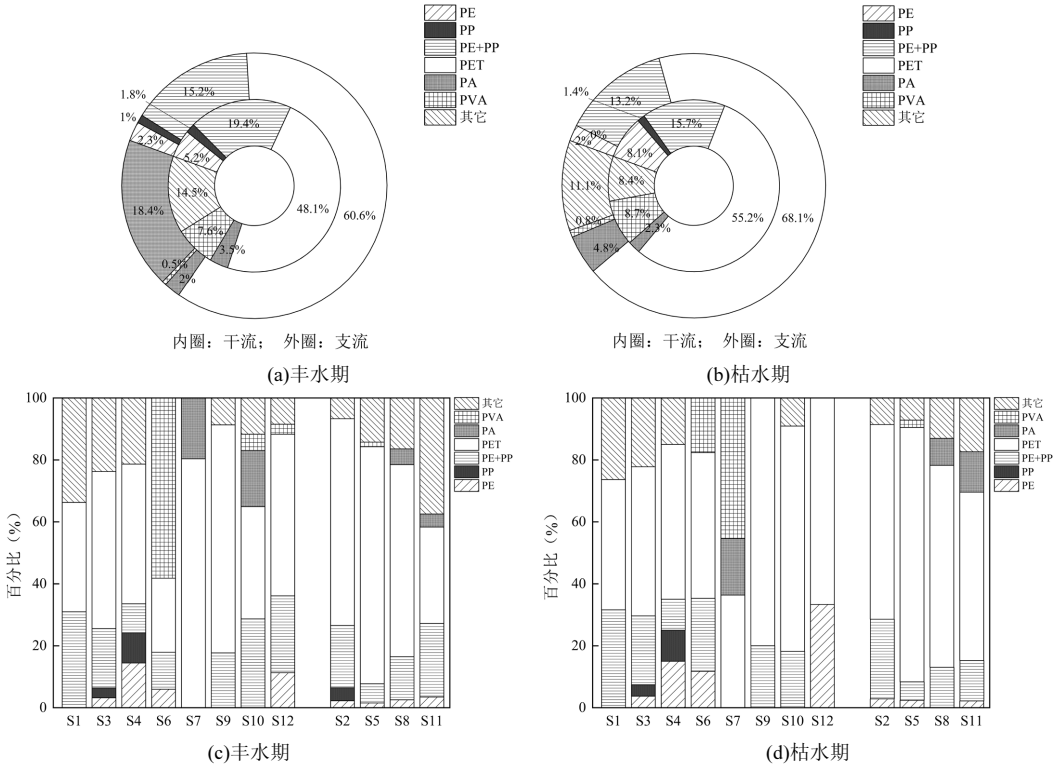
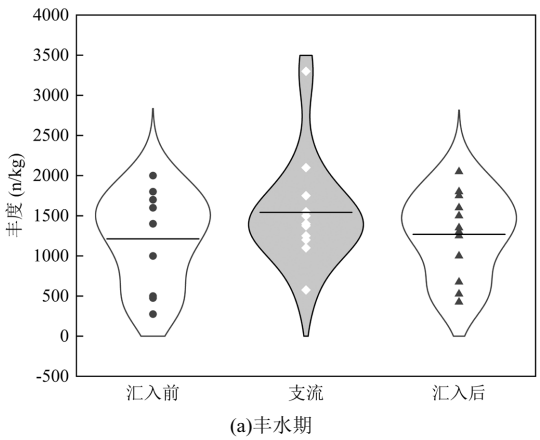



图 6　不同时期微塑料种类组成示意

Fig.6　Schematic composition of microplastic types in different periods

## 2.4　汇流对微塑料污染分布的影响

为探讨汇流对黄河郑州段沉积物微塑料污染分布的影响,对比分析了干流与支流微塑料污染特征分布情况.由图 7 可见,丰水期微塑料丰度平均值呈现支流>汇入后>汇入前,汇入后丰度较汇入前集中;枯水期微塑料丰度平均值呈现为支流>汇入前>汇入后,汇入后丰度较汇入前集中.丰水期和枯水期均表现为支流丰度高于干流,说明支流是干流微塑料的源,而干流作为汇,随着支流水体的汇入,微塑料进入干流并积累.



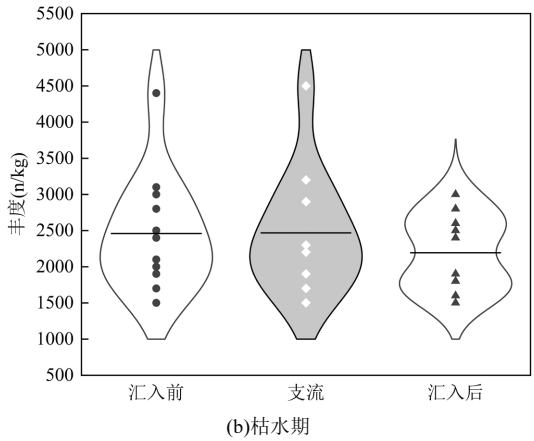




图 7　汇流前后微塑料丰度分布示意

Fig.7　Schematic distribution of microplastic abundances before and after confluence

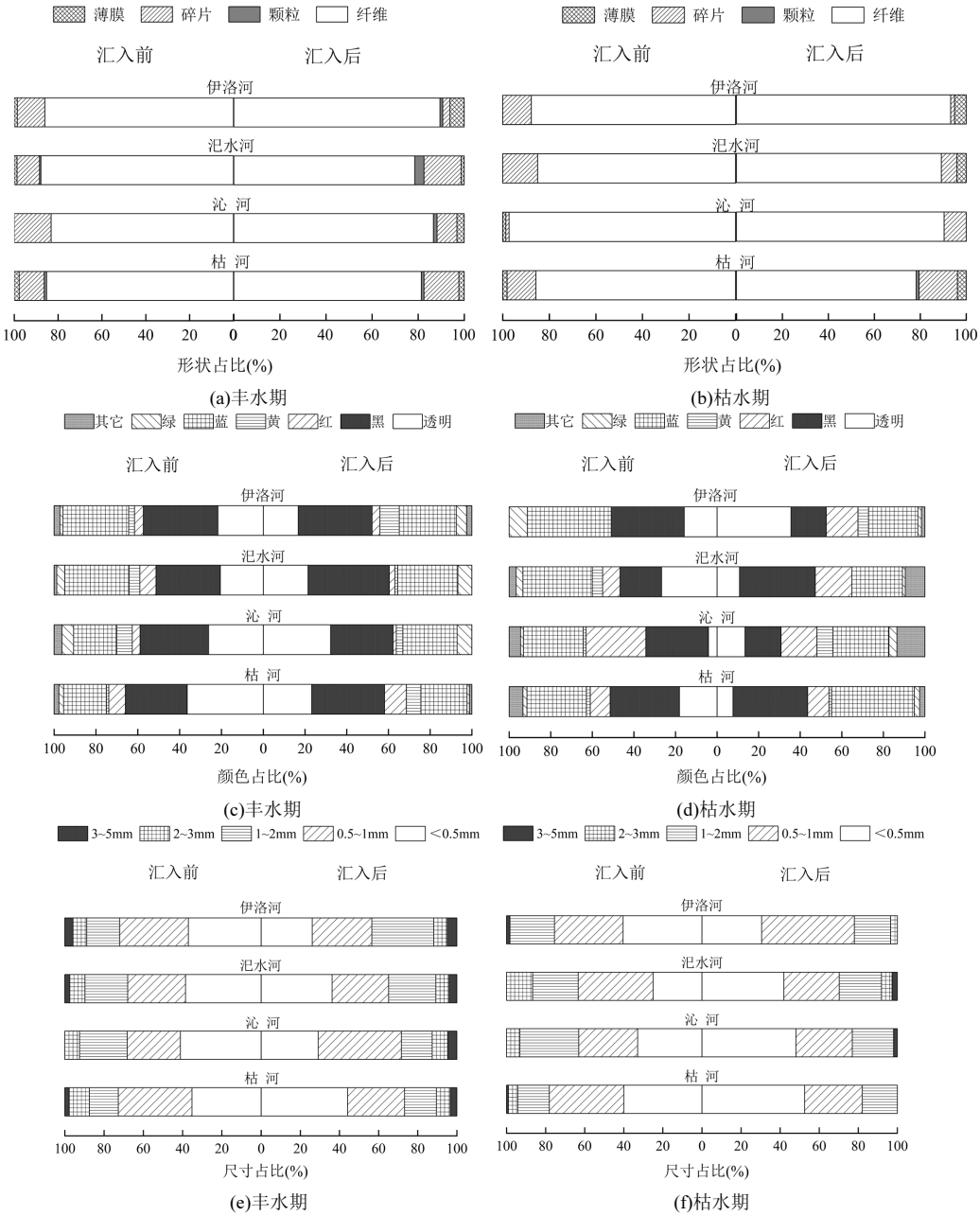
由图 8 可知,干流微塑料形状丰富度在支流汇入后有所增加.丰水期汇入后薄膜和颗粒占比增加,其中,伊洛河和沁河在汇入前无颗粒微塑料检出,汇入后出现了颗粒状微塑料.其余支流也呈现汇入后干流沉积物薄膜和颗粒状微塑料占比增加的趋势.枯水期汇入后薄膜和颗粒占比增加,其中沁河汇入前检出薄膜,汇入后薄膜占比为 0%,伊洛河和汜水河汇入前无薄膜检出,汇入后有少量薄膜.总体上看,

汇流后干流薄膜和颗粒占比有所增加.

支流汇入前后干流沉积物微塑料颜色变化不明显,各颜色微塑料在汇入前后均有检出,丰水期和枯水期均表现为汇入后彩色系(黑、透明除外)占比增加.

支流汇入后干流微塑料大粒径(2~5mm)占比降低.丰水期汇入后粒径变化不明显,大粒径(>2mm)占比对比汇入前仅降低 0.01%;枯水期大粒径占比由汇入前的0.07%降到汇入后的0.03%,对比发现,枯水期汇入后大粒径占比降低度高于丰水期.

随着支流汇入干流,干流微塑料种类组成丰富度及其占比发生变化.丰水期随着支流汇入,干流种类组成丰富度明显增加.其中,伊洛河汇入后干流种类增加了 PP 和 PE,沁河汇入前有 PET 和 PA 检出,汇入后检出 PET、PE+PP 和其它种类微塑料;枯河汇入前后检出种类数量不变.枯水期支流汇入后,干流种类组成丰富度降低.其中,汜水河汇入后,种类组成由 5 种(PP、PE、PET、PE+PP 和其它)减少到 4 种(PET、PVA、PE、PE+PP);沁河汇入前种类检出 PA、PVA 和 PET 3 种微塑料,汇入后仅检出 PET 和 PE+PP 两者;枯河汇入后减少了其它种类微塑料检出.总体上看,丰水期汇流增加了干流微塑料种类丰富度,枯水期汇流降低了干流微塑料种类丰富度.



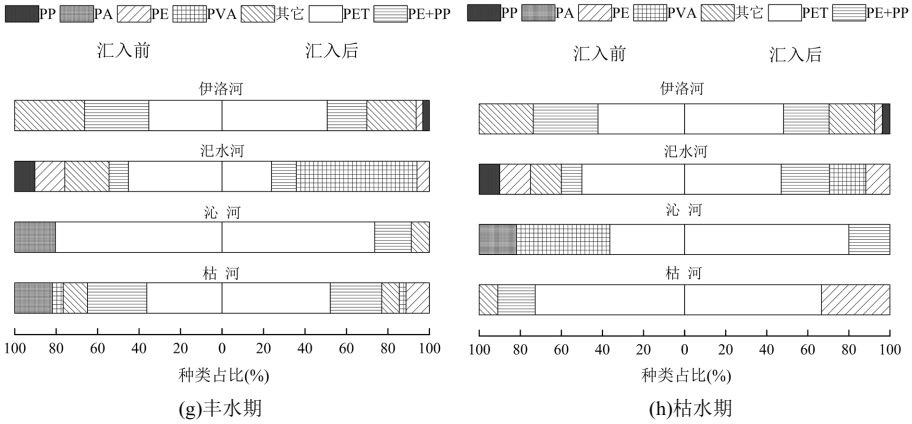



图 8　汇流前后微塑料组成特征示意

Fig.8　Schematic characteristics of microplastic types before and after confluence

## 2.5　微塑料的聚类分析

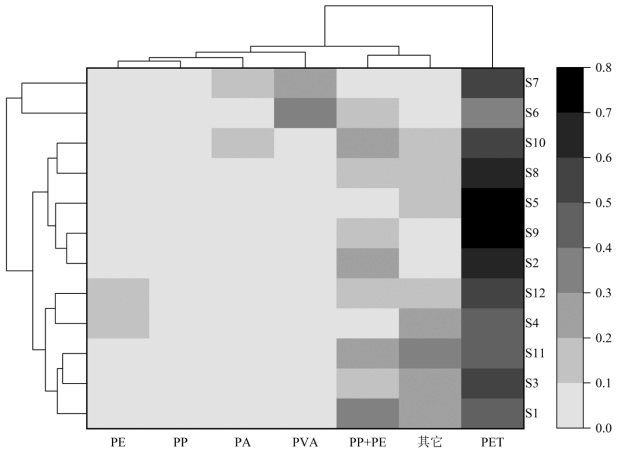



图 9　微塑料种类聚类分析

Fig.9　Clustering analysis of microplastics types

由图 9 可知,根据聚合物类型进行聚类分析,微塑料可分为 2 类和 4 类.2 类的划分中样点 S1、S2、S3、S4、S5、S8、S9、S10、S11 和 S12 点位被归为一类,点位 S6 和 S7 被归为一类;4 类的划分中,S6 归为一类,S7 归为一类,S2、S5、S8、S9 和 S10 为一类,S1、S3、S4、S11 和 S12 归为一类.划分 4 类时,S6 和 S7 都被单独分类,这说明在 S5 汇入后,黄河干流(S7)沉积物种类组成发生了变化,而 S5 为支流(汜水河),在采样时发现周边有频繁的钓鱼活动,岸边有大量人为制造的塑料垃圾,且汜水河流域有居民生活污水排放,这些微塑料随支流汇入干流,使得干流微塑料污染分布发生变化,可见人类活动是影响微塑料污染分布的重要因素;样点 S2、S5 和 S8 被归为一类,同是支流沉积物,说明支流微塑料污染分布与干流相比有所差异.支流流经村庄,且沿途分布各种工农业园区,受人为扰动程度较干流更高.值得一提的是 S1、S4、S3、S11 和 S12 归为一类,样点 S11(支流)位于枯河,由于枯河常年断流,在丰水期时,枯黄交汇处很可能出现倒灌现象,黄河水流入枯河,从而影响其沉积物微塑料污染组成和分布.

## 3　讨论

### 3.1　黄河郑州段微塑料污染特征及来源

黄河郑州段沉积物微塑料平均丰度为丰水期(1340.97±314.84)n/kg,分布范围在 891.67~2200.00n/kg 之间;枯水期(2372.22±604.17)n/kg,分布范围为 1733.33~3533.33n/kg.与国内外其它地区沉积物数据相比,黄河郑州段沉积物中微塑料含量低于北云河[25]、西河[26]、南明河[27]以及中国城市河流[28]等,与亚马逊河[29]的微塑料污染水平相当,总体处于中等污染水平.

支流具有一定的滞留效应.微塑料丰度呈现支流>干流的规律,这与长江流域[30]研究结果一致,研究区域有 4 条支流汇入,其中伊洛河、汜水河和沁河流域聚集了一定量的工厂、工业园区和村庄,枯河附近有黄河滩地公园和龙河生态农庄,有大量游客往来,由此产生工业废水和生活污水排放,污染物进入支流水体并累积,造成污染.研究表明,污水处理过程无法完全截留水体中的微塑料碎片[31],这说明大部分微塑料会通过排污口进入支流水体,支流接纳了大量城镇生活污水、农业弃水和日常废弃塑料制品,如塑料袋、塑料瓶及餐盒等流域污染物,加上周边钓鱼活动频繁可能导致大量渔业工具、渔网和鱼线等

遗弃河流,长此以往,水体环境中微塑料积累,丰度增加.沉积物是水环境中微塑料的汇,且迁移力低,更容易积聚微塑料.下游丰度高于上游,与戴柳云等[18]研究结果一致.人类活动是影响微塑料污染分布的重要原因,沿岸常有野炊、露营和垂钓等休闲娱乐活动,产生的塑料垃圾较多、人为干扰较大.同时,下游在经过支流汇入之后,支流中一部分微塑料进入干流,从而下游丰度高于上游.

**表 1 不同地区沉积物微塑料丰度比较**

Table 1 Comparison of microplastic abundance in sediments from different regions

| 研究区域 | 孔径(μm) | 浮选试剂 | 丰度范围(n/kg) | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| Beas 河 | 0.45 | $ZnCl_2$ | 36~896 | [8] |
| 南明河 | 48 | NaCl、NaI | 870~7500 | [27] |
| 卢瓦尔河 | 0.02 | NaI | 867~10635 | [9] |
| 长江 | — | NaCl、$ZnCl_2$ | 2~621 | [12] |
| 维斯瓦河 | 1.6 | NaCl | 190~580 | [10] |
| Orange-Senqu 河 | 0.2 | $ZnCl_2$ | 38~4000 | [11] |
| 珠江 | 0.45 | NaCl | (2.0~7.75)×10³ | [14] |
| 中国城市河流 | 0.45 | NaCl | 2412~7638 | [28] |
| 西河 | 0.45 | NaCl | 2560~10240 | [26] |
| 北云河 | 10 | $ZnCl_2$ | 7670~29070 | [25] |
| 黄河(兰州段) | 0.45 | NaCl、$CaCl_2$ | 7~144 | [13] |
| 亚马逊河 | 63 | $ZnCl_2$ | 417~2100 | [29] |

人类活动对微塑料污染分布有极大影响.沉积物中微塑料形状以纤维状为主,这与南渡江(58%)[32]、Anchar 湖(91%)[33]、滇池(83.49%)[34]和特拉什湖(79.49%)[35]等研究调查结果类似.而鄱阳湖表层沉积物中观察到较多的碎片状微塑料[36].由于研究区域有频繁的钓鱼活动,从而使渔网和鱼线等在环境中大量分布,后经过磨损、分解成纤维状微塑料,增加了纤维在河流水环境中的数量,最后沉降进入沉积物中;其次沿河有农田土壤需要长期耕作、灌溉和施肥等,从而产生纺织品、绑绳、肥料袋及遮阳网等纤维状微塑料,降雨后地面形成地表径流,雨水冲刷和径流使得沿岸土壤中的微塑料向河流方向运输,最后沉降到河底沉积物;最后,水流流经村庄,有大量居民居住,洗涤衣物废水和生活污水排入支流后汇入干流,使得干流中纤维比例增加.

颜色以黑(29.8%)、蓝(27.5%)和透明(19.0%)为主,这与阳宗海等[37]调查结果一致.研究表明,渔业湖泊中透明微塑料多来源于渔网、鱼线等渔业工具,而蓝色微塑料既可来源于渔业工具,又可来源于服装、塑料袋及包装袋等众多彩色塑料制品.S5 出现了大量的绿色纤维状微塑料,采样时发现在 S5 附近有人垂钓,且渔网以白、绿色居多,因此推断与频繁垂钓有较大关系.河岸带沿途景区大量游客携带各种食品袋和包装袋,这些塑料袋颜色丰富,在使用过程中破碎或使用后被随意丢弃,进入水环境中积累并沉积到河底,可能是蓝色微塑料较多的原因.微塑料在自然环境中受到物理、化学和生物作用等而产生褪色、氧化,导致原始颜色类型发生改变,从而变得透明,这可能也是透明微塑料占比较高的原因.游客驾车出行,且沿河有桥梁连通两岸,车辆频繁通过,而汽车轮胎磨损会产生大量塑料碎片[38],在气流作用下运输,最后通过大气沉降进入河流,而这可能是黑色塑料的来源.

粒径较小的微塑料颗粒能更有效的留存在河流沉积物中.粒径主要集中于<0.5mm (38.2%)和0.5~1mm(32.9%),与大多数研究结果相似,如<0.5mm 是渭河微塑料的主要尺寸[39],为 68.1%,汉江上游粒径在 0.1~0.5mm 的微塑料占 50%以上[40].颗粒粒径是表征微塑料沉降的重要因素[41].粒径小的微塑料具有更大的比表面积,从而为生物附着提供了更多的位点.因此,小粒径(<2mm)的微塑料颗粒更容易在沉积物中沉淀,导致沉积物中小粒径微塑料比例高.此外,由于小粒径的微塑料在大型悬浮固体表面的稳定性和吸附性较差,因此与大粒径的微塑料相比,小粒径的微塑料更倾向于同质和异质聚集[42-43].聚集可以增加微塑料的粒径和密度,从而加速颗粒向沉积物上的聚集.

聚合物类型主要以 PET 和 PE + PP 为主,PET 广泛应用于包装领域,如果汁、饮用水和饮料等的瓶身包装,在纤维领域被大量用于纺织工业,制成各种纺织品和服装等.在研究区域内有村民居住,衣物洗涤和农用地膜废水的排放导致 PET 碎片随污水排入河流,且 PET 密度较大(1.38g/cm$^3$),在水环境中更容易沉降到沉积物中.而沉积物中 PE + PP 聚合物等低密度聚合物占比较高,可能是受近年疫情爆发的影响,人们大范围、长时间的使用口罩、防护服等医疗用品,由于时间较短无法降解完全,从而导致其在环境中大量存在,且在沉积过程中,微塑料表面不断风化、老化,吸附周围环境中的有机物,促进了其表

面微生物的增殖,使得整体密度增大,更多的向沉积物迁移.同时风、浪、流引起的水湍流会导致水柱中更多的垂直运动,促进了微塑料的沉积作用[44].

### 3.2　汇流对微塑料污染分布的影响

微塑料丰度平均值在丰水期为支流>汇入后>汇入前;枯水期为支流>汇入前>汇入后,不同时期均表现为支流丰度高于干流.研究表明,长江流域支流滞留效应明显,使得支流微塑料丰度显著高于干流,说明支流是干流微塑料的源,而干流作为汇,随着支流水体的汇入,微塑料进入干流并积累,人类活动对微塑料的空间分布有极大影响[45].支流流域内有生活污水和工业废水排放现象,且支流汇入口频繁有人垂钓,这些人为产生的大量微塑料进入支流水体,在水流交汇作用下,再一次进入干流水体,进一步沉降到沉积物中,使得干流沉积物中分布大量微塑料,因此,丰水期时丰度呈支流>汇入后>汇入前规律.同时,频繁垂钓会带动沉积物中的微塑料再一次进入水体,进而汇入干流,而丰水期时垂钓频繁,与枯水期相比,受人为扰动影响更大,这也解释了为什么在枯水期随着汇入水量减少,汇入后丰度小于汇入前.

人类活动强度对微塑料形状和粒径分布起着重要作用.支流汇入后干流微塑料形状丰富度增加,薄膜和颗粒占比增加.支流区域有大量村民居住,农田耕作面积大,农业生产活动中常用到地膜.研究表明,农用地膜是薄膜状微塑料的主要来源[46],因此,汇入后薄膜状微塑料占比增加.塑料碎片随水流方向移动过程中受多种作用力而再次破碎、分解,如沙砾磨损和生物作用等,因此,在汇入后干流中颗粒状微塑料增加.支流汇入后干流小粒径(<2mm)微塑料占比增加.高强度的人类活动会加速塑料制品的破碎过程,支流流域居住大量村民,有大面积农田耕作以及大范围的工业生产,可见其人类活动强度比干流高,更容易赋存小粒径微塑料,因此汇流后小粒径占比增加.同时,大粒径团聚体在经过汇流后会破碎为更小粒径的团聚体,进而发挥运输作用,这也说明了汇流作用对干流粒径分布产生的影响.

支流汇入后干流沉积物微塑料颜色彩色系(黑和透明除外)占比增加.从时间上看,在丰水期时,汜水河汇入后干流绿色微塑料占比高于汇入前,而在枯水期,汜水河汇入后绿色微塑料占比低于汇入前,说明丰水期时,大量绿色微塑料随支流汇入干流,并沉降进入沉积物.同时,汜水河附近垂钓捕鱼频繁,且PET 是制作绿色鱼线渔网的原材料.另外,支流流域微塑料污染源种类较多,如工业生产、生活垃圾、各种颜色的衣物洗涤等都是彩色微塑料的潜在来源.支流作为干流的源,源源不断的向干流运输各种彩色微塑料.

## 4　结论

4.1　黄河郑州段沉积物微塑料丰度分布在空间上具有异质性.从时间上看,枯水期>丰水期,在空间上均呈支流>干流的趋势;丰水期和枯水期微塑料形状均以纤维状为主;颜色以黑、蓝和透明为主;粒径集中分布在<2mm;PET 和 PE + PP 是主要聚合物类型.人类活动是影响微塑料空间分布的重要原因.

4.2　汇流对黄河郑州段沉积物微塑料污染分布有明显影响.丰度在不同时期变化不同,丰水期为支流>汇入后>汇入前,枯水期为支流>汇入前>汇入后;汇流后形状组成丰富度增加;彩色系(黑、透明除外)占比增加;小粒径(<2mm)占比增加;种类组成丰富度变化为丰水期为汇入后>汇入前,枯水期为汇入前>汇入后.支流受人为扰动程度较干流高,汇流后改变了干流沉积物中微塑料的分布和组成.

**参考文献:**


[1] Macleod M, Arp H P H, Tekman M B, et al. The global threat from plastic pollution [J]. Science, 2021,373(6550):61−65.

[2] Yuan Z, Li H X, Lin L, et al. Occurrence and human exposure risks of atmospheric microplastics: a review [J]. Gondwana Research, 2022, 108:200−212.

[3] Meizoso−regueira T, Fuentes J, Cusworth S J, et al. Prediction of future microplastic accumulation in agricultural soils [J]. Environmental Pollution, 2024,359:124587.

[4] Dar M A, Palsania P, Satya S, et al. Microplastic pollution: a global perspective in surface waters, microbial degradation, and corresponding mechanism [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,210: 117344.

[5] He S, Ye Y, Cui Y, et al. Different wetting states in riparian sediment ecosystems: response to microplastics exposure [J]. Water Research, 2024,270:122823.

[6] Vethaak A D, Legler J. Microplastics and human health [J]. Science, 2021,371(6530):672−674.

[7] 王润东,胡　纯,黄晨欣,等.微塑料在长三角典型流域地表水中的赋存特征、驱动因素及风险评估 [J]. 环境科学, 2025,46(4):2206−2217.
Wang R D, Hu C, Huang C X, et al. Appearance characteristics, drivers and risk assessment of microplastics in surface water in typical

river basins in the Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2025,46(4):2206−2217.

[8] Bhaduri R N, Sinha S, Guererro A M, et al. Microplastic contamination and environmental risks in the Beas River, western Himalayas [J]. Environmental Pollution, 2024,365:125387.

[9] Croiset C, Dhivert E, Phuong N N, et al. Exploring possible controlling factors of spatial distribution of microplastics in sediments of a river segment (Loire River, France) [J]. Science of the Total Environment, 2024,956:177328.

[10] Sekudewicz I, Dąbrowska A M, Syczewski M D. Microplastic pollution in surface water and sediments in the urban section of the Vistula River (Poland) [J]. Science of the Total Environment, 2020,762: 143111.

[11] Graham P M, PattinsonA N B, Bakir A, et al. Determination of microplastics in sediment, water, and fish across the Orange−Senqu River basin [J]. Water Research, 2024,266:122394.

[12] Yang H, Sun F, Liao H, et al. The pollution of microplastics in sediments of the Yangtze River basin: occurrence, distribution characteristics, and basin−scale multilevel ecological risk assessment [J]. Water Research, 2023,243:120322.

[13] Zhou T, Min R, Yang S, et al. Distribution of microplastics in Lanzhou section of the Yellow River: characteristics, ecological risk assessment, and factors analysis [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,207:116900.

[14] Xu K, Shahab A, Rinklebe J, et al. Spatial distribution, morphology, and risk assessment of microplastics in sediment from the Pearl River Estuary, China [J]. Emerging Contaminants, 2024,10(3):100383.

[15] Gonzalez P M, Edo C, Velazquez D, et al. First detection of microplastics in the freshwater of an antarctic specially protected area [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020,161(Pt):111811.

[16] Dhineka K, Mishra P, Ikenoue T, et al. Arctic threads: Microplastic fibres in Chukchi and Beaufort sea sediments [J]. Marine Pollution Bulletin, 2024,208:116954.

[17] Laermanns H, Reifferscheid G, Kruse J, et al. Microplastic in water and sediments at the confluence of the Elbe and Mulde Rivers in Germany [J]. Frontiers in Environmental Science, 2021,9.

[18] 戴柳云,侯 磊,王 化,等.汇流对洱海罗时江小流域水体微塑料污染的影响 [J/OL]. 环境科学, 2024,doi:10.13227/j.hjkx.202404309.
Dai L Y, Hou L, Wang H, et al. Effect of confluence on microplastic pollution in Erhai Lake [J/OL]. Environmental Science, 2024,doi:10.13227/j.hjkx.202404309.

[19] Xiong J, Li Z, Wang X, et al. Migration, distribution and influencing factors of microplastics at the confluence of pipe and channel [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2024,235(11):716−716.

[20] Da C I D, Costa L L, Zalmon I R. Microplastics in water from the confluence of tropical rivers: overall review and a case study in paraiba do sul river basin [J]. Chemosphere, 2023,338:139493.

[21] 曹力玮,谌昱含,高玮峥,等.交汇区的交汇角和汇流比对微塑料运移的影响 [J]. 中国环境科学, 2025,45(1):265−277.
Cao L W, Chen Y H, Gao W Z, et al. The influence of confluence angle and flow ratio on microplastic transport in the confluence zone [J]. China Environmental Science, 2025,45(1):265−277.

[22] 谌 霞,李德鸿,蔡焕杰,等.中国河流及湾区河口中微塑料的赋存输运特性 [J]. 中国环境科学, 2024,44(11):6341−6353.
Chen X, Li D H, Cai H J, et al. The occurrence and transport characteristics of microplastics in Chinese rivers and bay area estuary [J]. China Environmental Science, 2024,44(11):6341−6353.

[23] Zhou Z, Zhang P, Zhang G, et al. Vertical microplastic distribution in sediments of Fuhe River estuary to Baiyangdian wetland in northern China [J]. Chemosphere, 2021,280:130800.

[24] Blumenroder J, Sechet P, Kakkonen J E, et al. Microplastic contamination of intertidal sediments of scapa flow, orkney: a first assessment [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017,124(1):112−120.

[25] Yang N, Zhang Y, Yang N, et al. Distribution characteristics and relationship of microplastics, phthalate esters, and bisphenol a in the Beiyun River basin of Beijing [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,480:136190.

[26] Huang D, Li X, Ouyang Z, et al. The occurrence and abundance of microplastics in surface water and sediment of the West River downstream, in the south of China [J]. Science of the Total Environment, 2020,756:143857.

[27] Zhou J, Liu X, Li W, et al. Characteristics, sources, and distribution of microplastics in sediments and their potential ecological risks: a case study in a typical urban river of China [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024,12(6):114575.

[28] Song D, Shang Y, Wang X, et al. Microplastic and heavy metals distributions in urban rivers sediments, China [J]. Journal of Ocean University of China, 2024,23(4):1015−1025.

[29] Gerolin C R, Pupim F N, Sawakuchi A O, et al. Microplastics in sediments from Amazon rivers, Brazil [J]. Science of the Total Environment, 2020,749:141604.

[30] 李思琼,王 华,储林佑,等.长江流域微塑料污染特征及生态风险评价 [J]. 环境科学, 2024,45(3):1439−1447.
Li S Q, Wang H, Chu L Y, et al. Characteristics of microplastic pollution and ecological risk assessment in the Yangtze River basin [J]. Environmental Science, 2024,45(3):1439−1447.

[31] 赵思凯,刘沅鑫,梁 越,等.水厂消毒工艺中微塑料的赋存特征、去除效果及潜在风险 [J/OL]. 中国环境科学, 2024,doi:10.19674/j.cnki.issn1000−6923.20241011.005.
Zhao S K, Liu Y X, Liang Y, et al. Appearance characteristics, removal effects and potential risks of microplastics in the disinfection process of water plant [J/OL]. China Environmental Science, 2024,doi:10.19674/j.cnki.issn 1000−6923.20241011.005.

[32] 莫孙伟,吴思怡,熊曾恒,等.南渡江入海河口水体中微塑料污染特征及风险评估 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(5):714−720.
Mo S W, Wu S Y, Xiong Z H, et al. Characteristics and risk assessment of microplastic pollution in the mouth of Nandu River [J]. Environmental Pollution and Control, 2024,46(5):714−720.

[33] Neelavannan K, Sen I S, Lone A M, et al. Microplastics in the high−altitude himalayas: assessment of microplastic contamination in freshwater lake sediments, Northwest Himalaya (India) [J]. Chemosphere, 2021,290:133354.

[34] 袁志伟,李 菊,邓春暖,等.滇池表层沉积物中微塑料的空间分布及来源分析 [J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023,38(3):503−510.
Yuan Z W, Li J, Deng C N, et al. Spatial distribution and source analysis of microplastics in surface sediments of Dianchi Lake [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023,

38(3):503−510.

[35] 孙雪纯,侯书贵,黄壬晖,等.可可西里特拉什湖中微塑料污染特征、来源和生态风险 [J]. 环境科学学报, 2023,43(2):231−240.
Sun X C, Hou S G, Huang R H, et al. Characteristics, sources and ecological risks of microplastics in lake [J]. Journal of Environmental Science, 2023,43(2):231−240.

[36] Jian M, Zhang Y, Yang W, et al. Occurrence and distribution of microplastics in China's largest freshwater lake system [J]. Chemosphere, 2020,261:128186.

[37] 袁志伟,李　菊,陈　郸,等.阳宗海表层沉积物和农田土壤微塑料的赋存差异及来源 [J]. 环境科学与技术, 2023,46(12):151−159.
Yuan Z W, Li J, Chen D, et al. The occurrence difference and source of surface sediment and farmland soil microplastics in Yangzonghai [J]. Environmental Science and Technology, 2023,46(12):151−159.

[38] 张泰硕,商静静,刘海勇,等.不同环境介质轮胎微塑料老化及小粒径微粒释放特征 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3700−3707.
Zhang T S, Shang J J, Liu H Y, et al. Characteristics of microplastic aging and small particle release in different environmental media [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3700−3707.

[39] Ding L, Mao R F, Guo X, et al. Microplastics in surface waters and sediments of the Wei River, in the northwest of China [J]. Science of the Total Environment, 2019,667:427−434.

[40] 宋凤敏,李巧云,莫子龙,等.汉江上游水体沉积物中微塑料赋存特征与生态风险评价 [J]. 环境科学学报, 2025,45(1):238−247.
Song F M, Li Q Y, Mo Z L, et al. Evaluation of microplastic occurrence characteristics and ecological risk in the upper reaches of the Han River [J]. Journal of Environmental Science, 2025,45(1):238−247.

[41] Liu S, Huang Y, Luo D, et al. Integrated effects of polymer type, size and shape on the sinking dynamics of biofouled microplastics [J]. Water Research, 2022,220:118656.

[42] Goral K D, Guler H G, Larsen B E, et al. Settling velocity of microplastic particles having regular and irregular shapes [J]. Environmental Research, 2023,228:115783.

[43] Khatmullina L, Isachenko I. Settling velocity of microplastic particles of regular shapes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2017,114(2):871−880.

[44] 耿　凤.微塑料在全球水体及沉积物中的分布及污染特征 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.
Geng F. Distribution and pollution characteristics of microplastics in global water bodies and sediments [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.

[45] Yu H, Shao J, Jia H, et al. Characteristics and influencing factors of microplastics in snow in the Inner Mongolia Plateau, China [J]. Engineering, 2023,37:69−77.

[46] 马　贵,丁家富,周　悦,等.固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估 [J]. 环境科学, 2023,44(9):5055−5062.
Ma G, Ding J F, Zhou Y, et al. Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in farmland soil in Guyuan City [J]. Environmental Science, 2023,44(9):5055−5062.

**作者简介：**张发文(1981−),男,河南信阳人,副教授,博士,主要从事新污染物的行为特征及风险评价等研究.发表论文 30 余篇.zhangfawen@henau.edu.cn.