

# 地表水与地下水交互作用对水环境质量的影 响机制

周一萍

南阳生态环境局镇平分局 河南 南阳 474250

**摘 要：**地表水与地下水作为水循环系统中的两个关键组成部分，其交互作用不仅调控着区域水资源的时空分布，更深刻影响着水环境质量。随着人类活动强度的加剧和气候变化的持续影响，地表水-地下水交互过程日趋复杂，对水质安全构成潜在威胁。本文系统梳理了地表水与地下水交互的基本模式（包括补给、排泄及双向交换），深入剖析了交互过程中污染物迁移转化的关键机制，重点探讨了氮、磷、重金属、有机污染物及新兴污染物（如抗生素、微塑料）在交互界面的运移行为。同时，分析了农业面源污染、城市污水排放、矿山排水及海水入侵等人类活动如何通过改变交互关系进而影响水质。最后，本文提出应加强多尺度监测网络建设、发展耦合数值模拟技术、完善基于交互过程的水质管理策略，以实现水环境质量的可持续保障。本研究旨在为水生态保护、污染防控及水资源综合管理提供科学依据。

**关键词：**地表水；地下水；交互作用；水环境质量；污染物迁移；界面过程

## 引言

地表水（如河流、湖泊、水库）与地下水（赋存于含水层中的水体）虽形态各异，却通过水力联系紧密耦合，共同构成一个动态、开放的水文系统。二者之间的水量交换——即地表水-地下水交互作用不仅是区域水循环的核心环节，更是决定水环境质量演变的关键过程。传统水环境管理常将地表水与地下水视为独立系统，分别制定水质标准与治理措施。然而，大量研究表明，这种割裂式管理忽视了二者之间复杂的物质能量交换，难以有效应对跨界污染、滞后效应及复合污染等问题。例如，地表水中的污染物可通过渗漏进入地下水，造成难以修复的长期污染；反之，受污染的地下水排入河流，亦可导致地表水水质恶化，形成“二次污染”。尤其在干旱半干旱地区、河岸带、滨海地带及城市化区域，交互作用更为活跃，水质风险显著升高。近年来，随着高精度监测技术、同位素示踪方法及耦合数值模型的发展，学界对SW-GW交互过程的认识不断深化。然而，关于交互作用如何具体调控污染物迁移路径、转化效率及生态风险，仍存在诸多科学空白。特别是在全球变化与高强度人类活动叠加背景下，交互机制的非线性响应特征亟待揭示。

## 1 地表水与地下水交互作用的基本模式与驱动机制

### 1.1 交互作用的基本类型

地表水与地下水之间的交互并非单向或静态的过程，而是呈现出高度动态性和空间异质性。在自然条件下，最常见的交互形式包括地表水补给地下水、地下水排泄至地表水以及二者之间的双向交换。当地表水位高

于邻近含水层的地下水位时，河水或湖水会通过渗透作用穿过河床或湖底沉积物进入地下含水层，这一过程被称为地表水对地下水的补给，在丰水期或上游冲积扇区域尤为显著<sup>[1]</sup>。相反，当区域地下水位因长期蓄积而高于地表水体时，地下水便会以基流的形式持续排入河流或湖泊，成为维持枯水期生态流量的重要来源。而在许多河岸带或季节性河流中，交互方向会随水文条件发生周期性反转，形成日尺度或季节尺度的双向交换格局。这种动态交换不仅调节了区域水量平衡，也为污染物在两相介质间的迁移提供了复杂通道。

### 1.2 驱动因素

地表水与地下水交互作用的强度与方向受到自然与人为双重因素的共同调控。自然驱动主要包括气候水文条件、地形地貌特征及地质构造背景。降水事件可迅速抬升地表水位并增强入渗，而持续干旱则可能导致地下水位下降，削弱甚至逆转原有的排泄关系。河谷坡度、河床渗透系数及含水层导水能力决定了水流交换的通量大小，而隔水层的分布或断层的存在则可能阻断或引导水流路径。与此同时，人类活动正以前所未有的强度重塑这一自然过程。大规模地下水开采常导致区域性水位降落漏斗，使原本由地下水补给的地表水体转为接受地表水补给，甚至出现河流断流现象；水利工程如水库蓄水虽可增强对周边地下水的补给，但渠道衬砌等防渗措施却显著削弱了天然交换；城市扩张带来的不透水地表增加减少了雨水入渗，而农业灌溉回渗则在局部区域强化了地下水补给。这些人为干预不仅改变了交互的水动力条件，也间接影响了污染物在界面区域的迁移与转化

行为。

## 2 交互作用对水环境质量的影响机制

### 2.1 物理过程：水流路径与滞留时间调控

在地表水与地下水交互界面，特别是河床沉积物和潜流带（hyporheic zone）中，水流路径呈现高度复杂的空间结构。水体在此区域发生垂向下渗与侧向回流，形成涡旋、滞留区与优先流通道共存的三维流场。污染物随水流迁移时，其浓度分布不仅受达西流速控制，还受到弥散、吸附及滞留时间的综合影响。其中，滞留时间——即水体在交互带内停留的平均时长——是决定污染物能否被有效净化的关键参数。较长的滞留时间有利于微生物降解、化学沉淀等自然净化过程的发生，例如硝酸盐在潜流带中的反硝化效率通常随滞留时间延长而提高<sup>[2]</sup>。然而，若河床存在裂缝、植物根孔或人工管道等优先流路径，污染物可能绕过主要反应区，快速穿透至深层含水层，造成“短路污染”，显著降低系统的自净能力。因此，交互界面的物理结构不仅决定了水流的时空分布，也直接调控着污染物的迁移路径与暴露风险。

### 2.2 化学过程：氧化还原条件与吸附-解吸平衡

交互带往往存在强烈的地球化学梯度，尤其是在溶解氧（DO）、氧化还原电位（Eh）和pH值等方面，这些梯度主导了污染物的形态转化、稳定性及迁移能力。以氮素为例，在靠近地表水的富氧区域，氨氮易被硝化细菌转化为硝酸盐；而随着水流深入缺氧的潜流带或含水层，硝酸盐则可能在反硝化菌作用下还原为氮气，实现脱氮。然而，这一过程高度依赖于碳源的可利用性及是否存在硫酸盐等竞争性电子受体，若条件不满足，硝酸盐将累积并随地下水迁移。磷的行为则主要受铁铝氧化物吸附-解吸平衡控制：在氧化环境中，磷酸盐被强烈吸附于铁氧化物表面而固定；一旦进入还原环境（如地下水排泄区），Fe(III)被还原为Fe(II)，导致矿物结构破坏，磷酸盐随之释放，可能引发下游水体富营养化。重金属的迁移同样受Eh-pH耦合控制，例如六价铬（Cr(VI)）在氧化条件下高度可溶且具强毒性，但在还原环境中可被还原为三价铬（Cr(III)）并形成氢氧化物沉淀，从而降低其环境风险。值得注意的是，交互过程中氧化还原条件的动态波动可能导致重金属反复溶解与再沉淀，形成间歇性污染脉冲，增加水质管理的不确定性。

### 2.3 生物过程：微生物介导的污染物降解

交互界面不仅是水文地球化学反应的热点区域，也是微生物群落高度活跃的“天然生物滤池”。丰富的有机质、多样的微生境以及稳定的水动力条件为微生物

降解污染物提供了理想环境。在好氧条件下，苯系物、酚类等有机污染物可被高效矿化；在厌氧环境中，氯代烃、硝基芳烃等难降解物质亦可通过还原脱氯或共代谢途径逐步分解。近年来，随着药物与个人护理品（PPCPs）等新兴污染物的广泛检出，交互带在抗生素归趋中的作用备受关注。尽管地表水中的抗生素浓度在渗滤过程中有所衰减，但低剂量残留仍可能诱导抗性基因（ARGs）的水平转移，使交互带成为抗性污染扩散的潜在温床<sup>[3]</sup>。此外，病原微生物如大肠杆菌在渗滤过程中可通过捕食、竞争及不利环境条件而灭活，但病毒因粒径小、表面电荷弱、吸附能力差，穿透风险更高。值得警惕的是，交互过程有时也会诱发次生污染。例如，地表水中富含的溶解性有机质（DOM）进入含铁或含锰的含水层后，可作为电子供体促进Fe(III)/Mn(IV)氧化物的还原溶解，从而释放吸附态的砷、铅等有毒元素，造成水质的二次恶化。

## 3 典型人为干扰下的水质响应

### 3.1 农业面源污染：氮磷的“双向输移”

在华北平原等高度集约化的农业区，长期过量施用化肥导致土壤中氮磷大量盈余。灌溉回归水携带高浓度硝酸盐向下渗漏，持续补给浅层地下水，致使部分地区地下水硝酸盐浓度远超饮用水标准（50 mg/L）。与此同时，在旱季或枯水期，受污染的地下水又通过排泄作用进入沟渠与河流，成为地表水氮负荷的重要来源。这种“地表→地下→地表”的循环输移机制显著放大了农业面源污染的环境效应。

### 3.2 城市污水泄漏：有机微污染物的隐蔽迁移

随着城市地下管网老化，生活污水渗漏已成为不可忽视的污染源。污水中含有多种极性高、生物降解性差的有机微污染物，如卡马西平、双氯芬酸、三氯生等。这些物质在包气带迁移过程中虽部分被吸附或降解，但仍有一定比例穿透至潜水含水层。由于地下水流动缓慢、稀释能力有限，这些污染物可在含水层中长期停留，并通过排泄作用重新进入地表水系统。

### 3.3 矿山排水：酸性废水与重金属耦合污染

废弃矿山产生的酸性矿坑水（AMD）通常具有低pH、高硫酸盐及高浓度重金属（如Fe、Cu、Zn、As）的特征。当AMD渗入地下水系统后，其强酸性环境会溶解含水层中的碳酸盐和硅酸盐矿物，进一步释放吸附态或晶格束缚的重金属。随后，受污染的地下水在重力或水力梯度驱动下排入邻近河流，造成下游水体pH骤降、金属离子浓度飙升，严重破坏水生生态系统。

### 3.4 海水入侵：咸淡水混合区的水质恶化

在沿海地区,地下水超采引发的海水入侵形成了广阔的咸淡水混合带。该区域不仅 $\text{Cl}^-$ 浓度显著升高,还伴随离子强度剧增和氧化还原条件改变。高盐环境抑制了微生物活性,降低了有机污染物的生物降解效率;同时, $\text{Na}^+$ 与土壤胶体上的 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 发生离子交换,导致黏土矿物膨胀、孔隙堵塞,进一步削弱含水层的渗透性与净化功能。更为复杂的是,海水入侵常与农业硝酸盐污染共存。

#### 4 研究挑战与管理对策

##### 4.1 当前研究挑战

尽管对地表水-地下水相互作用的研究已取得显著进展,但仍面临若干关键科学挑战。首先,从孔隙尺度的微观反应到流域尺度的宏观输移,多尺度过程的耦合机制尚未建立统一理论框架,限制了模型的预测能力。其次,针对微塑料、全氟烷基物质(PFAS)等新兴污染物在交互界面的吸附行为、聚集特性及生态毒性,现有研究仍十分薄弱。再次,气候变化引发的极端水文事件(如特大暴雨或持续干旱)如何扰动交互频率、改变污染物脉冲输入模式,尚缺乏系统观测与模拟。最后,传统点位式水质监测难以捕捉交互带三维动态变化,亟需发展分布式光纤测温、原位电化学传感器等新型监测技术,以实现交换通量与污染物浓度的高时空分辨率刻画。

##### 4.2 水环境管理优化路径

面对上述挑战,水环境管理亟需从“割裂管控”转向“系统协同”。首要任务是构建“交互感知型”监测网络,在关键河段布设水位-水质联合监测井,并结合温度示踪、氡( $^{222}\text{Rn}$ )同位素等天然示踪剂,精准识别交换方向与通量。其次,应大力发展地表水-地下水耦合水质模型,集成MODFLOW-USG、HydroGeoSphere等水文模型与MT3DMS、PHREEQC等溶质运移与地球化学模块,实现对污染物迁移转化的全过程模拟与情景预测。在此基础上,推行基于交互过程的分区精准管控策略:

在地表水补给地下水的区域,严格限制高淋溶性农药和化肥使用,防止污染入渗;在地下水排泄至地表水的区域,建设人工湿地或生态缓冲带,拦截并净化排泄污染物;在双向交换活跃的河岸带,保护天然河床结构,禁止河道硬化与深挖,维持水文连通性<sup>[4]</sup>。最终,应推动立法层面的制度创新,打破地表水与地下水管理的行政壁垒,建立统一的水质标准、污染责任追溯机制与跨介质协同治理体系。

#### 5 结语

地表水与地下水交互作用是水环境质量演变的核心驱动力之一。其通过调控水流路径、地球化学环境与微生物活性,深刻影响各类污染物的迁移、转化与归趋。在人类活动与气候变化双重压力下,交互过程的扰动已导致水质风险显著升高,传统割裂式管理模式难以为继。未来水环境保护必须立足于“地表-地下一体化”视角,深化对交互界面多过程耦合机制的理解,发展精准监测与模拟技术,并构建基于水文连通性的综合管理体系。唯有如此,方能有效防控跨界污染、保障饮用水安全、维护水生态系统健康,实现水资源的可持续利用与水环境的高质量发展。

#### 参考文献

- [1]马琰.城市地区地表水与地下水交互转化关系分析研究[J].城市建设理论研究(电子版),2019,(22):48-49.
- [2]潘晓峰,典型区域地表水-地下水时空交互规律与协同监测方法研究项目.广东省,国家环境保护快速城市化地区生态环境科学观测研究站(依托单位:广东省深圳生态环境监测中心站),2022-04-18.
- [3]郜会彩,陈柳安,胡云进,等.湿地地表水与地下水交互作用可视化试验研究[J].水电能源科学,2024,42(03):38-42.
- [4]李忠媛.地表水-地下水交互机制研究[J].黑龙江水利科技,2017,45(02):4-6+32.