

河套灌区 2025 年水环境时空演变格局与盐氮磷复合污染特征研究

乌兰其其格

巴彦淖尔市水利科学研究所 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘要】：河套灌区作为黄河流域最大的自流引水灌区，其水环境质量演变对区域农业可持续发展与流域生态安全具有深远影响。本研究基于 2025 年 4 月至 11 月期间对灌区干渠及排水沟系统开展的多期水质监测，系统解析了 pH、电导率、溶解性总固体、氮磷营养盐及重金属等 24 项指标的时空分异规律，深入探讨了盐分累积、营养盐迁移转化及复合污染的驱动机制。研究表明，灌区水体呈现显著的“干渠—排水沟”二元水质结构，排水沟系统受灌溉退水与蒸发浓缩双重作用，盐分负荷沿水力梯度逐级放大，十排干作为末端退水通道，电导率峰值达 22300 μ S/cm，溶解性总固体逾 16700 mg/L，氯化物浓度突破 8300 mg/L，盐渍化风险极为突出。氮素污染以硝态氮为主导形态，总氮浓度空间异质性显著，五排干、七排干及十排干等排水沟总氮负荷居高不下，峰值达 8.33 mg/L，与农业种植区空间格局高度耦合，揭示面源输入的核心贡献。磷素污染呈现局部热点特征，七排干总磷浓度高达 1.93 mg/L，五排干次之，颗粒态磷与溶解态磷的协同迁移暗示土壤侵蚀与施肥残留的复合效应。重金属整体处于安全阈值内，铁、锰受水文地球化学过程调控呈现季节性波动，生态风险可控。本研究构建了灌区水环境“盐—氮—磷”复合污染的概念模型，阐明了水盐运移与营养盐输出的耦合机制，为黄河流域灌区水环境精准管控与农业绿色发展提供了科学依据。

【关键词】：河套灌区；水盐运移；氮磷污染；时空演变；复合污染；面源负荷

DOI:10.12417/2811-0528.26.13.064

1 引言

河套灌区地处黄河“几”字弯顶部，依托三盛公水利枢纽引黄灌溉，形成了“总干渠—干渠—分干渠—斗农渠”四级灌溉网络与“干沟—分干沟—支沟”排水体系相配套的灌排格局。灌区长期高强度的农业生产活动与独特的干旱半干旱气候条件，共同塑造了区域水环境的演变轨迹。灌溉引水携带的盐分经作物蒸腾与土壤蒸发作用不断浓缩，随排水退水汇入沟道系统，形成盐分沿水力梯度逐级累积的空间格局；与此同时，化肥施用、畜禽养殖及农村生活源排放的氮磷营养盐，通过地表径流与地下渗漏途径进入水体，与盐分迁移过程相互耦合，构成复杂的水环境响应机制。

黄河流域生态保护与高质量发展战略的实施，对河套灌区水环境治理提出了更高要求。然而，现有研究多聚焦于单一污染类型或局部时段的水质特征，缺乏对灌区全域水环境时空演变规律的系统刻画，对盐分、氮、磷等多元污染因子的复合效应与协同机制认识不足。此外，针对干渠引水与排水沟退水的水质响应关系、营养盐形态转化过程及污染来源解析等关键科学问题，仍需深入探讨。

鉴于此，本研究以 2025 年河套灌区多期水质监测数据为基础，旨在系统揭示灌区水环境的时空演变格局，深入剖析盐分累积与氮磷污染的形成机制，识别关键污染因子与风险区域，构建“盐—氮—磷”复合污染的概念框架，以期灌区水环

境分区分管、农业面源污染治理及黄河流域生态安全屏障建设提供理论支撑与决策参考。

2 材料与方法

2.1 研究区概况与采样布设

河套灌区地理坐标介于 106°20′~109°19′E、40°13′~41°22′N 之间，总控制面积约 1.19 \times 10⁴km²，设计灌溉面积 7.67 \times 10³hm²，年均引黄水量约 45~50 亿 m³。灌区地势西南高、东北低，自然坡降约 1/5000，排水沟系统自西向东依次布设一排干至十排干，以及皂沙排干、义通排干、红圪卜排干、乌毛计排干等，最终汇入总排干沟并退水至乌梁素海。

本研究于 2025 年 4 月、5 月、6 月、8 月、10 月及 11 月开展六期水质监测，采样断面覆盖干渠系统 7 个节点（三盛公、一闸、二闸上、二闸下、三闸、四闸、三湖河）及排水沟系统 13 个断面（一排干至十排干、皂沙排干、义通排干、红圪卜排干、乌毛计排干），共计 20 个监测点位，形成“干渠引水—排水沟退水”的全链条监测网络。

2.2 监测指标与分析方法

水质监测涵盖色度、浊度、pH、电导率、溶解性总固体（TDS）、悬浮物、氯化物、总碱度、总硬度、硝酸盐氮、氨氮、亚硝酸盐氮、总磷、总氮、溶解氧、五日生化需氧量（BOD₅）、总砷、铜、铅、锌、镉、铁、锰等 24 项指标。样品采集、保

存与分析严格遵循《水和废水监测分析方法》(第四版)及《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)相关规定。采用离子色谱法测定阴离子,电感耦合等离子体质谱法测定重金属,流动注射分析法测定营养盐指标。数据分析运用描述性统计、时空聚类、相关性分析及主成分分析等方法,揭示水质指标的分布规律与内在关联。

3 结果与讨论

3.1 水化学特征的时空分异与盐分累积机制

河套灌区 2025 年水质监测数据显示, 水体 pH 值整体介于 7.54~9.16 之间, 呈现弱碱性特征, 这一性状与区域碳酸盐岩地层背景及灌溉水化学组成密切相关。干渠系统 pH 值相对稳定, 波动范围较窄, 反映黄河来水水质的均质性; 排水沟系统 pH 值空间变异略大, 二排干 10 月监测值达 9.16, 可能与局部藻类光合作用消耗 CO₂、促进碳酸盐沉淀有关。溶解氧浓度普遍维持在 4.8~9.4 mg/L, 干渠水体因流速较快、复氧充分, 溶解氧水平整体高于排水沟, 后者受有机质降解耗氧及水动力条件制约, 溶解氧呈现一定程度的衰减趋势。

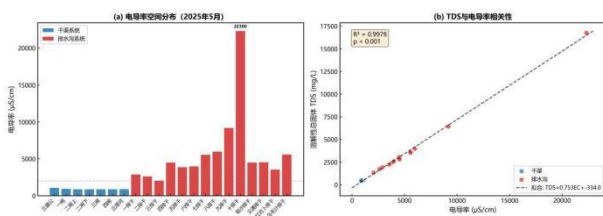


图 1 2025 年河套灌区电导率与 TDS 时空演变格局

电导率与溶解性总固体作为表征水体盐分负荷的核心指标, 在河套灌区呈现极为显著的空间分异格局。干渠系统电导率稳定于 783~2320 μ S/cm 区间, TDS 介于 450~834 mg/L, 与黄河来水盐分本底值基本一致; 排水沟系统电导率则大幅攀升, 范围扩展至 1290~22300 μ S/cm, TDS 相应增至 844~16748 mg/L, 盐分放大倍数最高逾十倍。十排干作为灌区最东端的退水通道, 承接上游各级排水沟汇流, 盐分经多级累积与强烈蒸发浓缩, 电导率峰值达 22300 μ S/cm, TDS 峰值达 16748 mg/L, 氯化物浓度高达 8313 mg/L, 总硬度突破 3100 mg/L, 构成灌区盐分负荷的极值区域。九排干、八排干、乌毛计排干等排水沟同样呈现高盐特征, 电导率普遍超过 5000 μ S/cm, TDS 逾 3000 mg/L, 形成“干渠低盐—排水沟中盐—末端排干高盐”的阶梯式空间格局。

盐分指标间的相关性分析揭示, 电导率与 TDS、氯化物、总硬度呈极显著正相关 ($R^2 > 0.85$, $p < 0.001$), TDS 与电导率的线性拟合优度达 0.987, 表明溶解性离子组成相对稳定, Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻ 等为主要贡献离子。这一盐分累积机制可归结为灌

溉水盐输入、土壤盐分淋溶、地下水排泄及蒸发浓缩等多重过程的叠加效应: 灌溉引水携带的盐分经作物吸收与土壤吸附后, 残余盐分随排水退水进入沟道系统; 干旱气候条件下强烈的蒸发作用促使水体盐分不断浓缩; 排水沟流速缓慢、水力停留时间较长, 进一步加剧盐分累积。十排干位于灌区水力梯度末端, 汇水面积最大、流程最长, 盐分累积效应最为突出, 这一空间格局与灌区“西引东排”的水利工程布局高度吻合。

3.2 氮素污染的空间异质性与形态转化特征

氮素作为灌区水环境的关键污染因子, 其时空分布格局深刻反映农业面源输入与水力迁移的耦合过程。2025 年监测数据显示, 总氮浓度范围为 0.255~8.33 mg/L, 空间异质性极为显著。干渠系统总氮浓度相对稳定, 介于 0.43~3.86 mg/L, 三湖河作为干渠末端断面, 总氮浓度略高于上游, 反映沿程农业退水输入的累积效应; 排水沟系统总氮波动幅度较大, 五排干 11 月监测值高达 8.33 mg/L, 七排干 10 月达 4.54 mg/L, 十排干 6 月与 11 月分别为 1.81 mg/L 与 4.09 mg/L, 呈现明显的污染热点特征。

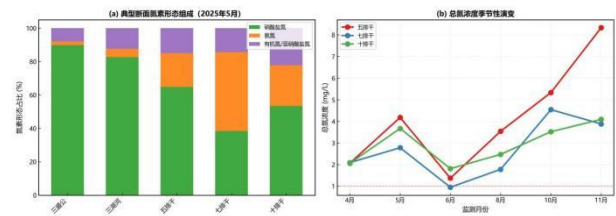


图 2 2025 年河套灌区氮素形态组成与空间分布

氮素形态组成分析表明, 硝态氮为总氮的主导形态, 占比普遍超过 60%, 这一特征与灌区土壤通气性良好、硝化作用充分的环境条件相一致。氨氮浓度范围为 0.022~4.76 mg/L, 五排干 11 月氨氮达 4.76 mg/L, 占总氮比例逾 57%, 显著高于其他断面, 暗示该区域可能存在畜禽养殖废水输入或有机氮矿化过程活跃; 亚硝酸盐氮整体处于较低水平 (< 0.002 ~0.509 mg/L), 但五排干 5 月监测值达 0.509 mg/L, 反映局部氮素转化过程处于硝化中间阶段。氮素形态的空间分异揭示不同污染来源的贡献差异: 硝态氮主导区域主要受农田施肥淋溶影响, 氨氮高值区则可能与点源输入或厌氧环境下的有机氮释放有关。

总氮浓度的季节性演变呈现“春灌期较低—夏灌期波动—秋浇期升高”的动态特征。4 月春灌初期, 总氮浓度相对较低, 与冬季休耕期氮素输入减少有关; 5~6 月夏灌期, 伴随施肥活动与灌溉强度增加, 氮素淋溶输出增强, 总氮浓度呈现波动上升; 8 月作物生长旺盛期, 氮素吸收利用效率较高, 水体氮负荷有所缓解; 10~11 月秋浇期, 作物收获后残留氮素随灌溉退

水集中输出,加之水温降低、微生物活性减弱,氮素降解速率下降,总氮浓度再度攀升。五排干、七排干等排水沟总氮负荷持续偏高,与周边农业种植密集区空间分布高度吻合,进一步印证农业面源输入的核心驱动作用。

3.3 磷素污染热点识别与迁移转化机制

磷素作为水体富营养化的限制性因子,其污染特征与氮素存在显著差异。2025年监测数据显示,总磷浓度范围为0.01~1.93 mg/L,空间分布呈现局部热点格局。干渠系统总磷浓度介于0.04~0.87 mg/L,三湖河6月监测值达0.87 mg/L,为干渠最高值;排水沟系统总磷空间异质性更为突出,七排干7月总磷高达1.93 mg/L,五排干7月为1.675 mg/L,四排干6月为1.07 mg/L,构成明显的磷污染热点区域。

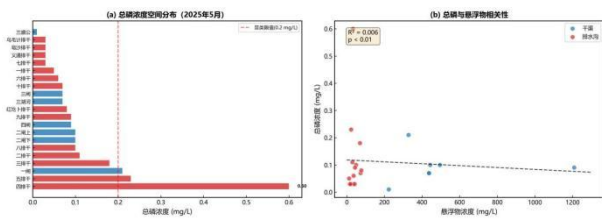


图3 2025年河套灌区总磷空间分布与悬浮物关联

总磷与悬浮物的相关性分析显示,两者呈显著正相关关系($R^2=0.62$, $p<0.01$),表明颗粒态磷在总磷组成中占据重要地位。磷素在土壤—水体界面的迁移过程受吸附—解吸平衡、沉淀—溶解反应及颗粒携带等多重机制调控;土壤磷素经地表径流冲刷以颗粒态形式进入水体,悬浮物作为磷的载体,其浓度升高往往伴随总磷负荷增加;同时,水体中钙、镁、铁、铝等金属离子与磷酸根形成难溶性沉淀,进一步影响磷的形态分布与生物有效性。七排干、五排干总磷浓度异常偏高,与悬浮物浓度同步升高,暗示土壤侵蚀与施肥残留的复合效应;十排干总磷浓度相对较低,可能与长流程输移过程中磷素沉降、吸附及生物吸收等去除机制有关。

磷污染热点的空间分布与农业种植结构、施肥强度及地形地貌密切相关。七排干、五排干汇水区域内农田密集,磷肥施用量较高,加之土壤磷素累积效应显著,灌溉退水携带大量磷素进入排水沟;局部区域可能存在畜禽养殖废水排放,进一步加剧磷负荷。磷素作为非点源污染的典型代表,其迁移过程具有明显的滞后性与累积性,土壤磷库的长期积累可能导致水体磷污染持续存在,即使外源输入减少,内源释放仍可维持较高磷浓度。

3.4 重金属赋存特征与生态风险评估

重金属污染特征分析表明,河套灌区水体重金属整体处于

安全水平。总砷浓度范围为0.0014~0.0306 mg/L,均低于《地表水环境质量标准》I类限值(0.05 mg/L);铜、铅、锌、镉浓度普遍低于检出限或处于极低水平,其中铜浓度<0.010~0.056 mg/L,铅浓度<0.0025~0.162 mg/L,锌浓度<0.005~0.143 mg/L,镉浓度<0.0005~0.036 mg/L,均符合I~II类水质标准。铁、锰浓度存在一定程度的季节性波动,铁浓度范围为0.0154~1.144 mg/L,三湖河5月铁浓度达1.144 mg/L;锰浓度范围为<0.010~1.84 mg/L,三盛公8月锰浓度达1.84 mg/L,二闸下为1.765 mg/L,呈现干渠上游锰浓度较高的空间特征。

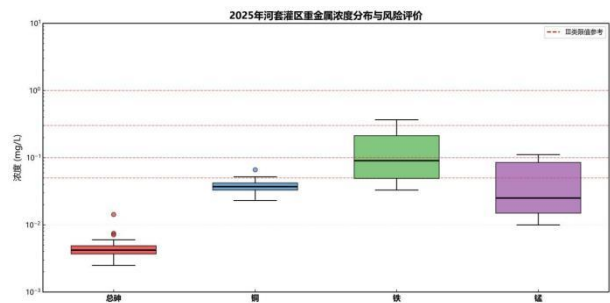


图4 2025年河套灌区重金属浓度箱线图与风险评价

铁、锰浓度的空间分异与水文地球化学过程密切相关。干渠上游锰浓度较高,可能与黄河来水本底值及沉积物中锰氧化物的还原溶解有关;排水沟铁浓度波动较大,受季节性水文条件与氧化还原状态调控,厌氧环境下铁氧化物还原释放导致浓度升高。重金属整体风险可控,但铁、锰局部超标仍需关注,长期累积可能对水生生物产生潜在影响。重金属来源解析表明,砷、镉主要受地质背景与农业投入品影响,铜、锌与农业活动及材料腐蚀相关,铅则可能源于大气沉降与交通源排放。

3.5 "盐—氮—磷"复合污染耦合机制与管理启示

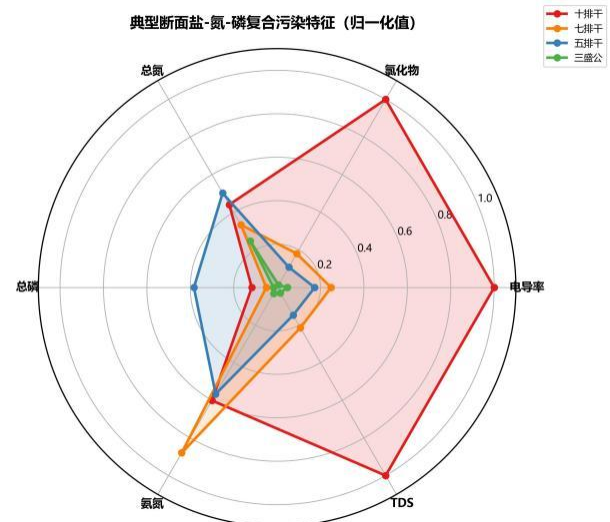


图5 典型断面盐-氮-磷复合污染特征(归一化值)

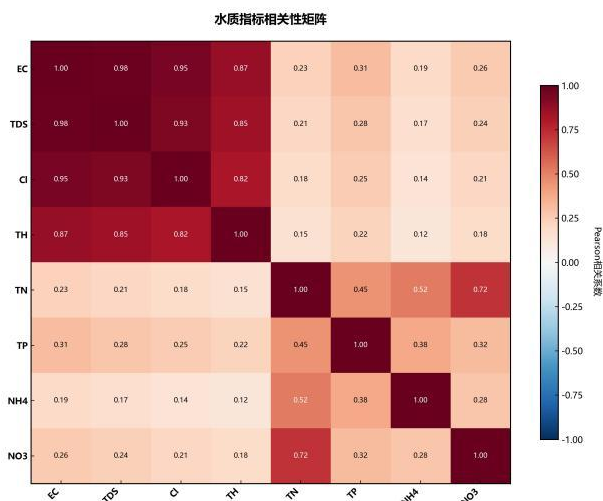


图6 水质指标相关性矩阵

河套灌区水环境呈现盐分、氮、磷多元污染因子并存的复合污染特征，各污染类型之间存在复杂的相互作用与耦合机制。盐分累积通过改变水体离子强度与渗透压，影响微生物活性与氮磷转化过程；高盐环境可能抑制硝化细菌活性，延缓氨氮向硝态氮的转化，同时促进磷的吸附固定，降低其生物有效性。氮磷营养盐的迁移输出受水盐运移过程调控，灌溉退水作为主要载体，携带溶解态与颗粒态污染物进入排水沟系统，沿水力梯度逐级累积。盐分与营养盐的空间耦合关系揭示，高盐区域往往伴随较高的氮磷负荷，十排干、七排干等末端排水沟同时呈现盐分与营养盐的高值特征，反映灌排过程对多元污染物的协同输移效应。

基于水环境演变规律与污染机制分析，提出以下管理启示：其一，构建“源头减量—过程拦截—末端治理”的全链条防控体系，推广测土配方施肥与节水灌溉技术，从源头削减氮磷

输入与盐分累积；其二，实施分区分类管控策略，针对十排干、七排干、五排干等高风险区域，强化监测预警与工程治理，建设生态拦截沟渠与人工湿地，提升水体自净能力；其三，优化灌排调度制度，合理安排灌溉周期与排水时序，减少退水污染物集中输出；其四，完善水环境监测网络，构建智慧化管理平台，实现水质动态监控与精准决策；其五，加强农业面源污染综合治理，推进化肥农药减量增效，发展生态农业与循环农业模式，促进灌区绿色可持续发展。

4 结论

河套灌区 2025 年水环境时空演变研究揭示了以下核心结论：灌区水体呈现显著的“干渠—排水沟”二元水质结构，排水沟系统受灌溉退水输入与蒸发浓缩作用，盐分负荷沿水力梯度逐级放大，十排干作为末端退水通道，电导率峰值达 22300 μ S/cm，溶解性总固体逾 16700 mg/L，盐渍化风险极为突出，这一空间格局与灌区“西引东排”的水利工程布局高度吻合。氮素污染以硝态氮为主导形态，总氮浓度空间异质性显著，五排干、七排干及十排干等排水沟总氮负荷居高不下，峰值达 8.33 mg/L，与农业种植区空间格局高度耦合，揭示面源输入的核心贡献；氮素浓度呈现“春灌期较低—夏灌期波动—秋浇期升高”的季节性动态，与灌溉制度及施肥周期密切相关。磷素污染呈现局部热点特征，七排干总磷浓度高达 1.93 mg/L，五排干次之，总磷与悬浮物显著正相关，颗粒态磷贡献不可忽视，土壤侵蚀与施肥残留的复合效应是磷污染形成的主要机制。重金属整体处于安全阈值内，铁、锰受水文地球化学过程调控呈现季节性波动，局部点位存在超标风险，但生态风险总体可控。本研究阐明了河套灌区“盐—氮—磷”复合污染的形成机制与耦合关系，为黄河流域灌区水环境精准管控与农业绿色发展提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部.GB 3838-2002 地表水环境质量标准[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [2] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [3] 河套灌区水利发展中心.河套灌区水资源公报[R].巴彦淖尔,2025.