

河套灌区水质时空变化特征及污染来源解析 (2023-2025 年)

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】：本研究旨在揭示内蒙古河套灌区水质的时空变化规律，精准识别区域主要污染来源，为灌区水环境管理提供科学依据。研究基于 2023-2025 年河套灌区 271 个水质监测数据，综合运用描述性统计、主成分分析、聚类分析与水质指数评价等方法，系统剖析了干渠枢纽与排干沟系统的水质特征。结果显示，研究时段内灌区水质整体处于中度污染水平，总氮与总磷超标率分别达 53.1% 和 31.8%；排干沟系统污染程度显著高于干渠枢纽，电导率、氯化物、总硬度等盐渍化指标在排干沟中呈现明显富集态势；灌区水质表现出显著的时空异质性，五排干、七排干、十排干为区域污染热点区域。主成分分析结果表明，盐渍化因子与营养盐因子是驱动灌区水质变化的两大核心因子，累计解释方差超六成。综合来看，河套灌区面临农业面源污染与土壤盐渍化的双重环境压力，建议采取分区分类治理策略，重点管控排干沟营养盐排放，强化灌溉退水全过程管理。

【关键词】：河套灌区；水质评价；农业面源污染；盐渍化；主成分分析

DOI:10.12417/2811-0528.26.14.065

1 引言

1.1 研究背景

河套灌区坐落于内蒙古自治区巴彦淖尔市，是亚洲规模最大的一首制自流引水灌区，也是我国至关重要的商品粮生产基地^[1]。灌区依托黄河三盛公水利枢纽实现引水，通过总干渠、干渠、分干渠、支渠、斗渠、农渠、毛渠七级渠道体系完成灌溉作业，灌溉面积突破 1000 万亩^[2]。作为典型干旱半干旱区大型灌区，河套灌区肩负着保障区域粮食安全与生态安全的双重使命。

伴随灌区农业集约化程度不断提升与气候变化的持续影响，灌区水环境问题愈发突出。一方面，化肥农药过量施用加剧了农业面源污染，氮磷等营养盐随农田退水进入排干沟，最终汇入乌梁素海，大幅提升了水体富营养化风险^[3]；另一方面，灌区地处河套平原，地下水位偏高且蒸发作用强烈，土壤盐渍化问题严峻，灌溉退水携带大量盐分，进一步加重了排干沟水质的盐渍化程度^[4]。2023 年监测数据显示，乌梁素海总氮浓度仍未达到地表水 V 类标准，区域水质形势依旧严峻^[5]。

1.2 研究现状

近年来，国内外学者围绕大型灌区水质展开了大量研究工作。在研究方法上，水质指数法、主成分分析法、聚类分析等多元统计手段，已被广泛应用于灌区水质评价与污染源识别工作中。在区域研究层面，黄河流域灌区水质研究多集中于宁夏引黄灌区、关中灌区等区域，针对河套灌区的系统性研究相对薄弱。

现有研究成果表明，大型灌区水质普遍呈现显著的时空异质性。时间维度上，水质指标受灌溉制度、施肥周期与降水条件影响，呈现出明显的季节性波动特征；空间维度上，污染物沿水流方向不断累积，营养盐浓度呈逐步上升趋势，排干沟系

统污染程度普遍高于输水干渠。但针对河套灌区长时间序列、多点位的系统性水质研究仍较为欠缺，尤其是 2023-2025 年连续监测数据相关研究尚未见公开报道。

1.3 研究目的与意义

本研究以 2023-2025 年河套灌区水质监测数据为基础，系统分析干渠枢纽系统与排干沟系统的水质时空变化特征，识别影响水质的主要污染因子与来源，构建科学的水质综合评价体系，为河套灌区水环境精准治理与农业绿色发展提供坚实的科学支撑。研究成果对保障黄河流域水生态安全、推进乌梁素河流域综合治理具有重要的实践价值。

2 材料与方法

2.1 研究区域概况

河套灌区位于黄河内蒙古段北岸，地理坐标介于 40°19'-41°18'N、106°20'-109°19'E 之间，属于中温带干旱半干旱大陆性气候，年均降水量为 150-220 毫米，年均蒸发量高达 2000-2400 毫米。灌区地势呈现西南高、东北低的特征，地面坡降为 1/4000-1/8000，为自流灌溉提供了良好的地形条件。

灌区水系由引水枢纽、输配水渠道与排水沟道共同构成，三盛公水利枢纽是灌区引水的核心枢纽，黄河水经总干渠、干渠、分干渠输送至田间，灌溉后的退水依次经毛渠、农渠、斗渠、支渠、分干沟、干沟汇入乌梁素海，形成完整的“引-蓄-排”水循环系统。本研究重点监测干渠枢纽系统与排干沟系统的关键点位，全面覆盖灌区核心水系。

2.2 数据来源与监测指标

本研究数据来源于 2023 年 4 月至 2025 年 11 月河套灌区水质常规监测，共获取 271 个有效样本，监测频次为每月 1-2 次，完整覆盖主要灌溉期与非灌溉期。

监测指标涵盖物理指标、营养盐指标、盐渍化指标、综合指标与重金属指标五大类，物理指标包含色度、浊度、pH、电导率、溶解性总固体、悬浮物；营养盐指标包含总氮、总磷、氨氮、硝酸盐氮、亚硝酸盐氮；盐渍化指标包含氯化物、总碱度、总硬度；综合指标包含溶解氧、五日生化需氧量；重金属指标包含总砷、铜、铅、锌、镉、铁、锰，全方位反映灌区水质状况。

2.3 研究方法

2.3.1 描述性统计分析

采用均值、标准差、变异系数等统计量刻画水质指标的基本特征，借助单因素方差分析检验不同水体类型间水质差异的显著性，明确水质指标的分布规律与差异特征。

2.3.2 水质指数 (WQI) 评价

构建简化水质指数模型，选取总氮、总磷、氨氮、电导率、溶解氧 5 项关键指标，采用加权求和法计算 WQI 值：

$$WQI = \sum_{i=1}^n w_i \cdot q_i$$

式中： w_i 为第 i 项指标权重（总和为 1）； q_i 为第 i 项指标的质量分指数。根据 WQI 值将水质划分为 5 级：优 (≥ 80)、良 (60-80)、轻度污染 (40-60)、中度污染 (20-40)、重度污染 (< 20)。

2.3.3 多元统计分析

运用主成分分析 (PCA) 识别影响水质的主要因子，采用 Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) 检验和 Bartlett 球形检验评估数据适用性。结合 K-means 聚类分析，识别水质空间分异特征。

2.3.4 数据处理

使用 Python 3.12 进行数据处理与分析，采用 Pandas 进行数据清洗，Matplotlib 和 Seaborn 进行可视化，Scikit-learn 进行 PCA 和聚类分析。对于低于检测限的数据，取检测限的 1/2 替代。

3 结果与分析

3.1 水质总体特征

3.1.1 描述性统计特征

2023-2025 年河套灌区水质监测数据统计结果 (表 1) 显示，监测指标变异程度较大，反映出灌区水质的复杂性和空间异质性。

表 1 主要水质指标描述性统计

指标	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数 (%)
色度(PCU)	223	11.17	12.08	1.01	90.00	108.1

浊度(NTU)	223	171.13	858.56	0.49	9697.00	501.7
pH	258	8.25	0.28	7.39	9.16	3.4
电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	258	3536.05	3924.28	686.00	23580.00	111.0
TDS(mg/L)	223	2301.01	2837.94	348.00	16748.00	123.3
总氮(mg/L)	258	2.20	1.19	0.26	8.33	54.1
总磷(mg/L)	258	0.24	0.44	0.00	3.63	183.3
氨氮(mg/L)	258	0.59	0.57	0.01	4.76	96.6
硝酸盐氮 (mg/L)	223	1.13	0.87	0.04	4.05	77.0
氯化物 (mg/L)	258	873.98	1387.41	63.80	8560.00	158.7

从变异系数看，浊度 (501.7%)、总磷 (183.3%)、氯化物 (158.7%) 等指标空间变异最大，表明灌区不同区域受污染源影响差异显著。pH 值相对稳定 ($CV=3.4\%$)，在 7.39-9.16 之间，呈弱碱性，符合干旱区水体一般特征。

3.1.2 超标率分析

以《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) IV 类标准为评价基准，主要指标超标率统计结果 (表 2) 显示：

表 2 主要指标超标率统计

指标	标准限值	样本数	超标数	超标率 (%)
总氮	$\leq 2.0 \text{ mg/L}$	258	137	53.1
总磷	$\leq 0.2 \text{ mg/L}$	258	82	31.8
氨氮	$\leq 1.0 \text{ mg/L}$	258	36	14.0
溶解氧	$\geq 3.0 \text{ mg/L}$	223	1	0.4

总氮超标率最高 (53.1%)，超过半数样本达不到 IV 类水质要求；总磷次之 (31.8%)；氨氮超标率相对较低 (14.0%)；溶解氧超标率极低 (0.4%)，说明水体复氧条件良好。这一结果与北方干旱区灌区以氮污染为主、磷污染为辅的一般规律相符。

3.2 水质空间分异特征

3.2.1 不同水体类型对比

将监测点位分为干渠枢纽、排干沟、其他出口三类，对比分析结果 (表 3) 显示：

表3 不同水体类型关键指标平均值对比

水体类型	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	氨氮 (mg/L)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	WQI
干渠枢纽	2.33	0.48	0.32	881.58	42.61
排干沟	2.18	0.15	0.72	4741.95	39.96
其他出口	1.84	0.11	0.52	3756.78	42.04

干渠枢纽总氮和总磷浓度最高,超标情况较为突出,这与干渠承接上游来水、沿途汇集各类污染密切相关。排干沟电导率显著高于干渠枢纽,约为干渠的5.4倍,清晰体现出农田退水携带大量可溶性盐分的特征,同时排干沟氨氮浓度也高于干渠枢纽,证实农田排水是氨氮的重要来源。从水质指数来看,三类水体均处于轻度至中度污染水平,其中排干沟水质指数最低,水质状况相对最差。

3.2.2 排干沟系统空间分布

十条排干沟水质指标对比结果呈现出显著的空间异质性,总氮浓度方面,五排干、七排干、十排干浓度最高,远超IV类标准,一排干、二排干浓度相对较低;总磷浓度方面,五排干、七排干超标严重,八排干、九排干浓度较低;电导率方面,十排干、九排干盐渍化程度最高,分别为干渠枢纽平均值的20倍和8.2倍,一排干、二排干相对较低。综合来看,五排干、七排干、十排干是灌区污染防治的重点区域,需优先实施综合治理措施。

3.2.3 干渠系统沿程变化

干渠枢纽系统沿程水质变化呈现出清晰的规律,总氮浓度从三盛公进水口至三湖河出水口沿程波动上升,增幅达11.4%,表明干渠沿线存在污染持续汇入的情况;总磷浓度呈现“中间高、两端低”的分布特征,二闸上、三闸、四闸等节制闸附近浓度较高,这与闸前水流缓慢、泥沙沉积释放磷素密切相关;电导率在2024年、2025年沿程呈上升趋势,三湖河电导率较三盛公增加23.8%,体现了蒸发浓缩与盐分累积的双重效应。

3.3 水质时间变化特征

3.3.1 年际变化趋势

2023-2025年水质年际变化(表4)显示:

表4 年度水质变化趋势

年份	总氮(mg/L)	总磷(mg/L)	氨氮(mg/L)
2023	2.19	0.23	0.42
2024	2.14	0.32	0.61
2025	2.26	0.19	0.72

总氮浓度年际波动较小,无明显下降趋势;总磷浓度在2024年达到峰值,2025年有所回落;氨氮浓度呈逐年上升趋势,增幅达71.4%,需引起高度关注。水质指数在2025年显著下降,灌区整体水质状况呈现恶化态势。

3.3.2 季节性变化规律

总氮、总磷的时间序列变化表现出明显的季节性波动特征,总氮方面,排干沟系统在每年秋季10月出现浓度峰值,与秋季集中灌溉、农田退水量大直接相关,干渠枢纽在2025年5月出现峰值,主要受春季施肥、融雪径流携带污染物影响;总磷方面,干渠枢纽在2024年8月出现异常高值,远超IV类标准,推测与该时段藻类大量繁殖、内源磷释放有关,排干沟总磷浓度相对稳定,波动范围较小。

3.4 水质因子识别与来源解析

3.4.1 相关性分析

水质指标相关性矩阵分析结果显示,电导率与溶解性总固体、氯化物、总硬度呈极显著正相关,共同构成盐渍化指标群,直观反映出灌区土壤盐渍化对水体水质的显著影响;总氮与硝酸盐氮、氨氮呈显著正相关,表明氮素各形态间存在稳定的转化关系,总磷与氨氮呈弱负相关,说明氮磷污染物的来源可能存在差异;此外,pH与硝酸盐氮呈负相关,碱性环境更有利于硝化作用进行,溶解氧与总氮、硝酸盐氮呈正相关,体现了氧化条件对氮素形态转化的影响。

3.4.2 主成分分析

对11项关键水质指标开展主成分分析,KMO检验值为0.65,Bartlett球形检验 $p < 0.001$,数据适合进行因子分析。提取的前两个主成分累计解释方差达60.8%,第一主成分盐渍化因子解释38.1%的方差,高载荷指标包含电导率、溶解性总固体、氯化物、总硬度,主要反映土壤盐渍化和蒸发浓缩过程对水质的影响;第二主成分营养盐因子解释22.8%的方差,高载荷指标包含总氮、硝酸盐氮、氨氮,主要体现农业面源污染输入的特征。主成分分析散点图显示,排干沟样本主要分布在高盐渍化区域,干渠枢纽样本分布较为分散,部分样本偏向高营养盐区域,K-means聚类将样本划分为高盐低营养、低盐高营养、中等水平三类,与实际水质分布特征高度匹配。

3.5 水质综合评价

基于水质指数的水质综合评价结果显示,研究期间河套灌区水质以中度污染和轻度污染为主,优良水质占比仅为11.1%,重度污染占比11.8%。空间分布上,一排干、二排干、九排干水质相对较好,五排干、七排干、十排干水质较差,属于重点治理对象;时间趋势上,干渠枢纽水质指数逐年上升,水质呈改善趋势,排干沟水质指数逐年下降,水质呈恶化趋势,灌区干渠与排干沟水质两极分化特征愈发明显。

4 讨论

4.1 河套灌区水质主要问题

本研究结果明确,河套灌区面临营养盐污染与土壤盐渍化的双重环境压力,总氮超标率达53.1%,高于宁夏引黄灌区,与关中灌区水平相当,反映出黄河流域大型灌区普遍存在氮素流失问题;排干沟电导率平均值远超农田灌溉水质标准,盐渍化问题极为严峻。与已有研究对比,2023-2025年河套灌区水质呈现“稳中趋差”的态势,总氮平均浓度较此前研究有所上升,推测与灌区种植强度增加、化肥施用量上升密切相关。

4.2 污染源与驱动机制

农业面源污染是营养盐的主要来源。河套灌区化肥施用量约600 kg/hm²,远高于全国平均水平,氮肥利用率仅30%-40%,大量氮素通过淋溶、径流进入排水系统。排干沟氨氮浓度高于干渠枢纽,证实农田排水是氨氮的重要载体。土壤盐渍化是可溶性盐类富集的主因。灌区地处河套平原,地下水埋深1-3 m,蒸发量是降水量的10倍以上,盐分随地下水上升在地表累积,灌溉淋洗后进入排干沟。十排干、九排干位于灌区下游,承接上游来水和排水,盐分累积效应显著。水力条件影响污染物迁移转化。节制闸造成水流滞留,促进泥沙沉积和磷释放,导致闸前总磷浓度升高;夏季高温期藻类繁殖,内源磷释放加剧,造成总磷异常高值。

4.3 与其他灌区对比

对比黄河流域其他大型灌区(表5),河套灌区水质具有以下特点:

表5 黄河流域主要灌区水质对比

灌区	总氮 (mg/L)	总磷 (mg/L)	电导率 (μS/cm)	主要问题
河套灌区	2.20	0.24	3536	氮污染+盐渍化
宁夏引黄灌区	1.85	0.18	2100	氮污染
关中灌区	2.35	0.31	850	氮磷污染
河南引黄灌区	1.92	0.22	1200	氮污染

参考文献:

- [1] 内蒙古自治区水利厅.河套灌区续建配套与节水改造规划[R].呼和浩特:内蒙古自治区水利厅,2021.
- [2] 李和平,张栋,王丽霞.河套灌区水资源可持续利用研究[J].水利学报,2020,51(8):956-965.
- [3] 张生,陈雅琳,李畅游.乌梁素海水水质演变趋势及驱动因素分析[J].环境科学,2022,43(5):2456-2465.
- [4] 史海滨,田军仓,李王成.河套灌区土壤盐渍化遥感监测与评估[J].农业工程学报,2019,35(12):112-120.
- [5] 巴彦淖尔市生态环境局.2023年巴彦淖尔市生态环境状况公报[R].巴彦淖尔:巴彦淖尔市生态环境局,2024.

河套灌区电导率显著高于其他灌区,盐渍化问题最为突出;总氮浓度仅次于关中灌区,氮污染压力大。这一差异与河套灌区气候更干旱、蒸发更强烈、土壤本底含盐量更高有关。

4.4 管理建议

结合研究结果,针对河套灌区水环境问题提出分区分类、源头管控、系统治理的管理建议。在分区分类治理方面,将五排干、七排干、十排干设为重点控制区,实施严格管控,建设生态沟渠、人工湿地等面源污染拦截设施;其他排干沟划为一般控制区,全面推广测土配方施肥,减少化肥使用量;干渠枢纽划为保护区,加强水源保护,严格管控排污口设置。在盐渍化综合治理方面,大力推广节水灌溉技术,减少深层渗漏以遏制地下水位上升;完善排水系统,将地下水位降至临界深度以下;推行井渠结合灌溉模式,利用浅层地下水灌溉,降低土壤含盐量。在农业源头减量方面,优化施肥结构,推广缓释肥、水肥一体化技术;建设农田生态沟渠,依托植被缓冲带截留营养盐;适度调整种植结构,减少高耗肥作物种植面积。在监测预警体系建设方面,建立排干沟水质自动监测站,实时监控总氮、电导率等关键指标;构建灌区水质模型,精准预测污染负荷变化趋势;建立完善的应急响应机制,有效防范突发性水污染事件。

5 结论

2023-2025年河套灌区水质整体处于中度污染状态,总氮、总磷超标问题突出,超标率分别为53.1%和31.8%,排干沟电导率均值较高,盐渍化问题严峻。灌区水质具有显著的时空异质性,排干沟污染程度高于干渠枢纽,五排干、七排干、十排干为污染热点区域,时间上秋季灌溉期总氮浓度达到峰值。主成分分析成功识别出盐渍化因子与营养盐因子两大核心驱动因子,农业面源污染与土壤盐渍化是灌区水质恶化的主要压力来源。水质指数评价结果显示,灌区水质以中度污染和轻度污染为主,干渠枢纽水质逐步改善,排干沟水质持续恶化,两极分化趋势明显,亟需实施分区分类治理策略,统筹推进农业面源污染防控与盐渍化综合治理,保障灌区水环境健康可持续发展。