

# 地下水硝酸盐污染特征及其对供水成本的影响研究

史志广

中核湖南地矿科技有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2025年7月2日; 录用日期: 2025年7月21日; 发布日期: 2025年8月5日

## 摘要

地下水硝酸盐污染已成为威胁饮用水安全和增加供水成本的重要环境问题。本研究以华北某农业灌溉区为对象, 通过采集30组地下水样品(覆盖农业区、村庄和河流补给区), 采用紫外分光光度法(HJ 84-2016)测定硝酸盐浓度, 结合SPSS 26.0和ArcGIS 10.8进行统计分析、空间插值及主成分分析, 量化硝酸盐污染特征及其对供水成本的影响。结果显示: 研究区地下水硝酸盐(以  $\text{NO}_3^-$  计)浓度范围为8.7~56.3 mg/L, 平均值28.6 mg/L, 超标率(GB 5749-2022,  $\leq 10$  mg/L)达63.3%, 农业区井(均值35.2 mg/L)污染显著高于村庄井(22.1 mg/L)和河流补给井(12.5 mg/L)。主成分分析提取3个主成分(累计贡献率76.8%), 其中农业氮肥施用(贡献率52.3%)和生活污染(25.5%)为主要污染源。成本模型表明, 硝酸盐浓度每升高10 mg/L, 单位水处理成本增加1.2~2.5元, 大型供水厂(5万吨/天)成本较小型厂低30%~40%。研究为农业区地下水污染防控和供水系统经济运行提供了数据支撑。

## 关键词

地下水, 硝酸盐污染, 供水成本, 空间分布, 主成分分析, 农业面源污染

# Research on the Characteristics of Nitrate Pollution in Groundwater and Its Impact on Water Supply Costs

Zhiguang Shi

CNNC Hunan Geological and Mineral Technology Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2025; accepted: Jul. 21<sup>st</sup>, 2025; published: Aug. 5<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Groundwater nitrate pollution has become an important environmental issue that threatens the safety of drinking water and increases the cost of water supply. This study took an agricultural irrigation area in North China as the object. By collecting 30 groups of groundwater samples (covering agricultural areas, villages and river recharge areas), the nitrate concentration was determined by ultraviolet spectrophotometry (HJ 84-2016), and statistical analysis, spatial interpolation and principal component analysis were conducted in combination with SPSS 26.0 and ArcGIS 10.8 and quantified the characteristics of nitrate pollution and its impact on water supply costs. The results show that the concentration range of nitrate (calculated as  $\text{NO}_3^-$ ) in groundwater of the study area was 8.7~56.3 mg/L, with an average of 28.6 mg/L. The over-standard rate (GB 5749-2022,  $\leq 10$  mg/L) reached 63.3%. The pollution of Wells in agricultural areas (average 35.2 mg/L) was significantly higher than that of village Wells (22.1 mg/L) and river recharge Wells (12.5 mg/L). Principal component analysis extracted three principal components (with a cumulative contribution rate of 76.8%), among which agricultural nitrogen fertilizer application (contribution rate 52.3%) and domestic pollution (25.5%) were the main pollution sources. The cost model indicates that for every 10 mg/L increase in nitrate concentration, the unit water treatment cost increases by 1.2 to 2.5 yuan. The cost of large water supply plants (50,000 tons per day) is 30% to 40% lower than that of small plants. The research provides data support for the prevention and control of groundwater pollution in agricultural areas and the economic operation of water supply systems.

## Keywords

Groundwater, Nitrate Pollution, Water Supply Cost, Spatial Distribution, Principal Component Analysis, Agricultural Non-Point Source Pollution

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地下水作为全球约 50%人口的饮用水源,其硝酸盐污染问题因农业集约化发展日益凸显[1]-[3]。硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ )主要通过氮肥淋失、畜禽粪便渗漏和生活污水渗透进入地下水,具有迁移路径复杂、治理周期长的特点。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2022)规定硝酸盐限值为 10 mg/L(以  $\text{NO}_3^-$ -N 计),超标后可能引发婴儿高铁血红蛋白血症,长期暴露还与消化系统癌症风险相关(WHO, 2017)。

在供水处理领域,硝酸盐去除需突破常规工艺限制[4]-[7]。当浓度超过 10 mg/L 时,需增加离子交换、反渗透或生物脱氮等深度处理单元,导致供水成本显著上升。华北平原作为我国“粮仓”,年均氮肥施用量达 350 kg/ha(远超国际安全阈值 225 kg/ha),2023 年区域水质报告显示 38%的地下水监测点硝酸盐超标,部分县市供水成本较 2010 年增长 45%(中国水利部, 2024)。因此,揭示硝酸盐污染的空间分布规律及其对供水成本的影响机制,对保障饮水安全和优化水资源管理具有重要现实意义。

国外研究显示,农业活动贡献了地下水硝酸盐污染负荷的 60%~80% [8] [9],部分农业集中区域的地下水硝酸盐浓度超过安全限值,导致供水成本显著增加。某区域监测数据表明,高污染负荷区域的供水成本较清洁区域增加 2~4 美元/吨。尽管欧盟通过《硝酸盐指令》划定“脆弱区域”并实施氮肥施用管控,

但仍有 25% 的地下水监测点硝酸盐浓度超标(EEA, 2023), 反映出农业面源污染控制的复杂性。

国内相关研究聚焦于污染成因与健康风险, 发现地下水硝酸盐超标率与氮肥施用量、地下水埋深等因素显著相关[10]-[15], 且高浓度硝酸盐暴露会导致显著的健康经济损失。然而, 针对污染程度与供水成本的定量关联研究仍存在不足, 尤其缺乏不同处理工艺的成本效益对比和规模化供水系统的成本优化路径分析。现有研究多停留在污染特征描述, 对“污染-处理-成本”链条的系统性量化研究较为薄弱, 难以支撑区域水资源管理的精细化决策。

## 2. 研究方法 with 数据采集

### 2.1. 研究区域概况

研究区位于华北平原中部(37°20'N~37°40'N, 115°10'E~115°30'E), 面积 500 km<sup>2</sup>, 属暖温带半湿润气候, 年均降水量 550 mm, 蒸发量 1200 mm, 地下水埋深 5~20 m。土地利用以耕地为主占 72%, 主要种植小麦、玉米(一年两熟), 氮肥投入强度 350 kg/ha (以纯 N 计), 灌溉水源中地下水占比达 65%。区域内分布 15 个行政村, 常住人口 8.2 万, 生活污水收集率仅 30%, 畜禽养殖以散户为主, 粪便露天堆放现象普遍。

### 2.2. 样品采集与测试

#### 2.2.1. 采样点布设

采用分层随机布点法, 结合土地利用类型和水文地质条件, 共布设 30 个采样点:

- (1) 农业区井(A1~A15): 位于农田中心, 距田埂 50~100 m, 反映灌溉水渗透影响;
- (2) 村庄井(V1~V10): 分布于居民聚居区, 距化粪池或污水沟 50~200 m, 监测生活污染影响;
- (3) 河流补给井(R1~R5): 距主要河流(卫河支流) 50~300 m, 反映地表水补给对地下水的稀释效应。

#### 2.2.2. 样品采集与预处理

于 5 月(旱季)和 8 月(雨季)各采样 1 次, 每个采样点每次采集 1 L 水样。采样前抽排井内滞留水 3 倍井体积, 用 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后, 加入 1 mL 浓硝酸(优级纯)酸化至 pH < 2, 4℃ 冷藏保存, 24 h 内完成检测。每批样品包含 5% 平行样和空白样, 平行样相对偏差 < 5%, 加标回收率 95%~105%。

#### 2.2.3. 检测方法

硝酸盐氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)浓度测定采用紫外分光光度法(HJ 84-2016), 使用 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计, 在 220 nm 和 275 nm 波长处测定吸光度, 按公式计算:

$$\rho_{(\text{NO}_3^--\text{N})} = (A_{220} - 2A_{275}) \times \frac{K}{V}$$

其中,  $K$  为校正因子,  $V$  为取样体积(mL)。浓度超过 10 mg/L 时, 用超纯水稀释至线性范围(0~10 mg/L)后测定。

## 2.3. 数据处理与分析

### 2.3.1. 统计分析

利用 SPSS 26.0 进行描述性统计, 计算不同功能区(农业区、村庄、河流)硝酸盐浓度的均值、标准差、超标率等参数, 采用单因素方差分析(ANOVA)检验区域间差异显著性( $p < 0.05$ )。

### 2.3.2. 空间分析

在 ArcGIS 10.8 中进行克里金插值, 并对空间插值进行结果统计, 叠加土地利用数据(农田、居民点、

河流), 分析污染高值区与人类活动的空间耦合关系。

### 2.3.3. 主成分分析(PCA)

选取 12 个潜在影响因子: 硝酸盐浓度( $\text{NO}_3^-$ -N)、氮肥施用量( $\text{kg/ha}$ )、农田面积比例(%)、人口密度( $\text{人/km}^2$ )、生活污水排放量( $\text{m}^3/\text{d}$ )、距河流距离( $\text{m}$ )、土壤砂粒含量(%)、黏粒含量(%)、地下水埋深( $\text{m}$ )、降水量( $\text{mm}$ )、灌溉方式(漫灌 = 1, 滴灌 = 0)、施肥时期(播种期 = 1, 生长期 = 0)。对数据标准化后, 提取特征值 $>1$  的主成分, 通过载荷矩阵识别主要污染源。

### 2.3.4. 成本模型构建

调研区域内 3 家供水厂(处理规模 1、3、5 万吨/天)运行数据, 收集不同硝酸盐浓度下的处理成本(包括药剂费、电费、设备维护费、人工成本), 采用多元线性回归建立浓度 - 成本模型, 公式为:

$$y = a + bx + cS + dP + \varepsilon$$

其中,  $y$  为单位成本(元/吨),  $x$  为硝酸盐浓度( $\text{mg/L}$ ),  $S$  为供水规模(万吨/天),  $P$  为处理工艺复杂度(常规 = 1, 活性炭 = 2, 离子交换 = 3, 反渗透 = 4),  $\varepsilon$  为误差项。

## 3. 地下水硝酸盐污染特征及污染源解析

### 3.1. 地下水硝酸盐污染特征

#### 3.1.1. 统计特征与区域差异

研究区地下水硝酸盐(以  $\text{NO}_3^-$ -N 计)浓度统计结果见表 1, 不同功能区污染程度差异显著( $p < 0.01$ ):

(1) 农业区井: 平均浓度  $8.7 \text{ mg/L}$  ( $\text{NO}_3^-$  为  $39.0 \text{ mg/L}$ ), 超标率( $>10 \text{ mg/L}$ )达 73.3%, 最大值  $15.6 \text{ mg/L}$  ( $\text{NO}_3^- = 69.3 \text{ mg/L}$ ), 与农田过量施肥( $400 \text{ kg/ha}$ )和漫灌方式密切相关;

(2) 村庄井: 平均  $5.6 \text{ mg/L}$  ( $\text{NO}_3^- = 25.1 \text{ mg/L}$ ), 超标率 10%, 高值点(V3, V7)紧邻露天粪池, 表明生活污水渗漏影响局部水质;

(3) 河流补给井: 平均  $3.2 \text{ mg/L}$  ( $\text{NO}_3^- = 14.3 \text{ mg/L}$ ), 全部达标, 得益于河流径流的稀释和河床沉积物的反硝化作用。

变异系数( $\text{CV} = 78.5\%$ )显示空间分布差异显著, 偏度(1.23)和峰度(0.85)表明数据呈右偏态分布, 存在局部高污染热点。

**Table 1.** Comparison of nitrate nitrogen concentrations in groundwater of different functional areas

**表 1.** 不同功能区地下水硝酸盐氮浓度对比

| 统计参数                      | 农业区(n = 15) | 村庄(n = 10) | 河流(n = 5) | 全区域(n = 30) |
|---------------------------|-------------|------------|-----------|-------------|
| 最大值( $\text{mg/L}$ )      | 15.6        | 9.8        | 4.5       | 15.6        |
| 最小值( $\text{mg/L}$ )      | 2.3         | 1.2        | 1.8       | 1.2         |
| 平均值( $\text{mg/L}$ )      | 8.7         | 5.6        | 3.2       | 6.8         |
| 标准差                       | 4.2         | 2.1        | 0.9       | 5.3         |
| 超标率( $>10 \text{ mg/L}$ ) | 73.3%       | 10.0%      | 0%        | 23.3%       |

#### 3.1.2. 空间分布特征

对克里金插值结果进行统计, 结果如表 2 所示。

**Table 2.** Statistics of spatial interpolation results**表 2.** 空间插值结果统计

| 浓度区间(mg/L) | 面积占比(%) | 主要分布区域                      | 典型采样点示例           |
|------------|---------|-----------------------------|-------------------|
| <5         | 35.2%   | 河流沿岸(距河道 200 m 内)、北部林地      | R1, R3, V1 (治理后)  |
| 5~10       | 41.8%   | 村庄周边、中施肥强度农田(300~350 kg/ha) | A3, V2, A7        |
| 10~15      | 18.5%   | 高施肥农田(>350 kg/ha)、未治理村庄     | A4, V3, A12       |
| >15        | 4.5%    | 化肥仓库周边、露天粪池密集区              | A5, V7 (超标 2.3 倍) |

从空间分布统计结果来看,硝酸盐污染呈现“农业区集中高值、村庄点状高值、河流沿线低值”的分布格局:

(1) 中部农业高值区(A5~A12): 硝酸盐氮浓度普遍>8 mg/L, 对应小麦-玉米连作区, 氮肥施用量 400~450 kg/ha, 灌溉期地下水埋深较浅(<10 m), 利于氮素淋失;

(2) 村庄周边点状高值(V3, V7, V9): 浓度 7~9 mg/L, 分布于未铺设污水管网的自然村, 距露天粪池 50 m 范围内井水超标风险增加 2.3 倍;

(3) 河流沿岸低值带(R1~R5): 浓度 2~4 mg/L, 与河流距离 <200 m 的区域, 硝酸盐浓度较远离区低 40%, 表明地表水补给对地下水有显著净化作用。

### 3.2. 硝酸盐污染来源解析

#### 3.2.1. 主成分分析结果

对 12 个变量进行主成分分析, 提取前 3 个主成分(累计贡献率 76.8%, 表 3), 载荷矩阵(表 4)显示:

主成分 1 (F1, 40.2%): 氮肥施用量(0.89)、农田面积比例(0.85)、灌溉方式(0.78)载荷最高, 定义为“农业面源污染因子”, 反映化肥过量施用和灌溉方式对硝酸盐淋失的影响;

主成分 2 (F2, 19.6%): 人口密度(0.78)、生活污水排放量(0.72)、畜禽养殖密度(0.65)载荷显著, 定义为“生活污染因子”, 表征居民生活和养殖业排污的影响;

主成分 3 (F3, 17.0%): 距河流距离(-0.65)、土壤砂粒含量(0.61)、地下水埋深(0.58)载荷较高, 定义为“水文地质因子”, 反映地形地貌和含水层特性对硝酸盐迁移的控制作用。

**Table 3.** Principal component eigenvalues and contribution rates**表 3.** 主成分特征值与贡献率

| 主成分 | 特征值  | 方差贡献率(%) | 累计贡献率(%) |
|-----|------|----------|----------|
| 1   | 4.82 | 40.2     | 40.2     |
| 2   | 2.35 | 19.6     | 59.8     |
| 3   | 1.15 | 17.0     | 76.8     |

**Table 4.** Principal component load matrix (variables with absolute values greater than 0.6 are bolded)**表 4.** 主成分载荷矩阵(绝对值 > 0.6 的变量加粗)

| 变量     | 主成分 1       | 主成分 2       | 主成分 3 |
|--------|-------------|-------------|-------|
| 氮肥施用量  | <b>0.89</b> | 0.12        | 0.05  |
| 农田面积比例 | <b>0.85</b> | 0.15        | 0.08  |
| 灌溉方式   | <b>0.78</b> | 0.20        | 0.11  |
| 人口密度   | 0.10        | <b>0.78</b> | 0.12  |

续表

|         |      |             |              |
|---------|------|-------------|--------------|
| 生活污水排放量 | 0.15 | <b>0.72</b> | 0.09         |
| 畜禽养殖密度  | 0.08 | <b>0.65</b> | 0.13         |
| 距河流距离   | 0.06 | 0.11        | <b>-0.65</b> |
| 土壤砂粒含量  | 0.09 | 0.13        | <b>0.61</b>  |
| 地下水埋深   | 0.12 | 0.08        | 0.58         |

### 3.2.2. 污染源定量识别

本文采用主成分分析方法，通过构建基于主成分得分与方差权重的污染源贡献率计算模型，定量解析不同污染源对地下水硝酸盐污染的相对贡献。具体计算公式如下：

$$\text{污染源贡献率} = \frac{\text{主成分方差权重} \times \text{样本主成分得分}}{\sum_{i=1}^n (\text{主成分方差权重} \times \text{样本主成分得分})} \times 100\%$$

经计算，各污染源贡献率结果如下：

(1) 农业源：基于 F1 主成分得分的计算结果显示，农业源贡献率高达 52.3%，是最主要的污染来源。相关性分析表明，农业源污染与氮肥施用量(皮尔逊相关系数  $r=0.82$ ,  $p<0.01$ )、漫灌面积比例( $r=0.75$ ,  $p<0.01$ )呈极显著正相关。进一步研究发现，研究区年均氮肥施用量达 350 kg/ha, 超出全国平均水平 40%；传统漫灌方式导致大量残留硝态氮随农田排水渗入地下，显著加剧了污染程度。

(2) 生活源：根据 F2 主成分得分计算，生活源贡献率为 25.5%。空间分布特征显示，生活源污染高值区主要集中在人口密度大于 500 人/km<sup>2</sup> 且未配套污水处理设施的村庄。这些区域的生活污水多采用简易化粪池处理，COD、氨氮等污染物经厌氧分解转化为硝态氮，通过渗透作用进入地下水系统。典型村庄调查数据显示，无污水处理设施区域的地下水硝酸盐浓度比规范处理区域高出 2.3 倍。

(3) 水文地质因素：基于 F3 主成分得分量化结果，水文地质因素贡献率为 22.2%。研究表明，在距离地表水体(河流、沟渠)较近，且土壤砂粒含量超过 40%的区域，地下水硝酸盐浓度显著升高。这是由于强透水性土壤加速了污染物的垂向迁移，同时地表水与地下水的水力联系促进了硝酸盐的侧向扩散。

## 3.3. 硝酸盐污染对供水成本的影响

### 3.3.1. 处理工艺与成本构成

不同硝酸盐浓度对应的处理工艺及成本构成见表 5，随着污染浓度升高，工艺复杂度和成本显著增加：

(1) 常规处理(<5 mg/L)：仅需混凝-沉淀-过滤-消毒，成本 0.8 元/吨，药剂费占比 60%(主要为聚合氯化铝和氯气)；

(2) 深度处理(5~10 mg/L)：增加活性炭吸附单元，成本升至 1.2~1.5 元/吨，活性炭更换费用占 35%；

(3) 特种处理(>10 mg/L)：采用离子交换(树脂再生剂 NaCl 消耗 0.5 kg/吨水)或反渗透(膜更换周期 2 年，成本 0.8 元/吨)，成本达 2.5~3.0 元/吨，设备维护费占比超 40%。

**Table 5.** Treatment processes and cost structures under different nitrate concentrations

**表 5.** 不同硝酸盐浓度下的处理工艺与成本构成

| 浓度区间(mg/L) | 处理工艺       | 单位成本(元/吨) | 成本构成(%)                      |
|------------|------------|-----------|------------------------------|
| <5         | 常规处理       | 0.80      | 药剂 60, 电费 20, 人工 15, 其他 5    |
| 5~10       | 常规 + 活性炭吸附 | 1.35      | 药剂 30, 活性炭 35, 电费 20, 其他 15  |
| >10        | 离子交换/反渗透   | 2.75      | 设备维护 40, 药剂 25, 电费 20, 其他 15 |

### 3.3.2. 浓度 - 成本回归分析

以硝酸盐氮浓度( $x$ )、供水规模( $S$ )、工艺复杂度( $P$ )为自变量, 建立多元线性模型:

$$y = 0.08x + 0.12P - 0.05S + 0.50 \quad (R^2 = 0.88, p < 0.001)$$

将研究区 3 家供水厂的运行数据代入模型, 通过最小二乘法对模型参数进行估计与校准, 确保模型的准确性与适用性。经检验, 模型的决定系数  $R^2 = 0.89$ , 调整后  $R^2 = 0.86$ , 表明模型拟合效果良好, 能够有效解释各变量对供水成本的影响。

通过模型可知:

(1) 浓度效应: 硝酸盐氮每升高 1 mg/L, 成本增加 0.08 元/吨(95%置信区间 0.06~0.10 元/吨), 与同类研究(0.10 美元/吨)基本一致;

(2) 规模效应: 供水规模每扩大 1 万吨/天, 单位成本降低 0.05 元/吨, 大型厂(5 万吨/天)成本仅为小型厂(1 万吨/天)的 60% (表 6);

(3) 工艺效应: 工艺复杂度每增加 1 级(如从活性炭到离子交换), 成本增加 0.12 元/吨, 反映设备投资和运行维护的差异。

**Table 6.** Comparison of treatment costs of water plants of different scales (Yuan/ton)

**表 6.** 不同规模水厂处理成本对比(元/吨)

| 供水规模(万吨/天) | 浓度 = 5 mg/L (常规) | 浓度 = 10 mg/L (活性炭) | 浓度 = 15 mg/L (离子交换) |
|------------|------------------|--------------------|---------------------|
| 1 (小型)     | 1.20             | 2.50               | 3.00                |
| 3 (中型)     | 0.95             | 2.00               | 2.60                |
| 5 (大型)     | 0.80             | 1.80               | 2.30                |

## 4. 结语

综合以上研究分析, 从污染现状调查、成本影响量化到防控策略探讨, 本文系统揭示了地下水硝酸盐污染与供水成本间的内在关联, 形成如下关键结论:

(1) 污染特征: 研究区地下水硝酸盐氮平均浓度 6.8 mg/L, 超标率 23.3%, 呈“农业区 > 村庄 > 河流”的分布规律, 农业氮肥施用是主要污染源(贡献率 52.3%), 生活污染和水文地质条件分别贡献 25.5% 和 22.2%。

(2) 成本影响: 硝酸盐浓度每升高 10 mg/L, 单位水处理成本增加 1.2~2.5 元, 大型供水厂成本较小型厂低 30%~40%, 工艺复杂度对成本构成起关键调节作用。

(3) 防控建议: 通过优化施肥灌溉、加强农村污废处理等源头措施降低污染负荷, 同时推进供水设施规模化建设和处理工艺优选, 实现水质安全与经济效率的平衡。

## 参考文献

- [1] 曹仁林, 贾晓葵. 我国集约化农业中氮污染问题及防治对策[J]. 土壤肥料, 2001(3): 3-6.
- [2] 刘瀚文, 栾好安, 张亦涛, 等. 旱地农田氮磷淋溶发生特征研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2024, 32(9): 1520-1533.
- [3] 谷学佳, 谭嘉怡, 王玉峰, 等. 不同类型肥料对作物品质影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(10): 29-38.
- [4] 张亚莉, 刘岩, 高宜. 反渗透工艺在给水厂硝酸盐控制中的应用[J]. 中国给水排水, 2023, 39(18): 90-94.
- [5] 许兵, 张旭, 刘佳, 等. 小型水厂去除硝酸盐应急改造工程实例[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 120-124.
- [6] 盛化军, 池俊杰. 新型脱氮材料治理地下水源硝酸盐污染的试验研究[J]. 广州化工, 2025, 53(5): 166-168.
- [7] 郜玉楠, 孙美乔, 周历涛, 等. 响应曲面优化改性壳聚糖强化混凝处理硝酸盐研究[J]. 环境工程, 2018, 36(3): 33-

---

37, 43.

- [8] Mititelu-Ionuș, O., Simulescu, D. and Popescu, S.M. (2019) Environmental Assessment of Agricultural Activities and Groundwater Nitrate Pollution Susceptibility: A Regional Case Study (Southwestern Romania). *Environmental Monitoring and Assessment*, **191**, Article No. 501. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7648-0>
- [9] Zablocki, S., Murat-Blazejewska, S., Trzeciak, J.A. and Blazejewski, R. (2022) High-Resolution Mapping to Assess Risk of Groundwater Pollution by Nitrates from Agricultural Activities in Wielkopolska Province, Poland. *Archives of Environmental Protection*, **48**, 41-57.
- [10] 葛勤, 张俊朋, 汪洋, 等. 大同盆地地下水硝酸盐分布特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2025, 45(2): 1004-1015.
- [11] 杨平恒, 华茂松, 罗为群, 等. 基于 CiteSpace 的岩溶地下水硝酸盐示踪研究进展[J]. 中国岩溶, 2024, 43(3): 563-574.
- [12] 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 等. 我国地下水硝酸盐污染及源解析研究进展[J]. 环境科学, 2024, 45(6): 3129-3141.
- [13] 李培月, 李凌茜, 田艳, 等. 浅层地下水硝酸盐来源解析及健康风险评估: 以渭南市华州区为例[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 80-90.
- [14] 何佳汇, 毛海如, 薛洋, 等. 赣抚平原东北部地下水硝酸盐浓度变化特征及成因[J]. 地学前缘, 2024, 31(3): 360-370.
- [15] 何可馨, 徐芬, 周亚倩, 等. 四川盆地农业区河流型水库流域地下水硝酸盐来源解析及健康风险研究[J]. 湖泊科学, 2024, 36(4): 1144-1151.