

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.027

# 稀土矿区地下水“三氮”分布特征及迁移转化规律

伏慧平<sup>1,3</sup>, 陈仁祥<sup>2</sup>, 宋勇<sup>2</sup>, 王太伟<sup>2</sup>, 高柏<sup>1,3</sup>

1. 东华理工大学 水资源与环境工程学院, 南昌 330013;
2. 江西省核工业地质局二六四大队, 江西 赣州 341000;
3. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013)

**摘要:**“三氮”浓度是稀土矿区地下水质量评价的重要指标,“三氮”污染特征的分析以及迁移转化规律的揭示对水环境监测和污染治理具有重要意义。以龙南离子型稀土矿区地下水为研究对象,通过钻孔取样和水质分析,探讨地下水中“三氮”的分布特征以及迁移转化规律。结果表明:1)龙南稀土矿区地下水中,“三氮”在松散岩孔隙水中的浓度略大于风化带裂隙水,NH<sub>3</sub>-N浓度远超地下水Ⅲ类水标准,最大超标倍数48.42倍,超标率31.71%,NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N浓度较低,无明显超标现象。2)NH<sub>3</sub>-N以浸矿区为中心,沿地下水径流方向迁移,水平迁移距离约3 500 m;“三氮”在松散岩类孔隙水中的迁移速度大于在风化带网状裂隙水,土体渗透系数越大,“三氮”迁移速度越快。3)“三氮”在地下水中的转化机制主要是硝化反应、反硝化反应以及NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的挥发作用和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的自分解反应,pH是影响矿区地下水中“三氮”富集以及相互转化的重要因素。

**关键词:**离子型稀土矿;地下水污染;“三氮”;分布特征;迁移规律

中图分类号:X523

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0180-07

## Distribution Characteristics and Migration and Transformation Rule of “Three Nitrogen” of Groundwater in Rare Earth Mining Area

FU Hui-ping<sup>1</sup>, CHEN Ren-xiang<sup>2</sup>, SONG Yong<sup>2</sup>, WANG Tai-wei<sup>2</sup>, GAO Bai<sup>1,3</sup>

1. School of Water Resources and Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. No. 264 Brigade of the Jiangxi Nuclear Industry Geological Bureau, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
3. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Concentration of “three nitrogen” is an important index for groundwater quality evaluation in rare earth mining areas. Analysis of pollution characteristics of “three nitrogen” and revelation of migration and transformation rule are great significance for water environment monitoring and pollution control. Distribution characteristics of “three nitrogen” in groundwater and its migration and transformation rule were discussed through borehole sampling and water quality analysis in Longnan ion-type rare earth mining area. The results show that: 1) rare earth mining area groundwater in Longnan, “three nitrogen” in concentration of unconsolidated rock pore water is slightly greater than that of zone of weathering fissure water, concentration of NH<sub>3</sub>-N far exceeds the groundwater class Ⅲ water standard,

收稿日期:2020-10-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41362011);江西省重点研发计划项目(2018ACG70023)

作者简介:伏慧平(1996-),男,云南曲靖人,硕士研究生;通信作者:高柏(1964-),男,江西九江人,博士,教授

the largest excess multiple is 48.42 times with over standard rate of 31.71%, and  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $\text{NO}_2\text{-N}$  concentration is low and has no obvious exceed standard. 2)  $\text{NH}_3\text{-N}$  migrates along the direction of groundwater runoff with leaching mining area as the center, and the horizontal migration distance is about 3 500 m. Migration rate of “three nitrogen” in pore water of loose rock is higher than that in fissure water of network of weathering zone. The big the permeability of soil is, the fast the migration rate is. 3) Transformation mechanism of “three nitrogen” in groundwater mainly includes nitrification reaction, denitrification reaction, volatilization of  $\text{NH}_4^+$  and self-decomposition reaction of  $\text{NO}_2^-$ . An important factor affecting enrichment and mutual transformation of “three nitrogen” in groundwater in mining areas is pH value.

**Key words:** ionic rare earth ore; groundwater pollution; “three nitrogen”; distribution characteristics; migration patterns

近年来土壤和地下水污染事件时有发生,其中工业生产造成的水土污染较为严重,场地土壤和地下水的污染范围、污染程度、持续时间以及环境风险和健康风险等是社会公众和学术界关注的焦点<sup>[1-3]</sup>。在工业等非点源污染源中,“三氮”是极其普遍的污染物,也是衡量氮污染的主要指标, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等污染方式是地下水氮污染的主要形式, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在地下水的渗透迁移过程中直接影响着水体质量<sup>[4-9]</sup>。

赣南离子型稀土原地浸矿,最早始于1995年,2008年全面推广,浸矿过程用 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液淋洗矿体,由于渗透性强弱差异的存在,含 $\text{NH}_4^+$ 废水停留在土体内部,未能达到100%回收<sup>[10]</sup>,废水以注液区为中心随时间向四周扩散,矿区地表水、地下水明显受污染,污染严重的水体颜色与高浓度的稀土矿沉淀池母液颜色相似。目前,仅国内少数学者对稀土矿区土壤中“三氮”的污染进行了研究,温春云<sup>[11]</sup>发现 $\text{NH}_4^+$ 在土壤中分布不均匀,桉树和黄竹以及水力迁移作用降低了 $\text{NH}_4^+$ 浓度;刘祖文等<sup>[12]</sup>通过土柱试验发现 $\text{NH}_4^+$ 随着降水有较强的垂直向下迁移能力;郑先坤等<sup>[13]</sup>发现氮素在矿体内的残留量与矿体风化程度、降雨量和渗透性有关;候潇<sup>[14]</sup>发现矿区黏土对 $\text{NH}_4^+$ 的吸附能力较弱,尾矿中残留的 $\text{NH}_4^+$ 可能随雨水的冲刷而流失。“三氮”在地下水中的循环较慢,对地下水的污染持续时间长,污染程度巨大<sup>[15-16]</sup>,对稀土矿区地下水氮污染进行研究具有重要意义。

本文针对赣南地区龙南离子型稀土矿区地下水,分析“三氮”在松散岩类孔隙水和风化带网状裂隙水中的分布特征,探讨“三氮”在矿区的迁移规律,为此类工程对矿山地下水的污染研究提供理论

资料。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于赣州南部,年平均降雨量1 557.13 mm,最大蒸发量1 636.81 mm,地下水主要为松散岩类孔隙水和风化带网状裂隙水,风化带网状裂隙水分布面积最广。松散岩类孔隙水赋存于第四系全新统冲积相地层中,含水层厚度1.00~10.0 m,水位埋深0.4~4.80 m,单井日涌水量10.0~249.835 m<sup>3</sup>,渗透系数3.43~24.68 m/d,富水性等级为水量贫乏至中等;风化带网状裂隙水主要赋存于混合岩、花岗斑岩风化带网状裂隙中,水力性质为潜水,局部为微承压,渗透系数0.054~0.36 m/d,富水性等级为水量贫乏。大气降水为地下水的主要补给源,径流距离短,在山前洼地处以泉或散渗形式排泄地表。

### 1.2 样品采集与分析

根据《地下水污染地质调查技术规范》(DD 2008—1),采用控制性布点与功能性布点相结合的原则,沿矿区典型纵剖面布置12个取样点(见图1),另在矿区上、中、下游:K2、K7、K11处布置3条横剖面,每条剖面布设3个取样点,共21个取样点,各取样点采集地下水水质分析样2组,分别为松散岩类孔隙水和风化带网状裂隙水,共采集样品42个。水中主要阴离子( $\text{CO}_3^{2-}$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ )用DX-120型离子色谱仪测定,主要阳离子( $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ )以及Pb使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)进行测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂比色法进行测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法进行测定, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用 $\bar{\alpha}$ -萘胺分光光度法进行测定。

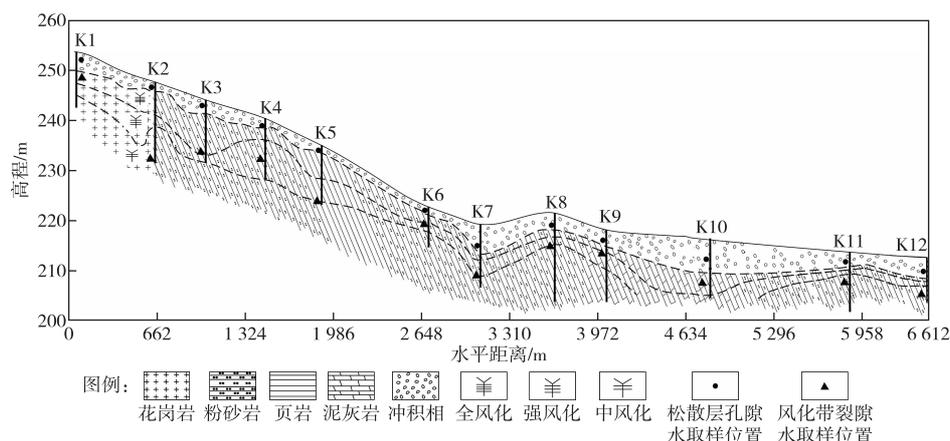


图 1 龙南稀土矿区典型剖面取样点位置图

Fig. 1 Location map of typical profile sampling points in Longnan rare earth mining area

## 2 结果与分析

### 2.1 “三氮”含量及分布特征

根据《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中对Ⅲ类水的界定,Ⅲ类水标准以人体健康基准值为依据确定,若水质不满足Ⅲ类水要求将不适宜作为生活饮用水使用,本文以Ⅲ类水标准对地

下水中“三氮”含量的限值作为判定“三氮”是否超标的依据,“三氮”浓度及超标情况见表 1。 $\text{NH}_3\text{-N}$  浓度超标率为 31.17%,最大超标倍数 48.42 倍,平均浓度 2.922 mg/L,其中 7 个样品水质为Ⅴ类水,6 个为Ⅳ类水; $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度较低,未超Ⅲ类水标准,矿区氮污染主要为  $\text{NH}_3\text{-N}$  的污染。

表 1 矿区地下水 pH 及“三氮”检测结果

Table 1 Detection results of pH value and “three nitrogen” in groundwater in mining area

污染因子	浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	平均浓度/(mg · L <sup>-1</sup> )	最大超标倍数	超标率/%	Ⅳ类水样品/个	Ⅴ类水样品/个
$\text{NO}_3\text{-N}$	0.392~18.340	3.862	0	0	0	0
$\text{NO}_2\text{-N}$	0.003~0.108	0.021	0	0	0	0
$\text{NH}_3\text{-N}$	0.044~24.210	2.922	48.42	31.71	6	7

矿区地下水中氮的存在形式主要为  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ ,图 2 为松散岩孔隙水和风化带裂隙水中“三氮”浓度的分布图。如图 2 所示,松散岩孔隙水中“三氮”的浓度略大于风化带裂隙水中的浓度, $\text{NO}_3\text{-N}$  的平均浓度分别为 3.98 和 3.74 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$  的平均浓度分别为 0.019 和 0.023 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$  的平均浓度分别为 2.365 和 3.479 mg/L,“三氮”在松散岩孔隙水和风化带裂隙水中储存、流通以及转化较均衡,“三氮”浓度的总体顺序为: $\text{NO}_3\text{-N} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{NO}_2\text{-N}$ 。 $\text{NO}_2\text{-N}$  在松散岩孔隙水和风化带裂隙水中的浓度均较低,且无明显变化规律,由于  $\text{NO}_2^-$  中的 N 为 +3 价,具有氧化性和还原性,为  $\text{NH}_4^+$  硝化反应的中间产物,存在时间短且不稳定,同时  $\text{NO}_2^-$  发生反硝化反应以及在高浓度或室温环

境下发生自分解,故  $\text{NO}_2\text{-N}$  在自然环境中的浓度较低。 $\text{NO}_2\text{-N}$  虽然浓度较低,但仍存在,说明“三氮”之间的转化仍在进行, $\text{NO}_2\text{-N}$  污染的危险性仍存在。

### 2.2 $\text{NH}_3\text{-N}$ 迁移规律

根据上述对“三氮”含量的分析,矿区地下水氮污染主要为  $\text{NH}_3\text{-N}$  的污染,为更好地揭示污染物在地下水中迁移规律,根据各取样点  $\text{NH}_3\text{-N}$  的超标情况,绘制地下水  $\text{NH}_3\text{-N}$  污染迁移图(见图 3),图中 K1 为注液区取样点,K2-K10 为注液区外取样点,地下水径流方向大致为:K1→K2→…→K10,土层上部→矿层底部。矿区从上至下分布有冲积相松散岩类、全-强-中风化花岗岩或粉砂岩等,透水性从上至下逐渐变差。

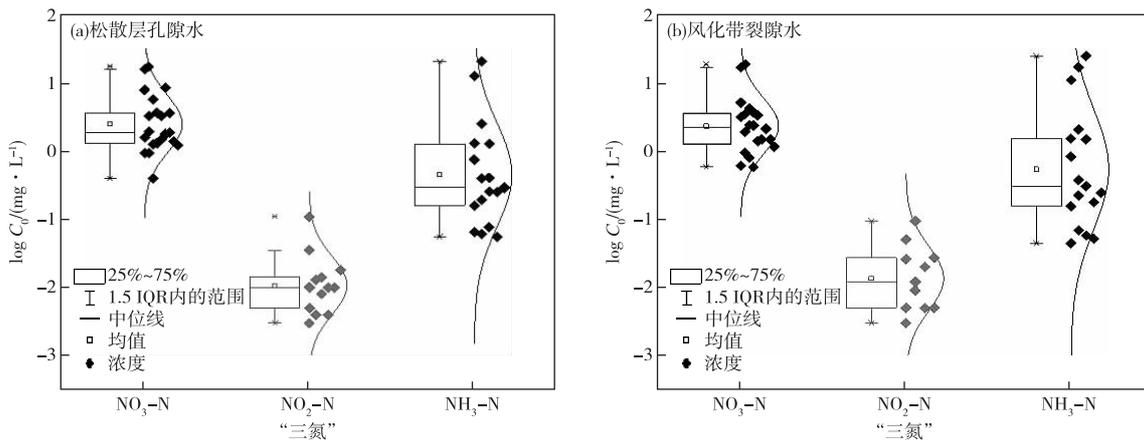


图2 松散层孔隙水和风化带裂隙水“三氮”浓度箱型图-正态分布图

Fig. 2 Box diagram-Normal distribution diagrams of “three nitrogen” concentration of pore water in loose layer and fissure water in weathering zone

由图3可知,K2、K3、K7、K10 取样点水质变化不连续,K2 取样点上部为Ⅲ类水,造成原因是该点土层上部受地表水补给,径流排泄快,导致 NH<sub>3</sub>-N 浓度急速降低;K3 取样点为Ⅳ类水,K2 和 K4 取样点为Ⅴ类水,因 K3 取样点发育较厚全风化粉砂岩,地下水循环速度快,NH<sub>3</sub>-N 浓度较低;K7 取样点位于地层褶皱处,地层上部发育有较厚的第四系坡残积层,NH<sub>3</sub>-N 在该层聚集,水质为Ⅳ类水。K7-K8 之间中风化粉砂岩逐渐变厚,地下水径流受阻,NH<sub>3</sub>-N 浓度降低,水质由Ⅳ类水变为Ⅲ类水。山前

平原地因受污染的地表水补给,K10 取样点出现Ⅳ类水,NH<sub>3</sub>-N 浓度升高,水质由Ⅲ类水降为Ⅳ类水或Ⅴ类水。水平方向,K1-K6 区间 NH<sub>3</sub>-N 污染较严重,水质呈Ⅳ-Ⅴ类水,K6-K10 区间 NH<sub>3</sub>-N 污染相对较轻,水质呈Ⅲ-Ⅳ类水;垂直方向,水质随地下水埋深的增大逐渐变好,水质经历Ⅴ类水-Ⅳ类水-Ⅲ类水。NH<sub>3</sub>-N 以注液区为中心,随地下水径流方向迁移,水体受污染程度随 NH<sub>3</sub>-N 迁移距离和下渗深度的增大而减小,土体透水性的强弱制约地下水循环速率的快慢以及 NH<sub>3</sub>-N 的迁移速度。

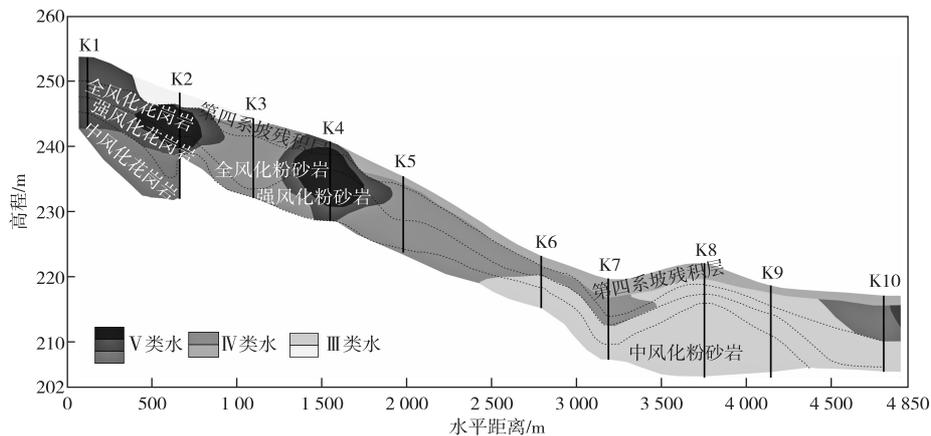


图3 龙南典型剖面地下水 NH<sub>3</sub>-N 迁移扩散图

Fig. 3 NH<sub>3</sub>-N migration and diffusion diagram of groundwater in typical profile of Longnan area

### 2.3 “三氮”转化机制

根据矿区地下水中 pH 及“三氮”浓度的相关性程度矩阵(图4),当地下水中 NH<sub>3</sub>-N 浓度较低时,NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 浓度较高,由于 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 硝化反应的产物,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 发生硝化反应,导致 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 浓度升高(如反应式 1、2 所示)。地

下水中 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 浓度较低时,NH<sub>3</sub>-N 浓度有高有低,说明 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 未全部进行硝化反应,且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度极低时可在碱性条件下被 Fe<sup>2+</sup> 还原,主要还原产物为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>,导致 NH<sub>3</sub>-N 浓度升高<sup>[17]</sup>。根据以上分析可知,“三氮”在地下水中的浓度处于动态变化,它们之间的转化相互进行。

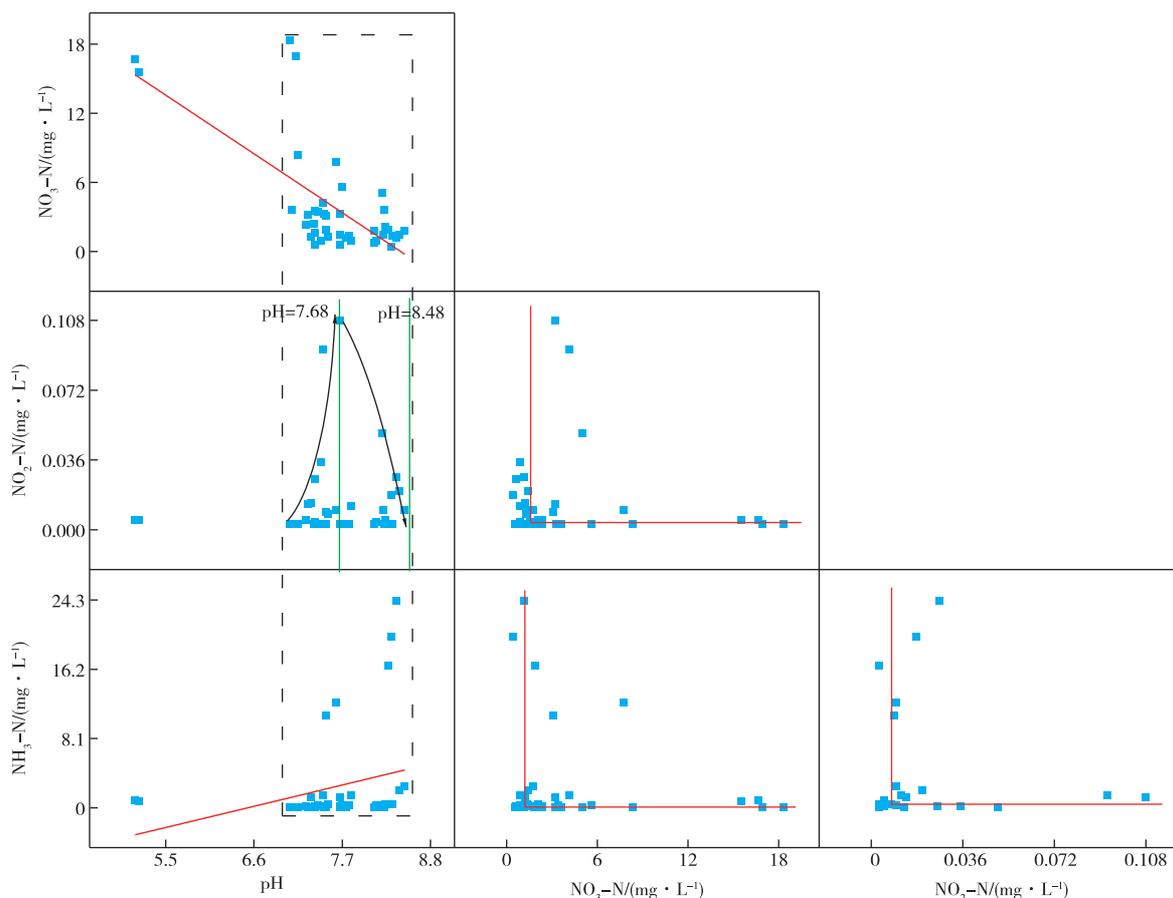


图4 pH及“三氮”浓度相关性程度矩阵

Fig. 4 pH and correlation degree matrix of “three nitrogen” concentration

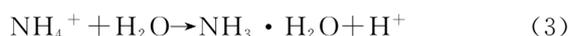
pH是影响“三氮”富集的重要因素,矿区95.2%的地下水样品测试pH为7.05~8.48。地下水中NH<sub>3</sub>-N浓度随pH的增大而增大。NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以式1和式2进行硝化反应,生成NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和H<sup>+</sup>,pH增大抑制了NH<sub>4</sub><sup>+</sup>的硝化反应,有利于NH<sub>3</sub>-N的富集。由于NH<sub>4</sub><sup>+</sup>属弱碱性离子,如式3所示,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>在地下水以NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O存在,由于NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O在水中不稳定,当温度升高或光照强烈时NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O发生式4反应,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>以NH<sub>3</sub>形式挥发,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度降低,挥发是除水循环和硝化反应外另一个使NH<sub>3</sub>-N浓度降低的原因。地下水中NO<sub>3</sub>-N浓度随pH的增大而减小,由于NO<sub>3</sub><sup>-</sup>由Fe<sup>2+</sup>或有机物作电子供应体,以式5、6进行反硝化反应,反应生成N<sub>2</sub>或N<sub>2</sub>O,NO<sub>3</sub>-N浓度降低,pH对NO<sub>3</sub><sup>-</sup>的反硝化反应表现出促进作用。NO<sub>2</sub><sup>-</sup>为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>硝化反应的中间产物,存在时间短且不稳定,同时NO<sub>2</sub><sup>-</sup>易分解和发生反硝化反应,如式1、2、5、6、7所示,NO<sub>2</sub>-N在地下水中的浓度较低。比较NO<sub>2</sub>-N在pH=7.05~8.48时的较大值可知,pH<

7.68时,NO<sub>2</sub>-N浓度的较大值呈升高趋势,pH=7.68时NO<sub>2</sub>-N浓度达到最大,为0.108 mg/L,7.68<pH<8.48时NO<sub>2</sub>-N浓度的较大值呈降低趋势,表明NO<sub>2</sub><sup>-</sup>的反硝化反应适宜pH为7.7~8.6,该项结论与前人研究结论<sup>[18]</sup>相似。

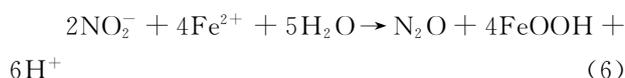
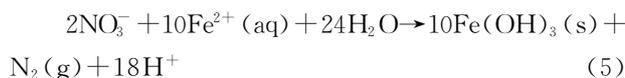
硝化:



氨挥发:



反硝化:



NO<sub>2</sub><sup>-</sup>自分解:



根据以上分析绘制矿区地下水“三氮”迁移转化

路径示意图(见图5),矿区 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的主要来源为原地浸矿使用的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液,其中也有自然条件和其他人为原因。 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 溶液自注液井入渗至土层上部,分离解析出 $\text{NH}_4^+$ , $\text{NH}_4^+$ 通过硝化反应,以及当温度升高或光照强烈时以 $\text{NH}_3$ 形式挥发,浓度降低;硝化反应生成 $\text{NO}_3^-$ ,同时出现中间产

物 $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NO}_2^-$ 通过生物途径或化学反硝化作用浓度降低,当 $\text{NO}_3^-$ 浓度极低且碱性条件下可以被 $\text{Fe}^{2+}$ 还原为 $\text{NH}_4^+$ 。随水循环的进行,部分 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 被土壤吸附以及随水力迁移流失,部分下渗至风化带裂隙水,通过硝化和反硝化反应,浓度降低。

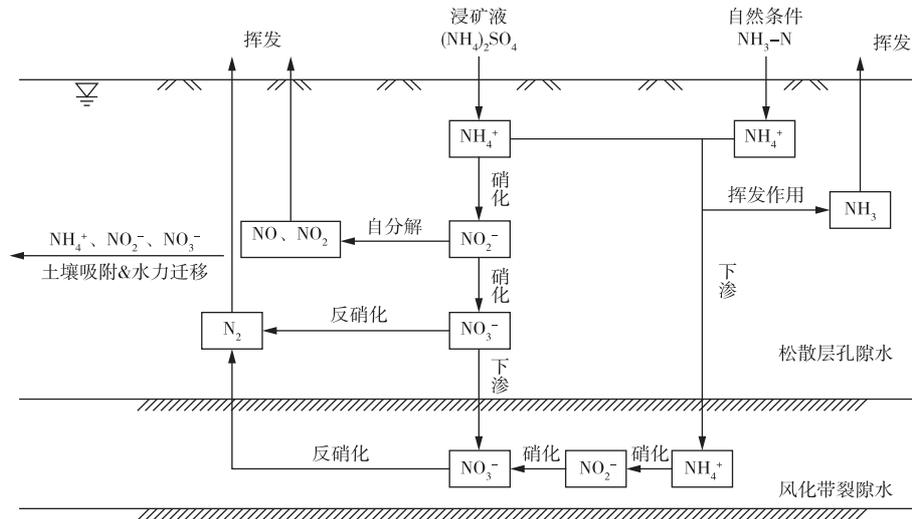


图5 “三氮”形态及转化路径示意图

Fig. 5 Diagram of “three nitrogen” form and transformation path

### 3 结论

1)原地浸矿导致龙南稀土矿区地下水氮污染,地下水中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 平均浓度为 $4.86\text{ mg/L}$ ,不适宜作生活饮用水, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度超Ⅲ类水标准的取样点约占 $31.71\%$ , $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度较低,未超Ⅲ类水标准。由于土体渗透性强弱差异的存在,在相同浸矿时间下,“三氮”在松散层孔隙水中的浓度大于风化带裂隙水中的浓度。

2)矿区地下水中“三氮”以注液区为中心,沿地下水径流方向迁移, $\text{NH}_3\text{-N}$ 水平迁移距离约 $3\ 500\text{ m}$ 。注液区“三氮”含量较高,随浸矿时间和迁移距离的增大,“三氮”含量逐渐降低,受土层渗透系数的影响,“三氮”在含水层中的迁移不连续,山前平原地因受到污染的地表水补给,地下水中“三氮”的浓度会局部升高。

3)矿区地下水中“三氮”的转化机制主要为硝化反应、反硝化反应以及氨的挥发和 $\text{NO}_2^-$ 的自分解反应。 $\text{pH}$ 是影响“三氮”富集和相互转化的重要因素,较高的 $\text{pH}$ 有利于 $\text{NO}_3^-$ 反硝化反应的进行, $\text{NH}_3\text{-N}$ 在 $\text{pH}$ 为中偏碱性环境中富集。随硝化反应和氨挥发的进行, $\text{NH}_4^+$ 转化为 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NO}_2^-$ ,同时 $\text{NH}_4^+$ 以 $\text{NH}_3$ 形式挥发, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低; $\text{NO}_3^-$

和 $\text{NO}_2^-$ 在自然环境中发生反硝化和自分解,最终以 $\text{N}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 等气体形式挥发, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度降低。

### 参考文献

- [1] 杜青青,尹芝华,左锐,等.某污染场地氨氮迁移过程模拟研究[J].中国环境科学,2017,37(12):4585-4595.  
DU Q Q, YIN Z H, ZUO R, et al. Simulation study of ammonia nitrogen migration process in a contaminated site[J]. China Environmental Science, 2017, 37(12): 4585-4595.
- [2] 段磊,王文科,杨晓婷,等.关中盆地浅层地下水氮污染的时空变化规律及其防治措施[J].干旱区资源与环境,2011,25(8):133-137.  
DUAN L, WANG W K, YANG X T, et al. Spatial and temporal variation of nitrogen pollution in shallow groundwater in the Guanzhong Basin and its prevention measures [J]. Resources and Environment in arid Regions, 2011, 25(8): 133-137.
- [3] 刘建奎,杨章贤,马雷,等.阜阳浅层地下水“三氮”污染特征及其影响因素分析[J].安徽地质,2018,28(2):123-126.  
LIU J K, YANG Z X, MA L, et al. Characteristics and influencing factors of “three nitrogen” pollution in the Fuyang shallow groundwater [J]. Anhui Geology,

- 2018,28(2):123-126.
- [4] 庞园,李志威,张明珠.广花盆地地下水三氮时空分布特征及影响因素分析[J].生态环境学报,2018,27(5):916-925.  
PANG Y,LI Z W,ZHANG M Z. Spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of groundwater trinitrogen in Guanghua Basin[J]. Journal of Ecological Environment,2018,27(5):916-925.
- [5] GERO W,ULRICH H,JOCHEN K. Nitrate dynamics in springs and headwater streams with agricultural catchments in southwestern Germany[J]. Science of the Total Environment,2020,722:137858. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.137858.
- [6] 贾卓,杨国华,张赫轩,等. 挠力河流域地下水氮污染特征分析[J]. 环境污染与防治,2018,40(4):418-422,434.  
JIA Z,YANG G H,ZHANG H X, et al. Analysis of characteristics of groundwater nitrogen pollution in Naoli River Basin [J]. Environmental Pollution and Prevention,2018,40(4):418-422,434.
- [7] 冯斌,姜新慧,冯亿年,等. 柘城地区浅层地下水中“三氮”污染特征及机理分析[J]. 中国矿业,2016,25(7):72-76.  
FENG B,JIANG X H,FENG Y N, et al. Analysis of “Three Nitrogen” pollution characteristics and mechanism in shallow groundwater of Zhecheng Area[J]. China Mining Magazine,2016,25(7):72-76.
- [8] 赵永红,张涛,成先雄. 离子吸附型稀土矿区土壤与水环境氨氮污染及防治技术研究进展[J]. 稀土,2020,41(1):124-131.  
ZHAO Y H,ZHANG T,CHENG X X. Research progress of ammonia-nitrogen pollution and control technology in soil and water environment of ion-adsorbed rare earth mining area [J]. Chinese Rare Earths,2020,41(1):124-131.
- [9] 张婷,陈世俭,傅娇凤. 四湖地区地下水“三氮”含量及时空分布特征分析[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(9):1295-1300.  
ZHANG T,CHEN S J,FU J F. Analysis of three-nitrogen concentration and spatial-temporal distribution of groundwater in Sihu Area[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2014,23(9):1295-1300.
- [10] 郭小斌,杨勇,李健,等. 低品位离子型稀土资源开采技术研究[J]. 有色金属(矿山部分),2016,68(6):16-21.  
GUO X B,YANG Y,LI J, et al. Research on the mining technology of low-grade ionic rare earth resources [J]. Nonferrous Metals (Mining Section),2016,68(6):16-21.
- [11] 温春云. 稀土尾矿化学污染物空间分布及治理效果研究[D]. 南昌:江西农业大学,2013.
- WEN C Y. Study on spatial distribution and treatment effect of chemical pollutants in rare earth tailings[D]. Nanchang:Jiangxi Agricultural University,2013.
- [12] 刘祖文,王华生,朱强,等. 南方离子型稀土原地溶浸土壤氮化物分布特征[J]. 稀土,2015,36(1):1-5.  
LIU Z W,WANG H S,ZHU Q, et al. Distribution characteristics of nitrides in soil of South China ion-adsorption rare earth ore mining area[J]. Chinese Rare Earths,2015,36(1):1-5.
- [13] 郑先坤. 离子型稀土原地浸矿废弃地中残存浸取剂与稀土的垂直分布规律研究[D]. 江西赣州:江西理工大学,2019.  
ZHENG X K. Study on the vertical distribution law of residual leaching agent and rare earth in abandoned ionized rare earth in-situ leaching mine[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2019.
- [14] 侯潇. 离子型稀土原生矿床及原地浸析尾矿中稀土和铵的分布特征[D]. 南昌:南昌大学,2015.  
HOU X. Distribution characteristics of rare earth and ammonium in primary ionic rare earth deposits and in-situ leaching tailings [D]. Nanchang: Nanchang University,2015.
- [15] 王刚伟,马青兰,朱南文,等. 渗滤液氨氮在地下咸水环境中的迁移过程[J]. 环境工程学报,2012,6(7):2133-2137.  
WANG G W,MA Q L,ZHU N W, et al. Migration of leachate ammonia nitrogen in subsurface salt water environment [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2012,6(7):2133-2137.
- [16] 海龙,梁冰,隋淑梅. 垃圾渗滤液中氨氮在表土层中迁移扩散规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(2):1-5.  
HAI L,LIANG B,SUI S M. Study on the rule of migration and diffusion of  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  among land fill leachate in the surface soil layer[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2012,23(2):1-5.
- [17] 颜青,赖睿特,张克强,等. 土壤化学反硝化及  $\text{N}_2\text{O}$  产生机理研究进展[J]. 环境科学研究,2020,33(3):736-743.  
YAN Q,LAI R T,ZHANG K Q, et al. Progress in soil chemical denitrification and the mechanism of  $\text{N}_2\text{O}$  production[J]. Environmental Science Research,2020,33(3):736-743.
- [18] 杨莎莎,宋英豪,赵宗升,等. pH值和碳氮比对亚硝酸盐反硝化影响的研究[J]. 环境工程学报,2007,1(12):15-19.  
YANG S S,SONG Y H,ZHAO Z S, et al. Study on influences of pH values and C/N ratio on denitrification via nitrite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2007,1(12):15-19.