

石河子地区地下水“三氮”空间分布特征及影响因素分析

侯 珺^{1,2}, 周金龙^{1,3}, 曾妍妍^{1,3}, 马英杰^{1,3}

(1. 新疆农业大学 水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆水文水资源工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要: 地下水是新疆石河子地区居民生活饮用、农业灌溉、工业生产的主要水源, 研究该地区地下水中“三氮”空间分布特征及影响因素, 对控制和治理当地地下水污染、保障用水安全等具有重要的意义。本研究运用 SPSS23、Sufer8 及 Mapgis67 等软件, 综合分析该地区地下水中“三氮”含量的空间变异特征以及其影响因素。结果表明: 43 组水样“三氮”含量均达到《地下水质量标准 (DZ/T 0290-2015)》Ⅲ类标准限值的要求。研究区地下水“三氮”含量空间分布特征显著, 其平面分布特征表现为: 以石河子市区为中心, “三氮”含量向四周研究区界线逐渐降低, 整体上北低南高。在垂直方向上, 浅层承压水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量大于深层承压水的含量, 但小于潜水的含量; 而深层承压水中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量大于浅层承压水的含量, 但也小于潜水的含量; “三氮”含量极大值的采样点均位于潜水含水层。该地区地下水“三氮”含量主要受氧化还原环境、酸碱环境、潜水埋深、包气带及含水层岩性等自然因素以及土地利用类型、农业污染、生活污染、畜牧养殖及农产品加工污染等人为因素的影响。

关键词: 地下水; 硝态氮; 亚硝态氮; 氨氮; 空间分布特征; 影响因素; 石河子地区

中图分类号: X523

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0001-08

Analysis of spatial distribution characteristics and influence factors of Ammonia - N, Nitrate - N and Nitrite - N in groundwater in Shihezi area

HOU Jun^{1,2}, ZHOU Jinlong^{1,3}, ZENG Yanyan^{1,3}, MA Yingjie^{1,3}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Xinjiang Hydrology and Water Resources Engineering Technology Research Center, Urumqi 830052, China)

Abstract: In Shihezi area, groundwater is the main water resource of residents' drinking and domestic water, agriculture irrigation and industrial manufacture. This study aimed to investigate the spatial distribution characteristics and influence factors of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N in groundwater. The study is of great significance to control and govern groundwater pollution, ensuring access to water security in Shihezi area. Based on software of SPSS23, Sufer8 and Mapgis67, the study analyzed the spatial distribution characteristics and influence factors of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N in groundwater. The results showed that 43 groundwater samples of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N reached Ⅲ class standard limit of Groundwater Quality Standard (DZ/T0290-2015). The spatial distribution characteristics of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N contents in the study area were significant. In horizontal direction of the study area, centered on the Shihezi urban area, contents of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N in groundwater gradually decreased to the boundaries around the study area; the contents of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N in the south were higher than that in the north gener-

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金 - 新疆联合基金重点支持项目 (U1403282、U1503282)

作者简介: 侯 珺 (1978-), 女, 天津人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为干旱区地下水资源保护。

通讯作者: 周金龙 (1964-), 男, 浙江龙游人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事干旱区地下水利用与保护、水土环境地球化学等方面工作。

ally. In vertical direction of the study area, nitrate - N content in shallow confined groundwater was higher than that in deep confined groundwater, but lower than that in unconfined groundwater. Contents of nitrite - N and ammonia - N in deep confined groundwater were higher than that in shallow confined groundwater, but lower than that in unconfined groundwater. The sampling points of maximum content of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N were all located in unconfined groundwater. The contents of ammonia - N, nitrate - N and nitrite - N were affected by natural factors and human factors. The natural factors included oxidation - deoxidization environment, acid - alkali environment, depth of unconfined groundwater, aeration zone and aquifer lithology; human factors included land utilization patterns, agricultural pollution, domestic pollution, animal husbandry pollution and agricultural products processing pollution, etc.

Key words: groundwater; nitrate - N; nitrite - N; ammonia - N; spatial distribution characteristics; influence factors; Shihezi area

1 研究背景

通常在地下水中,含氮化合物一般以 3 种形式存在(即“三氮”):离子态的硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)及氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)^[1]。当饮用“三氮”含量过多或超标的地下水时,会诱发多种癌症,甚至引起基因变异^[2]。目前“三氮”污染已威胁着全球诸多地区的地下水水质、人体健康及生态环境^[3-4]。近年来世界各地科研工作者对地下水“三氮”污染问题进行了大量研究。Debernardi 等^[5]研究了地下水中硝酸盐含量和影响含水层固有脆弱性的诸多参数之间的相关联系;Dragon 等^[6]调查了波兰 Wielkopolska 区域第四系地下水补给区的硝酸盐污染状况;朱亮等^[7]、吴海燕等^[8]、蒋万军等^[9]分别对我国鄂尔多斯高原浅层地下水中硝酸盐、东山岛和林州 - 安阳地区地下水中“三氮”分布特征及影响因素进行了分析;尹玉龙等^[10]、高彦芳等^[11]分别利用双同位素确定西安和重庆金佛山地区浅层地下水中硝酸盐的主要来源;隋淑梅等^[12]对阜新地区各类包气带岩性在北方不同地下水温度下的氨氮吸附行为进行了研究;李冬等^[13]、李爽等^[14]分别研究了低温生物净化法去除高铁锰含量的地下水中的氨氮,以及自养脱氮菌对地下水中硝酸盐的去除机制;闫雅妮等^[15]进行了地下水与地表水相互作用下硝态氮的迁移转化实验研究。上述研究在深入分析地下水“三氮”污染分布特征与来源、掌握其迁移转化规律、改进其治理工艺技术等方面,进行了积极有益的实验和探索。同时,为地下水“三氮”研究层次从局部包气带过渡到深层地下水、治理技术上实现从单纯依靠自然净化的反硝化作用到大面积人工治理技术的推广奠定了科学基础和理论依据。

位于内陆干旱区的新疆石河子地区农垦开发力度大,畜牧养殖业、农产品及食品加工制造业相对发达,地表水资源的相对匮乏,是一个以地下水作为主要水源的地区^[16]。地下水资源对维持研究区生态系统功能、保障居民生活、农业生产、社会经济稳定发展具有极其重要的作用。目前该地区地下水已受到污染,各项指标有不同程度超标^[17],但前人对该区地下水“三氮”污染研究较少,因而进一步查明石河子地区地下水“三氮”污染状况,研究其分布特征和影响因素,对当地地下水污染治理、地下水资源保护,以及保障当地用水安全具有重要的现实意义。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

石河子地区位于新疆天山中段北麓、玛纳斯河西岸,属典型大陆性干旱气候,年降水量 180 ~ 270 mm,年蒸发量 1 000 ~ 1 500 mm,降水量由南向北递减,而蒸发量则由南向北递增^[18-19]。地形总体由南向北倾斜,平均海拔 450.8 m,山前带是单一的潜水含水层,埋深 15 ~ 150 m,透水性较好;在结构单一的潜水含水层北部,承压含水层呈多层结构分布,埋深 5 ~ 300 m;卵砾石层位于含水层上部,砾石、砂砾石或砂层分布在含水层下部^[18-19]。研究区地下水补给主要依靠地表水渗漏、农田灌溉下渗和降水入渗;而地下水排泄主要通过蒸发蒸腾、人工开采和侧向流出等;由南向北含水层介质粒径减小,透水性降低,径流条件变差^[20],研究区水文地质剖面见图 1。本次研究范围界定在以玛纳斯河(以下简称“玛河”)冲洪积扇为主体,南部自山前玛河冲洪积扇顶,北部至玛河冲洪积扇缘过渡到冲洪积平原下部,东西两侧与塔西河、宁家河冲洪积扇相连的范围^[19],即以石河子市为中心,东以玛纳斯河为界,西至沙湾县,南从 152 团至北部平原区沙漠边缘的 149 团的

区域,包括了石河子市、石河子总场、147团、148团、149团、152团、沙湾县和玛纳斯县部分地区。

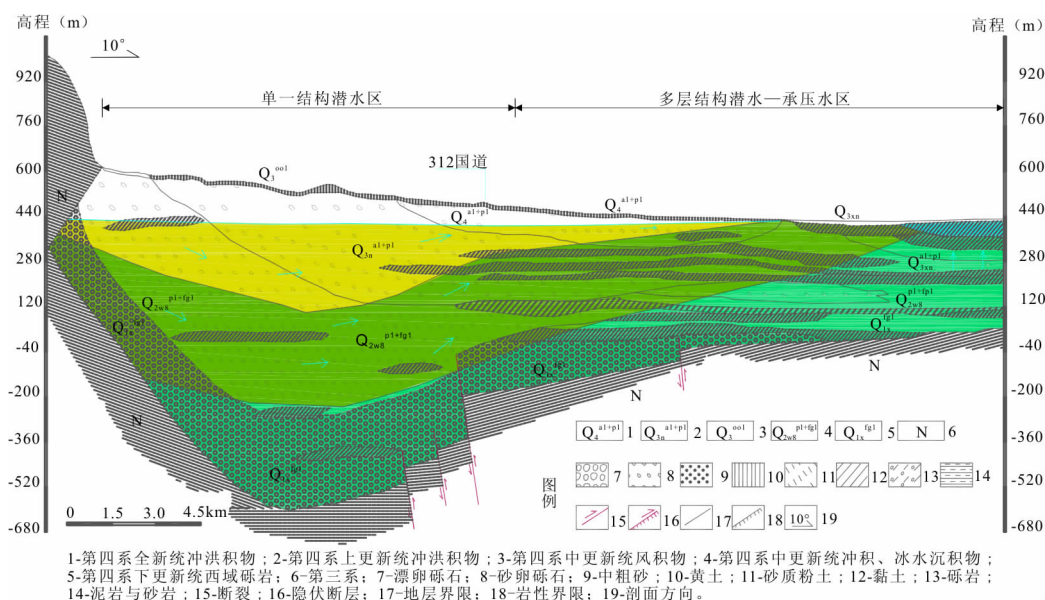


图1 研究区水文地质剖面图^[21]

2.2 样品采集与测试

依据《地下水环境监测技术规范(HL/T 164 - 2004)》^[22],结合《全国水资源综合规划技术细则》的要求,本次研究将承压水区井深 ≤ 100 m的采样点划分为浅层承压水,承压水区井深 > 100 m的采样点划分为深层承压水。于2014年8-9月,在研究区1 803 km²的范围内,采集14组潜水水样(井深20~210 m)、12组浅层承压水水样(井深13~80 m)、17组深层承压水水样(井深100~300 m),共计43组采样点(见图2)。水样检测单位是中国地质科学院水文地质环境地质研究所矿泉水检测中心,依据《生活饮用水卫生标准检验方法(GB 5750 - 2006)》^[23]进行检测,NO₃⁻-N、NO₂⁻-N和NH₄⁺-N检测下限分别为0.2、0.004和0.02 mg/L。

3 结果与分析

3.1 含量统计特征

对各采样点“三氮”含量占“总氮”含量的百分比进行统计后发现:各采样点“总氮”中所占比例较高的是NO₃⁻-N;其中有76.7%的采样点NO₃⁻-N含量占“总氮”含量达到80%以上;有11.6%的采样点NO₃⁻-N含量占“总氮”含量的55.0%~80.0%;有9.3%的采样点的NO₃⁻-N和NH₄⁺-N占“总氮”含量比例相近;其余各采样点NO₂⁻-N和NH₄⁺-N含量在“总氮”中所占比例普遍较低。利用SPSS23软件对各采样点“三氮”含量的各项统计

特征进行分析(见表1)可知:点位检出率和均值为:NO₃⁻-N $>$ NH₄⁺-N $>$ NO₂⁻-N,对比《地下水质量标准(DZ/T0290-2015)》^[24],所有水样“三氮”含量均未超过Ⅲ类标准限值。

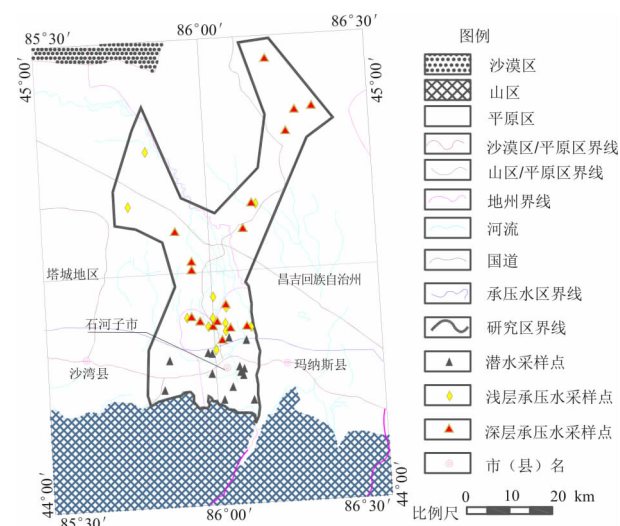


图2 研究区地下水采样点类型与分布图

3.2 空间分布特征

3.2.1 平面分布特征 变异系数是标准差与其算术平均数的比值,可以反映出数据的离散程度。通常认为小于0.1为弱变异性,在0.1~1.0属于中等变异性,大于1.0为强变异性。由表1中的变异系数可知,“三氮”含量具有明显的空间分异性,在研究范围内其分布存在差异。NO₂⁻-N分散性极为明显,平面分布差异很大,属极强变异;NO₃⁻-N分散

性明显,平面分布上差异较大,属于强变异; NH_4^+-N 分散性相对较弱,平面分布上差异较小,属中等变异性,总体而言研究区地下水“三氮”空间分布差异性为: $\text{NO}_2^--\text{N} > \text{NO}_3^--\text{N} > \text{NH}_4^+-\text{N}$ 。根据 43 组采样点的“三氮”含量用 Surfer8 和 Mapgis67 软件绘制“三氮”等值线图(见图 3),与文献[24]中的标准限值对比可知: NH_4^+-N 含量低于检出限 0.02 mg/L 的区域集中分布在西北部,且低于 I 类标准(0.02 mg/L);低于 II 类标准(0.1 mg/L)的区域分布在东北部、中部区域;低于 III 类标准(0.5 mg/L)的区域集中在南部以及石河子市区周边范围。 NO_2^--N 在东北部的含量低于检出限 0.004 mg/L;

西北部和中部的含量低于 I 类标准(0.01 mg/L);中部及南部的含量普遍低于 II 类标准(0.1 mg/L)。 NO_3^--N 在东北部和西北部的含量低于检出限 0.2 mg/L;中部地区含量普遍低于 I 类标准(2.0 mg/L);中部偏南(即石河子市区以北)以及西南部的含量普遍低于 II 类标准限值(5.0 mg/L);东南部(即石河子市区)的含量低于 III 类标准限值(20 mg/L)。综上所述,在平面上,研究区地下水“三氮”含量以石河子市区(冲洪积平原中部)为中心,向四周研究区界线逐渐降低,整体上北低南高(即由冲洪积平原中部向下部递减),较大值点和最大值点均分布在市区周边范围(冲洪积平原中部四周)。

表 1 “三氮”含量统计特征表

指标	标准值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	样本数	点位检出 率/%	点位超标 率/%	极大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	极小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	变异 系数
NO_3^--N	20.0	43	76.7	0.0	10.50	ND	1.8	2.60	1.4
NO_2^--N	1.0	43	27.9	0.0	0.63	ND	0.021	0.13	5.0
NH_4^+-N	0.5	43	65.1	0.0	0.24	ND	0.06	0.05	0.8

注:ND 为未检出,下同;标准值为《地下水质量标准(DZ/T 0290-2015)》中 III 类标准值。

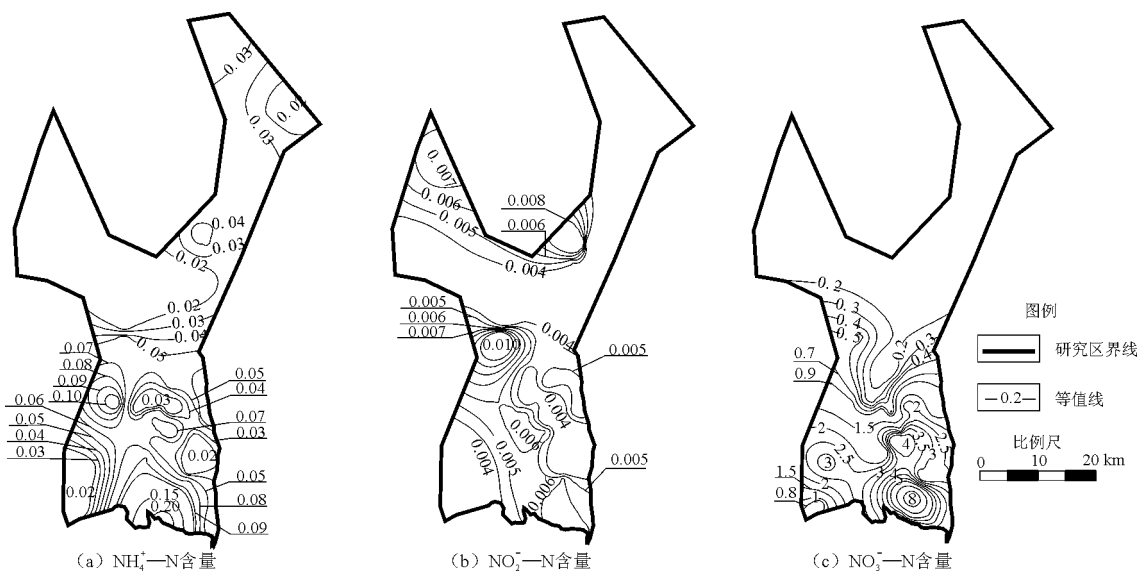


图 3 地下水中“三氮”含量等值线图(单位:mg/L)

3.2.2 垂向分布特征 由各含水层“三氮”含量统计分析(见表 2 和图 4)可知:潜水中 NO_3^--N 含量范围为 0.6 ~ 10.5 mg/L,含量均值为 4.1 mg/L; NO_2^--N 含量范围为 ND ~ 0.630 mg/L,含量均值为 0.060 mg/L; NH_4^+-N 含量范围为 ND ~ 0.24 mg/L,含量均值为 0.08 mg/L。浅层承压水中: NO_3^--N 含量范围为 ND ~ 5.8 mg/L,含量均值为 1.2 mg/L; NO_2^--N 含量范围为 ND ~ 0.012 mg/L,含量均值为 0.006 mg/L; NH_4^+-N 含量范围为 ND ~ 0.09 mg/L,

含量均值为 0.04 mg/L。深层承压水中: NO_3^--N 含量范围为 ND ~ 1.8 mg/L,含量均值为 0.5 mg/L; NO_2^--N 含量范围为 ND ~ 0.015 mg/L,含量均值为 0.007 mg/L; NH_4^+-N 含量范围为 ND ~ 0.12 mg/L,含量均值为 0.05 mg/L。在垂直方向上,浅层承压水中 NO_3^--N 含量大于深层承压水的,但小于潜水的;而深层承压水中 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 含量大于浅层承压水的,但也小于潜水的;“三氮”含量极大值采样点均位于潜水。

表 2 各含水层中“三氮”含量统计表

指标	地下水类型	样本数	极大值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	极小值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	均值/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	中位数/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	超标点数	超标率/ %
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	潜水	14	10.5	0.6	4.1	2.5	0	0.0
	浅层承压水	12	5.8	ND	1.2	0.7	0	0.0
	深层承压水	17	1.8	ND	0.5	0.4	0	0.0
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	潜水	14	0.630	ND	0.060	0.012	0	0.0
	浅层承压水	12	0.012	ND	0.006	0.005	0	0.0
	深层承压水	17	0.015	ND	0.007	0.012	0	0.0
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	潜水	14	0.24	ND	0.08	0.08	0	0.0
	浅层承压水	12	0.09	ND	0.04	0.05	0	0.0
	深层承压水	17	0.12	ND	0.05	0.04	0	0.0

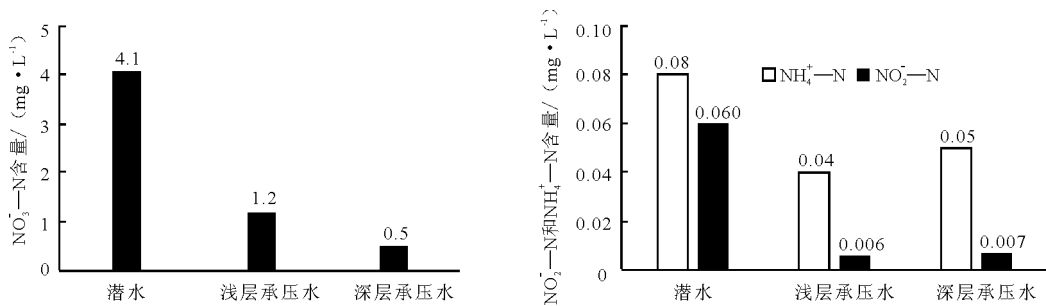


图 4 各含水层中“三氮”含量对比图

3.3 影响因素分析

3.3.1 氧化还原环境 表征地下水环境的氧化性或还原性的常规指标是氧化还原电位 (Eh)^[25]。用 SPSS23 软件分别计算各含水层的 Eh 值、“三氮”含量与 Eh 值相关系数,并对不同水质类别中“三氮”含量与 Eh 值进行统计,结果分别见表 3~5。由表 3 可知:潜水 Eh 值为 $-77.0 \sim 131.0$ mV,平均值为 102.0 mV;浅层承压水 Eh 值为 $-130.0 \sim 134.0$ mV,平均值为 57.0 mV;深层承压水 Eh 值为 $-159.0 \sim 194.0$ mV,平均值为 68.0 mV。由表 4 和表 5 可知:随着 Eh 值升高, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加,两者之间的正相关关系极显著。随着水质类别从 I 类降低到 III 类, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量均值和 Eh 均值均呈增加趋势;随着 Eh 值升高, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量降

低,它们与 Eh 值之间的负相关关系显著。随着水质类别从 I 类降低到 III 类, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量均值升高, Eh 均值降低。这是由于 Eh 降低时地下水环境向着还原条件转变, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 化学性质相对稳定而含量较高,反硝化过程使得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量不断增加。反之,当 Eh 较高时,硝化作用将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化,通过形成性质不稳定的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,最终形成 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,从而使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量减少,而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量增加。由此可知, Eh 相对较小的还原条件有利于反硝化作用,使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 不断累积,而 Eh 相对较大的氧化条件有利于硝化作用使 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量升高, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 含量在还原条件下性质稳定,比在性质不稳定的氧化条件下高。

表 3 各含水层中 pH、 Eh 和 Cl^- 统计表

含水层	Eh/mV		pH		$\text{Cl}^-/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
潜水	$-77.0 \sim 131.0$	102.0	$7.02 \sim 8.29$	7.82	$5.5 \sim 447.21$	60.44
浅层承压水	$-130.0 \sim 134.0$	57.0	$7.26 \sim 8.99$	7.98	$9.2 \sim 149.24$	60.20
深层承压水	$-159.0 \sim 194.0$	68.0	$7.69 \sim 9.30$	8.36	$5.5 \sim 74.97$	28.75

表4 地下水中“三氮”含量与 pH、Eh 和 Cl⁻ 相关系数表

指标	Eh	pH	Cl ⁻	NO ₃ ⁻ —N	NO ₂ ⁻ —N	NH ₄ ⁺ —N
Eh	1					
pH	-0.257	1				
Cl ⁻	-0.343 *	-0.179	1			
NO ₃ ⁻ —N	0.336 *	-0.378 *	0.831 **	1		
NO ₂ ⁻ —N	-0.313 *	-0.285	0.203	-0.005	1	
NH ₄ ⁺ —N	-0.306 *	0.484 **	0.384 *	0.222	0.380 *	1

注: ** 表示显著性水平为 0.01 (极显著); * 表示显著性水平为 0.05 (显著)。

表5 地下水中“三氮”含量与 Eh 值对比分析表

指标	各类别氮标准/ (mg · L ⁻¹)	样本 数量	极大值 (mg · L ⁻¹) / mV	极小值 (mg · L ⁻¹) / mV	均值 (mg · L ⁻¹) / mV	中位数 (mg · L ⁻¹) / mV
NO ₃ ⁻ —N	I 类(≤2.0)	31	1.8/194.1	ND/-159.0	0.5/62.6	0.4/91.6
	II 类(≤5.0)	8	4.2/130.7	2.5/84.7	3.5/111.8	3.6/115.8
	III 类(≤20)	4	10.5/125.0	5.8/90.2	8.6/119.7	9.0/121.8
NO ₂ ⁻ —N	I 类(≤0.01)	39	0.008/150.0	ND/-159.0	0.004/97.0	0.006/113.0
	II 类(≤0.1)	3	0.091/194.1	0.012/37.2	0.039/95.6	0.015/95.5
	III 类(≤1.0)	1	0.630/-77.0			
NH ₄ ⁺ —N	I 类(≤0.02)	16	0.02/130.7	ND/-0.4	0.01/77.1	0.01/92.2
	II 类(≤0.1)	21	0.10/194.1	0.03/-159.0	0.06/75.4	0.06/108.0
	III 类(≤0.5)	6	0.24/125.0	0.12/-130.0	0.16/41.3	0.13/108.0

3.3.2 酸碱环境 硝化反应程度也会受到酸碱环境的影响, pH 值超过 6.4 ~ 7.9 的范围会影响硝化细菌的活性, 而碱性环境会减缓硝化作用的反应过程^[26]。由表 3 可知: 有 35.7 % 的水样(5 组) pH 值超过 7.9, 属于偏碱性水; 浅层承压水中 41.7 % 的水样(5 组) pH 值超过 7.9, 属于偏碱性水; 深层承压水中 70.6 % 的水样(12 组) pH 值超过 7.9, 属于碱性水。由表 4 可知: 随着 pH 值升高, NO₃⁻—N 含量减少, 两者之间负相关关系显著; 而随着 pH 值升高, NH₄⁺—N 含量增加, 两者之间正相关关系极显著。综上所述, 酸碱环境对硝化作用的有利程度从深层承压水, 到浅层承压水, 再到潜水, 依次递增, 使得潜水和浅层承压水中 NH₄⁺—N 更易被硝化形成 NO₃⁻—N; 而深层承压水由于 pH 值相对较高抑制了硝化作用使得 NO₃⁻—N 含量较低。

3.3.3 潜水埋深 地下水“三氮”含量通常也会受到潜水埋深的影响^[27]。“三氮”含量与潜水埋深关系见图 5。由图 5 可知: 潜水埋深越大, 潜水水位越低, 使有利于硝化反应的包气带范围增加, 性质不稳定的 NO₂⁻—N 进一步硝化形成 NO₃⁻—N, 使埋深大于 80 m 的采样点 NO₂⁻—N 含量降低, 而 NO₃⁻—N 含量随埋深增加持续升高。由于包气带浅表层中的

阴离子颗粒对进入土壤的 NH₄⁺—N 具有迅速的吸附作用, 使潜水埋深越大, NH₄⁺—N 含量越低^[28]。

3.3.4 包气带和含水层岩性 包气带土体和含水层介质对 NH₄⁺—N 具有明显的吸附作用, 使其进入土壤后先被迅速吸附, 而后再进行硝化反应。吸附作用越强, 参与硝化反应的 NH₄⁺—N 就越少, 从而反应中间产物 NO₂⁻—N 和最终产物 NO₃⁻—N 含量越低。包气带和含水层岩性会直接影响其吸附性, 其介质颗粒越细, 厚度越大, 渗透性越差, 对 NH₄⁺—N 吸附作用越强; 反之则对 NH₄⁺—N 吸附能力越低^[8]。研究区地下水的潜水区包气带和含水层岩性为卵砾石、砾石为主, 结构松散, 透水性和透气性较好, 利于硝化反应进行, 使得“三氮”含量均值最大; 而中北部的承压水区, 其包气带和含水层岩性以砂砾石、亚砂石、亚黏土为主, 颗粒较细, 透水性较差, 利于反硝化反应的进行, “三氮”含量均值普遍小于潜水区(见表 2)。

3.3.5 土地利用类型及农业污染 研究区土地利用类型以农用地(耕地)和建设用地(农村居民住宅地)为主。43 组采样点中 29 组属于耕地, 14 组属于农村居民住宅用地, 由表 6 可知该地区耕地中地下水“三氮”含量普遍高于农村居民住宅用地, 说明土

地利用类型是影响地下水中“三氮”空间分布差异的因素之一。另外有研究表明农业活动中的种植制度等因素通过影响氮肥利用效率而影响地下水中的“三氮”含量^[30-32]。根据研究区统计年鉴,1992 - 2014 年,由于受耕地等级、灌溉制度、施肥技术等诸多因素的影响,研究区农作物耕作面积和氮肥施用

量逐年增加,其中粮食作物种植面积呈现下降趋势,而棉花种植面积呈现上升趋势。说明研究区氮肥施用量增加、利用效率相对较高,粮食作物和棉花种植面积的变化,使土壤中氮肥累计量分布不均匀,从而进一步影响该地区地下水中“三氮”空间分布。

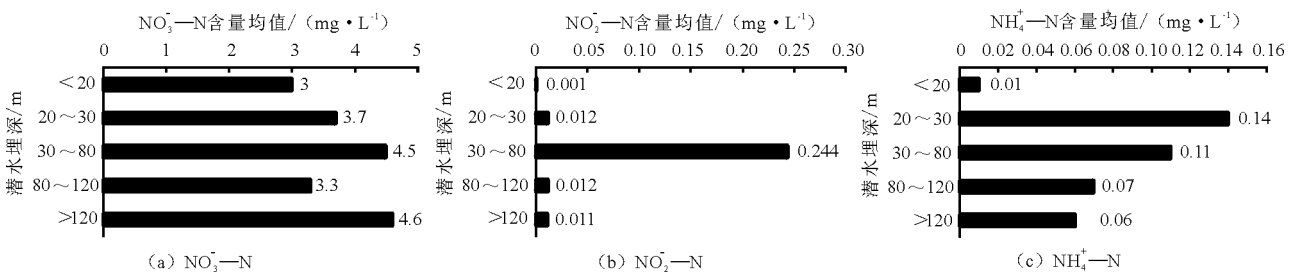


图 5 “三氮”含量与潜水埋深关系图

表 6 不同土地利用类型地下水“三氮”平均含量统计表						
土地类型	NO ₃ ⁻ —N 含量	水质类别	NO ₂ ⁻ —N 含量	水质类别	NH ₄ ⁺ —N 含量	水质类别
农用地	1.9	I 类	0.006	I 类	0.06	II 类
建设用地	1.1	I 类	0.004	I 类	0.04	II 类

3.3.6 其它人为污染 由于 Cl⁻ 属于保守离子,若地下水中含氮化合物与 Cl⁻ 含量呈现正相关,则说明人为污染是影响其迁移转化的重要因素,氮主要来自生活污水、人畜的排泄物^[9,33-35]。研究区内分布有 4 座污水处理厂、2 座垃圾处理场、5 家畜牧养殖场、3 家农产品加工企业(见图 6)。由表 4 可知,研究区地下水中 Cl⁻ 与 NO₃⁻—N 呈极显著的正相关关系,与 NH₄⁺—N 呈显著的正相关关系,但与 NO₂⁻—N 相关性不显著,说明该地区地下水含氮化合物来自上述人为污染源。本次地下水采样点,分别位于居民区、农业灌区以及污染源附近,水质监测结果较客观反映出了上述人为污染源对地下水水质的影响。

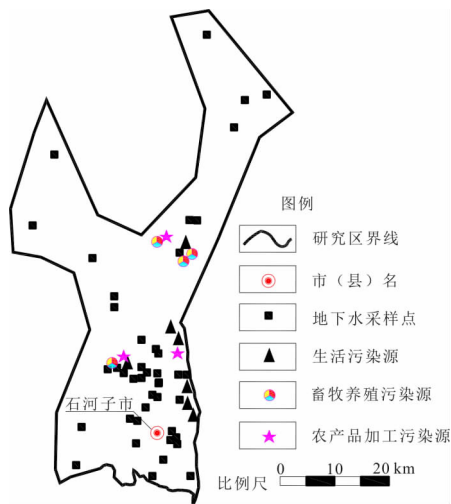


图 6 研究区污染源分布图

4 结 论

(1) 总体而言,研究区地下水中“三氮”含量较低;点位检出率和含量均值排序为: NO₃⁻—N > NH₄⁺—N > NO₂⁻—N; 对比《地下水质量标准 (DZ/T 0290 - 2015)》,所有水样“三氮”含量均未超过Ⅲ类标准限值。

(2) 研究区地下水“三氮”平面分布特征为:以石河子市区为中心,含量向四周研究区界线逐渐降低,整体上北低南高,较大值点和最大值点均分布在市区周边范围。在垂直方向上,浅层承压水中 NO₃⁻—N 含量大于深层承压水的含量,但小于潜水的含量;而深层承压水中 NO₂⁻—N 和 NH₄⁺—N 含量大于浅层承压水的含量,但也小于潜水的含量;“三氮”含量极大值采样点均位于潜水。

(3) 氧化还原环境、酸碱环境、潜水埋深、包气带及含水层岩性、土地利用类型、农业污染、生活污染、畜牧养殖及农产品加工污染等因素,均会不同程度地影响研究区地下水中“三氮”的迁移和转化。

参考文献:

[1] 许 可,陈鸿汉. 地下水中三氮污染物迁移转化规律研究进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21 (S2): 421 - 424.

[2] SINDELAR J J, MILKOWSKI A L. Human safety controversies surrounding nitrate and nitrite in the diet [J]. Ni-

- tric Oxide Biology & Chemistry, 2012, 26(4): 259–266.
- [3] 文冬光, 林良俊, 孙继朝, 等. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学, 2012, 37(2): 220–228.
- [4] 万长园, 王明玉, 王慧芳, 等. 华北平原典型剖面地下水三氮污染时空分布特征[J]. 地球与环境, 2014, 42(4): 472–479.
- [5] DEBERNARDI L, LUCA D A D, LASAGNA M. Correlation between nitrate concentration in groundwater and parameters affecting aquifer intrinsic vulnerability[J]. Environmental Geology, 2008, 55(3): 539–558.
- [6] DRAGON K. Groundwater nitrate pollution in the recharge zone of a regional Quaternary flow system (Wielkopolska region, Poland) [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 68(7): 2099–2109.
- [7] 朱亮, 杨明楠, 张玉玺, 等. 东胜城区及周边地区浅层地下水硝酸盐分布及影响因素研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(5): 37–41+45.
- [8] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 等. 东山岛地下水“三氮”空间分布特征[J]. 环境科学, 2015, 36(9): 3203–3211.
- [9] 蒋万军, 谢倩, 王广才, 等. 林州–安阳地区地下水三氮分布特征及其影响因素[J]. 地球与环境, 2016, 44(4): 422–430.
- [10] 尹玉龙, 王周锋, 王文科, 等. 利用氮氧同位素定量识别地下水中硝酸盐来源[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(5): 104–108+113.
- [11] 高彦芳, 沈立成, 杨平恒. 重庆金佛山地下水的氮污染源研究[J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(6): 23–26+31.
- [12] 隋淑梅, 尹志刚, 姜利国, 等. 考虑地下水温度的土壤吸附氨氮动力学行为研究[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 217–220+225.
- [13] 李冬, 曹瑞华, 杨航, 等. 生物净化低温高铁锰氨氮地下水氨氮去除机制[J]. 中国环境科学, 2017, 37(7): 2623–2632.
- [14] 李爽, 石珍瑜, 马会强. 等. 氢自养脱氮法去除污染地下水中硝酸盐氮的模拟研究[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 811–817.
- [15] 闫雅妮, 马腾, 张俊文, 等. 地下水与地表水相互作用下硝态氮的迁移转化实验[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 783–792.
- [16] 杨春, 康宏, 马超. 新疆主要城市集中式饮用水源地水质评价[J]. 干旱环境监测, 2008, 22(3): 140–147.
- [17] 曾妍妍, 周金龙, 高业新, 等. 新疆石河子地区地下水污染评价及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 197–202.
- [18] 董合干, 王栋, 王迎涛, 等. 新疆石河子地区棉田地膜残留的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 182–186.
- [19] 陈冰, 刘斌, 李清明, 等. 新疆维吾尔自治区石河子市城市地质勘查报告[R]. 昌吉: 新疆地质矿产局第二水文地质工程地质大队, 1990.
- [20] 董新光, 邓铭江. 新疆地下水资源[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
- [21] 吴彬. 石河子市地下水系统演化规律与水环境效应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
- [22] 国家环境保护总局. HL/T 164–2004 地下水环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [23] 中华人民共和国卫生部, 国家标准化管理委员会. GB 5750–2006 生活饮用水卫生标准检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [24] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0290–2015 地下水质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [25] 钱会, 马致远, 李培月. 水文地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
- [26] 姜翠玲, 夏自强, 刘凌, 等. 污水灌溉土壤及地下水三氮的变化动态分析[J]. 水科学进展, 1997, 8(2): 183–187.
- [27] 鲁垠涛, 冷佩芳, 秦蔚, 等. 密云水库上游流域地下水中氮素污染特征及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 148–156.
- [28] 段磊. 关于盆地地下水环境氮污染机理与地下水水质安全评价[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [29] 赵同科, 刘宝存, 张成军, 等. 泛环渤海地区地下水硝酸盐格局与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [30] 陈建耀, 王亚, 张洪波, 等. 地下水硝酸盐污染研究综述[J]. 地理科学进展, 2006, 25(1): 34–44.
- [31] 吴大付, 陈红卫. 粮食作物不同种植模式对地下水硝酸盐含量的影响[J]. 农业现代化研究, 2007, 28(1): 107–109, 113.
- [32] 姜逢清, 田长彦. 新疆典型地区主要农业资源利用效率分析[J]. 资源科学, 2001, 23(2): 65–69.
- [33] LIU C Q, LI S L, LANG Y C, et al. Using $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values to identify nitrate sources in karst groundwater Guiyang Southwest China[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(22): 6928–6933.
- [34] 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.
- [35] 黄海波, 高扬, 曹杰君, 等. 都市农业村域地下水非点氮污染及其风险评估[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 56–59.
- [36] 於嘉闻, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆喀什地区东部地下水“三氮”空间分布特征及影响因素[J]. 环境化学, 2016, 35(11): 2402–2410.