

文章编号:1004-4116(2023)01-0059-10

酒泉东盆地地下水“三氮”分布特征 及健康风险分析

杨亚兵^{1,2}, 孙 鑫^{1,2}

(1. 甘肃省地下水工程及地热资源重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省地质环境监测院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要:为探讨河西走廊地下水“三氮”的污染现状和个人健康风险。本文以酒泉东盆地为例,通过数据统计、空间分布趋势、污染源和影响因素分析的手段,从“三氮”分布、迁移和影响因素及其健康风险评价进行研究。结果表明:在其独特的地形地貌、氧化还原环境、包气带和含水层岩性、潜水的埋深、酸碱环境和地下径流条件等自然因素以及生态环境的破坏和城市化的发展等人为因素影响下,研究区地下水“三氮”总体含量较低,污染相对较轻,仅有一处 NO_3^- -N含量超过标准限值;区域分布上,“三氮”含量具有明显的北高南低的规律, NO_3^- -N和 NO_2^- -N含量东、西两侧高,中间低, NH_4^+ -N含量由西北向东南逐渐减少。“三氮”个人年健康风险的整体分布趋势基本一致,由西部人口密集区域向东部人口非密集区域逐渐递减。

关键词:酒泉东盆地;地下水“三氮”;分布特征;健康风险评价

中图分类号: P641

文献标志码: A

地下水含氮污染物多以硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮(简称“三氮”)的形式存在,其中硝酸盐氮属于常量组分,污染较为普遍;亚硝酸盐氮属于微量组分,虽然含量较少,但作为衡量水体毒理性的标志而受到关注;氨氮作为水体富营养化程度的重要标志,往往与生活污染和农业污染有着密不可分的联系。随着经济社会的发展,人们日益注重身心健康,地下水中的“三氮”污染物逐渐被人们所关注和重视。在地下水质量检测、评价和保护中,“三氮”含量常作为必要检测的指标之一。然而,全球范围内地下水“三氮”污染情况却日益突出:欧洲 Estonia 地区地下水中氨氮最大含量达到了 4 mg/L^[1],Ibadan 地区的 90%地下水中氨氮含量超过 0.3 mg/L^[2],丹麦地下水氨氮含量在 30 年的时间里增加了 3 倍;土耳其地下水中硝酸盐含量在 3 年内增加了 7 倍^[3];根据上世纪 80 年代初期我国 50 个城市地下水水质监测数据,42%的城市地下水受到不同程度的硝酸盐氮污染^[4]。研究表明地下水“三氮”含量增加的原因^[5]是在城市化过程中人口密度的增加、农业活动和排放生活废水造成的。近几年,国内外地下水“三氮”的相关

研究主要集中在不同区域的空间分布特征及影响因素、迁移转化的机理和防污性能评价治理等方面。其中,影响地下水“三氮”含量的因素有氧化还原条件、pH、包气带岩性结构、补径排条件、潜水埋深和土地利用等^[6-9];区域环境水文地球化学场会影响着地下水“三氮”的存在形式,含水层的岩性和锰离子浓度场与地下水中氮的存在形式同样密切相关^[10],铁的氧化作用可以促进铵态氮的吸附和硝化反应的进行^[11]。针对地下水“三氮”污染的研究已逐渐成为当今世界地下水环境及安全的热点问题之一。

祁连山是我国西部重要的生态安全屏障,是河西走廊的“生命线”和“母亲山”。随着全球变暖,祁连山雪线逐年上升^[12],冰雪融水逐年减少^[13],使其下游的河水流量减少、河流沿线地区地下水位下降、尾间湖泊干涸、沿途绿洲缺少水源出现植被退化等现象^[14],逐渐威胁到河西走廊的生态安全线。同时,长期重经济发展、轻生态保护的惯性思维,祁连山国家自然保护区及其周边范围内遭到违法采矿、违规建造水利水电设施、偷排偷放等现象屡禁不止^[15],造成祁连山区及其河西走廊水土污染程度进一步加重;

收稿日期:2022-06-14

作者简介:杨亚兵(1988~),女,本科,主要从事水工环、地质灾害方面的研究。E-mail:827735327@qq.com

伴随着河西走廊经济发展和人口的不断增加,农业灌溉配套的引水工程、水利工程的新建和地下水超采,地下水也受到不同程度的污染^[16-17]。近年来针对该区地下水“三氮”的研究程度较低,2018年,刘明霞等对黑河流域地下水“三氮”污染现状进行了分析研究,得出黑河流域地下水硝酸盐呈现线状和面状污染趋势,亚硝酸盐和氨氮呈点状污染特性,地下水“三氮”污染需引起重视^[18]。为探讨祁连山区生态环境的破坏对河西走廊地下水“三氮”的影响,本文以河西走廊酒泉东盆地地下水为例,从分布特征、影响因素和个人年健康风险评价三方面进行研究,为该地区地下水氮污染防治提供依据,为地下水环境及安全评价提供参考。

1 研究区水文地质条件

1.1 自然地理概况

酒泉东盆地位于河西走廊中部,东侧以高台县至南华镇沿线、西侧以嘉峪关断裂—文殊山为界,南侧依祁连山,北侧连金塔山—合黎山(图1)。该地区属于大陆性干旱气候,干燥寒冷,降水量极少且蒸发强烈、日照长,多年平均降水量85.6 mm,平均蒸发量1 999.2 mm。地理坐标为东经98°09′~99°47′,北纬39°04′~39°54′。主要河流有黑河及其支流北大河、洪水坝河、丰乐河、马营河等,均发源于祁连山脉,其年径流量见表1。研究区面积约为 8.12×10^3 km²。行政隶属于酒泉市肃州区、张掖市高台县和嘉峪关市。

1.2 水文地质条件

酒泉东盆地第四系松散层厚度100~1 000 m,嘉峪关市—酒泉市一带自南西向北东渐薄;清水镇—红崖子一带自南向北渐薄,北部金塔南山、合黎山山前小于50~100 m。含水层厚度30~300 m,自南向

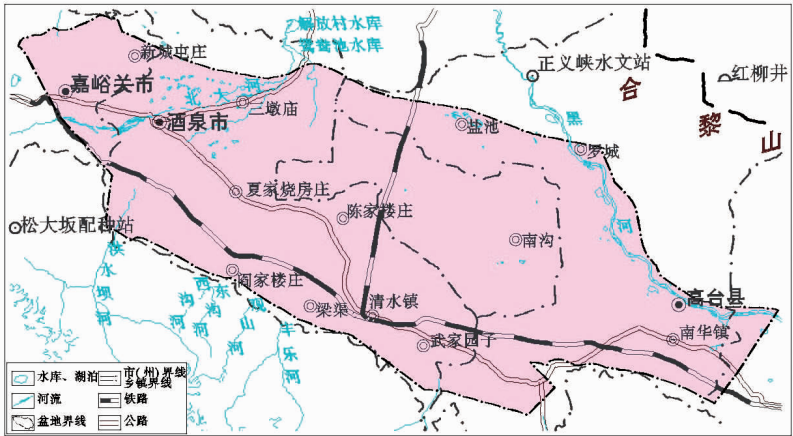


图 1 研究区自然地理及交通位置图

Fig. 1 Physical geography and traffic location map of the study area

北渐薄,最厚可达500 m以上(如酒泉西洞乡);东南部的红崖子—红崖子一带,含水层厚度50~200 m,自山前至清水—元山子断层渐厚。大致以新城乡—下河清农场为界,西南部为大厚度砂砾卵石层,其间赋存潜水;东北部为广大的细土平原,含水层分两层,表层为潜水,下部为承压水(图2)。

潜水带水位埋深10~200 m,自南向北渐浅,红崖子—清水—嘉峪关以南的山前地带大于200 m。新的勘探证实,存在于高台新坝北侧的新构造运动,使断层上下盘之间产生50~100 m的地下水位差,造成了近山地段水位埋深小于盆地内部的地下水分布特征。含水层富水性以酒泉市以西至嘉峪关大断层之间北大河沿岸最佳,单井涌水量大于5 000 m³/d;清水—红山以南的山前地带最差,单井涌水量小于1 000 m³/d;其它地带1 000~5 000 m³/d。水质较好,矿化度0.5~1.0 g/L。

承压水带水位(水头)埋深1~10 m,自南西向北东和自南向北渐浅,铎尖—临水及高台盐池一带水头高于地表而呈自流。含水层富水性呈现自南西向北东由强变弱的递变规律。酒泉市、新城乡以东,城郊农场、边湾农场以西,单井涌水量5 000~10 000 m³/d;城郊、边湾农场以东至上五星、五家楼、何家庄一带,单井涌水量3 000~5 000 m³/d;依次向东至漫水滩、东坝格楞一带及黑河沿岸黑泉以南地带,单

表 1 酒泉东盆地主要河流年均径流量统计表

Table 1 Annual average runoff of main rivers in Jiuquan East Basin

河流名称	黑河	北大河	洪水坝河	观山河	丰乐河	马营河	摆浪河
汇水面积(km ²)	10 009	6 883	1 574	135	568	619	211
年均径流量(10 ⁸ m ³ /a)	15. 89	6. 38	2. 81	0. 21	0. 99	1. 14	0. 41

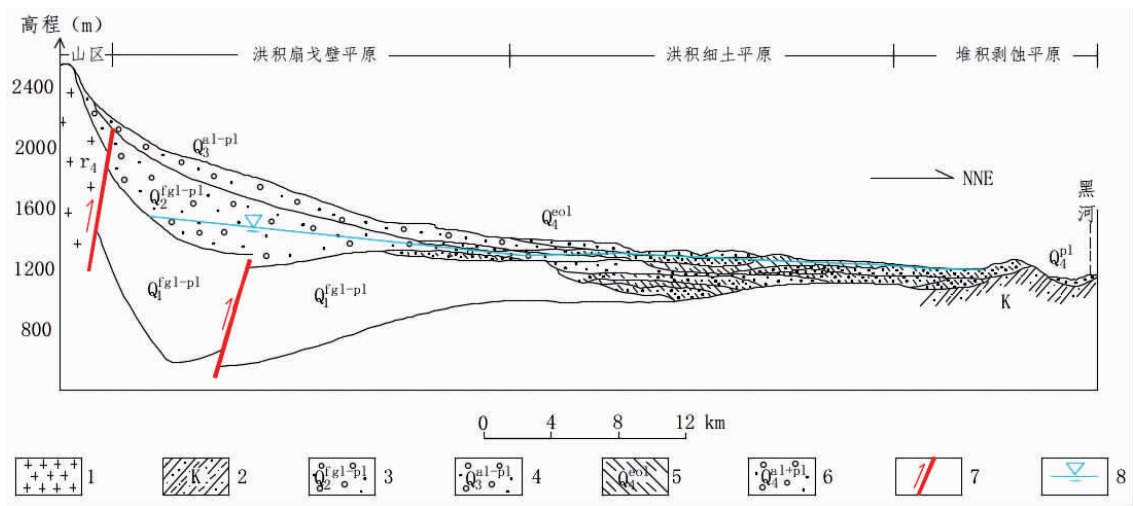


图 2 研究区水文地质剖面示意图(据甘肃省地质环境监测院,2018)

Fig. 2 Hydrogeological profile of the study area

1—花岗岩;2—白垩纪砂砾岩;3—中更新统冰洪积砂砾卵石;4—上更新统冲洪积砂砾卵石;5—全新统风积亚粘土;
6—全新统冲洪积砂砾卵石;7—断层;8—地下水位

井涌水量 1 000 ~ 3 000 m³/d; 其它地带单井涌水量小于 100 ~ 1 000 m³/d。水质良好,矿化度 0.5 ~ 1.0 g/L,黄泥堡及其以北地带水质较差,矿化度 1.0 ~ 3.0 g/L,局部表层大于 3.0 g/L。

2 样品测试与研究方法

2.1 样品采集与分析

依托研究区地下水长期观测点,采集 35 组潜山水样(图 3,表 2),井深 1.51 ~ 122.54 m 范围,采样时间为 2018 年 6 ~ 7 月。水样采集和分析根据《地下水污染调查评价规范》(DD2008-01)和《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ0130-2006)进行,分析精度、精密度以及重复样和空白样的监控都有保障,保证试验数据的科学性和有效性。NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 的检测下限分别为 0.2 mg/L、0.001 mg/L 和 0.02 mg/L,针对未检出的数据按其检测下限的一半进行分析。

2.2 研究方法

采用统计方法,对研究区地下水“三氮”的特征值进行统计,分析其平面分布特征,和影

响因素;采用美国国家环境环保局(EPA)推荐的健康风险评价模式,对酒泉东盆地地下水“三氮”引起的个人年健康风险进行评价。

3 结果与分析

3.1 地下水“三氮”含量统计

对 35 组采样点“三氮”所占“总氮”的百分比进行统计,其所占比例最高的是 NO₃⁻-N;NO₃⁻-N 含量在 97.1%的采样点中占“总氮”的 85 %以上;在 2.9%的采样点中,NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量相近。

“三氮”含量的均值、点位检出率和超标率分别

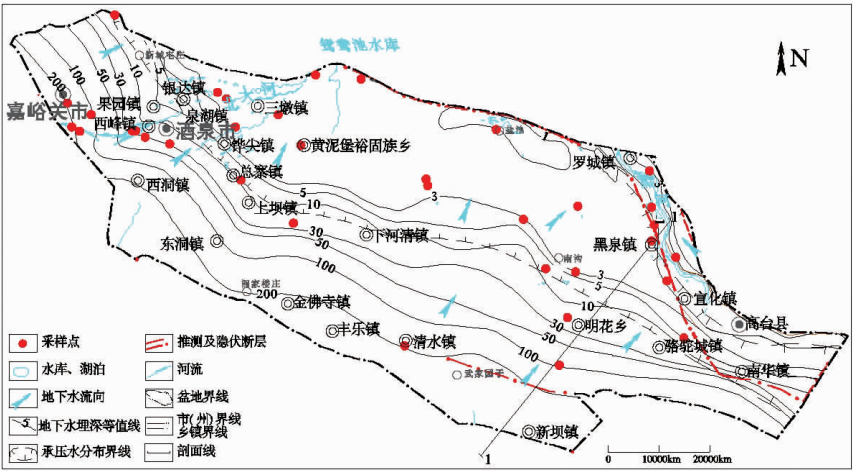


图 3 研究区地下水采样点分布图

Fig. 3 Distribution of groundwater sampling sites in the study area

表 2 研究区地下水动态监测点一览表
Table 2 List of groundwater dynamic monitoring sites
in the study area

序号	经度(°)	纬度(°)	位置
1	98. 4018	39. 9425	断山口村
2	98. 3008	39. 7449	北大河水源地
3	98. 3192	39. 7373	北大和水源地
4	98. 3453	39. 7668	嘉峪关方特欢乐世界
5	98. 2906	39. 7871	中国移动(嘉峪关观蒲村 孙萍商店特约代理点)
6	98. 4687	39. 7263	西峰镇
7	98. 4388	39. 7379	锦玉公园
8	98. 5252	39. 7141	酒泉市区东南
9	98. 6364	39. 8048	杨洪八组
10	98. 6563	39. 7933	杨洪三组
11	98. 6763	39. 7433	沙滩村
12	98. 6872	39. 6496	双闸村
13	98. 7749	39. 7644	仰沟村
14	98. 8262	39. 7101	黄泥堡村
15	98. 8065	39. 5726	酒泉市区东南
16	98. 8621	39. 8341	鸳鸯村
17	98. 9698	39. 8443	高台县盐池乡双丰村西北 9. 8 km
18	99. 2752	39. 7338	盐池村
19	99. 1122	39. 6479	马庄子
20	99. 0566	39. 3538	清水站
21	99. 3336	39. 5744	干河
22	99. 3824	39. 4866	南沟
23	99. 4506	39. 4801	明海寺南
24	99. 4587	39. 5962	小海子
25	99. 6277	39. 5920	黑泉乡
26	99. 6249	39. 6561	下桥儿湾
27	99. 6803	39. 5029	九坝东
28	99. 6329	39. 5607	沙沟村
29	99. 6257	39. 5325	黑泉村
30	99. 6587	39. 4617	昇华商行
31	99. 6947	39. 3603	新联村
32	99. 4300	39. 3997	肃南裕固族自治县明海林场
33	99. 4089	39. 3157	许三湾站
34	99. 1156	39. 6364	莲花寺
35	98. 4473	39. 7377	酒泉市新建水源地

表 3 研究区地下水“三氮”含量统计特征表

Table 3 Characteristic parameters of nitrogeneous content in groundwater in the study area

指标	最大值 (mg·L ⁻¹)	最小值 (mg·L ⁻¹)	平均值 (mg·L ⁻¹)	标准值 (mg·L ⁻¹)	标准差	变异系数	点位检出率 (%)	点位超标率 (%)
NO ₃ ⁻ -N	32	0. 12	3. 562	2/5/20	5. 899	1. 656	100	2. 86
NO ₂ ⁻ -N	0. 073	ND.	0. 004	0. 01/0. 1/1	0. 012	3. 000	57. 14	0
NH ₄ ⁺ -N	0. 16	ND.	0. 017	0. 02/0. 1/0. 5	0. 027	1. 588	11. 43	0

注:ND. 为未检出;标准值为《地下水质量标准(GB/T14848-2017)》中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类标准值;点位超标率指超过Ⅲ类标准限值。

为: NO₃⁻-N > NH₄⁺-N > NO₂⁻-N; NO₃⁻-N > NO₂⁻-N > NH₄⁺-N; NO₃⁻-N > NO₂⁻-N = NH₄⁺-N = 0(表 3)。对比《地下水质量标准(GB/T14848-2017)》,有一处水样的 NO₃⁻-N 含量为 32 mg/L,超过了Ⅲ类标准限值 20 mg/L。

3. 2 地下水“三氮”含量平面分布特征

变异系数可以反映数据的离散程度、消除测量尺度和量纲的影响。通常认为变异系数小于 0. 1 的具有弱变异性;在 0. 1 ~ 1. 0 的范围内具有中等变异性;大于 1 的具有强变异性^[19]。由表 3 可知,NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 NH₄⁺-N 变异系数均大于 1,说明“三氮”都具有强变异性,平面分布上存在着明显差异。NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 含量的分散性相差不大,但二者相比 NO₂⁻-N 含量来说,分散明显。

根据 35 组采样点的“三氮”含量,绘制“三氮”含量等值线图(图 4),并依据《地下水质量标准(GB/T14848-2017)》进行分析。

由图 4(a)可知,NO₃⁻-N 含量低于 2 mg/L 的区域主要集中在嘉峪关市辖区、酒泉市肃州区、盐池和新坝镇一带,含量较高的点位在盆地中部的双闸村达到 16. 1 mg/L 和东北部的罗城镇达到 11. 27 mg/L。高于检出限 20 mg/L(Ⅲ类标准值)的区域集中在嘉峪关大断裂西侧与嘉峪关市辖区之间的断山口村,含量为 32 mg/L,存在着明显的氮源污染。

由图 4(b)可知,NO₂⁻-N 含量高于 0. 01 mg/L 的区域主要集中在东北部的罗城镇和嘉峪关市辖区西北部的断山口村,含量分别为 0. 073 mg/L 和 0. 018 mg/L、污染较轻。位于罗城镇的调查井处在农田附近,NO₂⁻-N 污染主要来源于农业生产过程中施用的肥料。与盆地的东北部和西北部相比,中部地区 NO₂⁻-N 的含量较少,表明 NO₂⁻-N 的含量分布特征具有显著的差异。

由图 4 (c) 可知,NH₄⁺-N 含量高于 0. 02 mg/L 的区域主要集中在盆地的中部西峰镇、双闸村和金滩村,分别是 0. 05 mg/L、0. 03 mg/L 和 0. 06

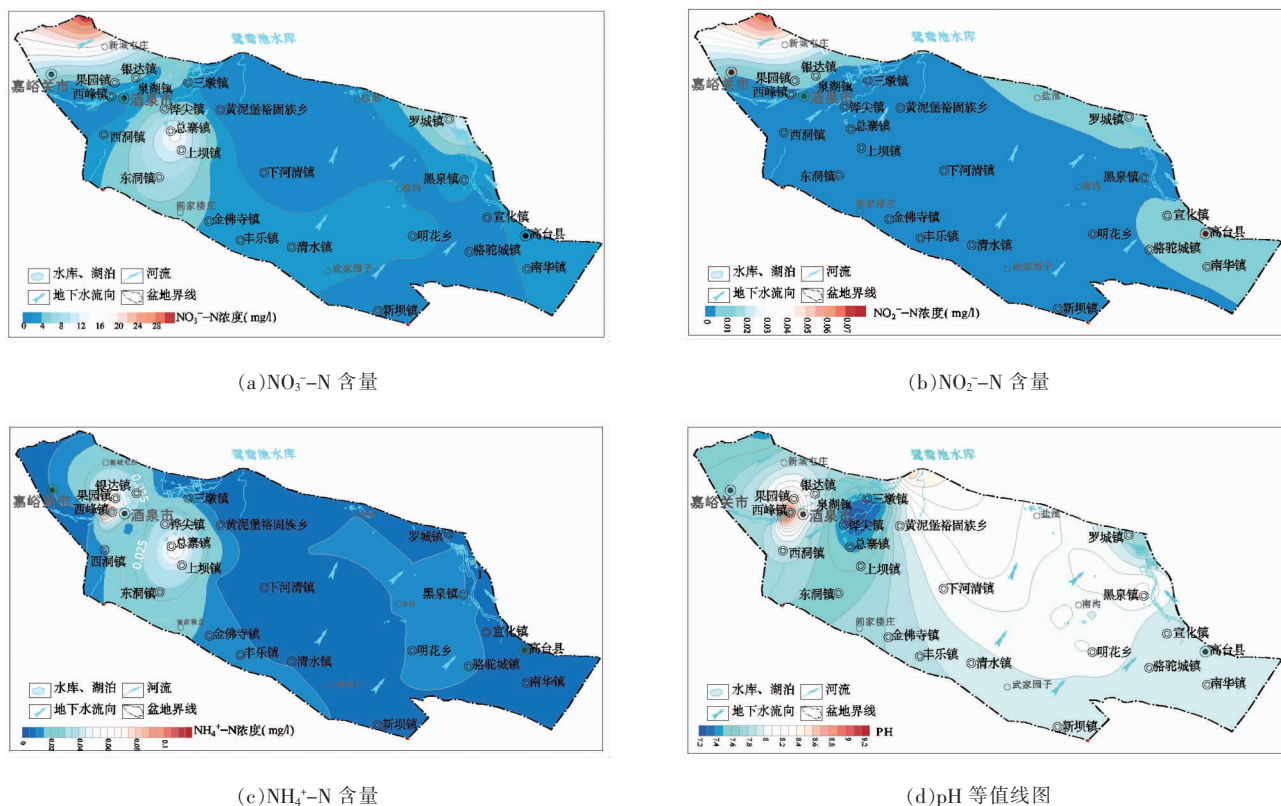


图 4 地下水中“三氮”含量、pH等值线图

Fig. 4 Contour of pH and nitrogenous content in groundwater

mg/L; 高于 0.1 mg/L (Ⅱ类标准) 的区域集中在肃州区新建水源地附近。 NH_4^+ -N 含量分布在盆地西部地区的嘉峪关市和酒泉市辖区与东部地区形成了显著的变异性。

在区域分布上,地下水“三氮”含量具有明显的北高南低的分布趋势; NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 含量呈现东、西两侧较高,中部较低的分布特征;而 NH_4^+ -N 含量则呈现由西北向东南逐渐减少的分布规律。

3.3 地下水“三氮”影响因素分析

3.3.1 氧化还原环境

包气带氧化还原条件对三氮的迁移转化起着决定性作用,制约着“三氮”在地下水中的赋存形式^[20]。特别是工厂排出的废水和废渣、农业生产过程施用的化肥和居民日常生活的污水中,含有高浓度的氨氮。当地下水处在氧化、弱碱性的环境中,氨氮通过硝化反应变成亚硝酸盐和硝酸盐,由于亚硝酸盐的不稳定性,进一步硝化反应生成硝酸盐,导致地下水中硝酸盐的含量增加。当地下水处于还原、弱酸性的环境中,硝酸盐和亚硝酸盐在反硝化细菌的作用下,

更容易被还原成 N_2 溢出^[21]。

分布于嘉峪关大断裂附近的断山口村, NO_3^- -N 的含量已经超过了Ⅲ类标准值,该地周围存在着化学工厂、水泥厂以及焦化厂等,工业生产过程中废水的排放,通过包气带进入地下水,而废渣中的含氮物质通过降雨等条件渗滤到包气带中,进入地下水。同时断山口村处于洪积扇的边缘,岩性颗粒粗,地下水环境通透性好,呈氧化性好的弱碱性环境,有利于硝化反应。断山口村附近的地下水中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量较高,而 NH_4^+ -N 含量较低 (图 4 c),这是由于工业生产的氨氮、亚硝酸盐和硝酸盐进入地下水,通过硝化反应生成亚硝酸盐和硝酸盐,导致 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量远远高于研究区其他地方的缘故。

3.3.2 包气带和含水层岩性

包气带作为阻止、拦截和净化地下水“三氮”污染的保护层,其结构特征对地下水氮污染的防护能力影响显著^[22]。包气带和含水层的岩性颗粒越细,孔隙度越小,渗透性能越差,吸附能力越强,尤其对 NH_4^+ 的吸附作用明显^[20]。反之,包气带和含水层的岩性颗粒越粗,孔隙度越大,透气性好,易于保持氧化

条件,有利于硝化过程。研究区南部的祁连山前带形成了厚度较大的松散砂卵砾石层,结构松散,透水性和透气性较好,有利于硝化反应的进行。由山前至盆地内部,第四纪沉积物颗粒逐渐变细,岩性为亚砂土、粘土、砂、砂砾石互层,颗粒较细,有利于反硝化反应的进行。因此,研究区地下水中“三氮”含量总体变化趋势是由南向北, NO_3^- -N、 NO_2^- -N 含量逐渐减少,而 NH_4^+ -N 含量则逐渐增加(图 4 a、c)。说明酒泉东盆地由南向北,包气带和含水层岩性逐渐不利于硝化反应的进行。

3.3.3 地下水埋深

地下水“三氮”的含量、存在形式和运移直接或间接受到地下水埋深的影响^[23]。水位埋深越大,包气带的厚度增加,意味着氧气总量增大,性质不稳定的 NO_2^- -N 进一步反应硝化形成 NO_3^- -N,使得地层中的 NO_2^- -N 的含量降低, NO_3^- -N 的含量增加。同时,包气带中的介质会对进入的 NH_4^+ -N 具有吸附作用,随着水位的下降, NH_4^+ -N 的含量也相应的降低。研究区断山口村附近的地下水埋深大约在 100 m 左右,含水层属单一结构的潜水,包气带厚度大,氧气含量高,有利于硝化反应的进行。因此,该地区 NO_3^- -N 含量高而 NH_4^+ -N 含量低。新坝镇、下清河镇到黑河沿岸的罗城镇等中北部细土平原,地下水埋藏深度由中部的 50 ~ 20 m,逐步渐变为北部的 20 ~ 5 m、黑河沿岸一带的 5 ~ 1 m;含水层演变为多层结构的上部潜水、下部承压水;随着包气带厚度逐步变小,氧气含量逐步变低,不利于硝化反应的进行。因此,这一地带 NO_3^- -N 含量逐步减少而 NH_4^+ -N 含量逐步增加。

3.3.4 地下水酸碱环境

地下水酸碱环境会影响硝化反应的进程,水的 pH 超过 6.4 ~ 7.9 的范围会影响硝化细菌的活

性^[6,24],而强碱性水环境可以减缓硝化反应的进程。研究区地下水 pH 值介于 7.21 ~ 9.65 之间,平均为 7.99;62.86%的水样(22 组)pH 值超过 7.9,属于偏碱性水。由表 4 知,随着 pH 值升高, NO_3^- -N 的含量减少,两者呈负相关且显著性明显; NH_4^+ -N 的含量增加,两者呈正相关且显著性明显。由图 4(d)可知,肃州区地下水 pH 值均大于 7.9,属偏碱性环境,会抑制硝化细菌的硝化反应速率,减少 NO_3^- -N 的含量,同时使得 NH_4^+ -N 的含量偏高,与图 4(a)(c)表征相符。

3.3.5 地下水径流条件

地下水径流是“三氮”迁移的载体,是地下水“三氮”含量及空间分布重要影响因素之一^[9]。研究区南部洪积砾石平原区,第四系松散堆积物厚度大、颗粒粗、透水性强且层间无隔水层,是积聚地下水的有利场所,地下水径流强劲,水力坡度较大为 2.06‰ ~ 35.6‰,有利于水中硝化反应的进行,形成地下水 NO_3^- -N 的富集区;中北部冲洪积细土平原,第四系地层厚度逐渐变小,沉积物颗粒由粗变细,地下水径流滞缓,水力坡度渐变至 1.67‰ ~ 2.22‰,有利于反硝化反应的进行,形成地下水 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 的富集区。

3.3.6 人为因素

研究区西部的嘉峪关市是一个新兴的工业城市,也是我国西部最大的钢铁联合企业—酒泉钢铁(集团)公司所在地,整体呈现城市大、农村小为特点,以工业经济为主;中部酒泉市肃州区和张掖市高台县黑河沿岸的乡镇以绿洲农业及牧业、旅游业经济为主;绿洲之外为戈壁荒漠,未利用土地较多。因此,可将研究区采样点土地利用类型分为:工业和居民建设用地、耕地、未利用土地三类^[25]。

在 35 组采样点中,11 组属于工业和居民建设

表 4 研究区地下水各组分相关系数统计表
Table 4 Correlation coefficient of each component of groundwater in the study area

	NO_3^-	NO_2^-	NH_4^+	pH	Cl^-	Mn	Fe	De
NO_3^-	1							
NO_2^-	0.856**	1						
NH_4^+	-0.008	-0.087	1					
pH	-0.403*	-0.223	0.591**	1				
Cl^-	0.088	0.164	-0.066	-0.078	1			
Mn	0.163	0.169	0.068	-0.023	0.082	1		
Fe	0.338*	0.375*	0.324	0.137	-0.034	0.382*	1	
De	0.198	0.250	0.329	0.173	-0.143	0.204	0.609**	1

注:*表示相关性显著(P<0.05);**表示相关性极显著(P<0.01);De表示潜水埋深

用地、18 组属于耕地、16 组属于未利用土地。不同土地利用类型地下水中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 含量差异统计见图 5,地下水“三氮”含量分布规律:工业和居民建设用地 > 耕地 > 未利用土地。

在“三氮”含量最多的工业和居民建设用地,地下水 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 的平均含量分别为 5.094 mg/L、0.0095 mg/L 和 0.027 mg/L。由此可见,研究区地下水“三氮”污染程度总体较轻。相对而言,肃州区、嘉峪关市城区以及郊区地下水“三氮”污染较重,乡镇耕地区及未利用土地污染较轻。

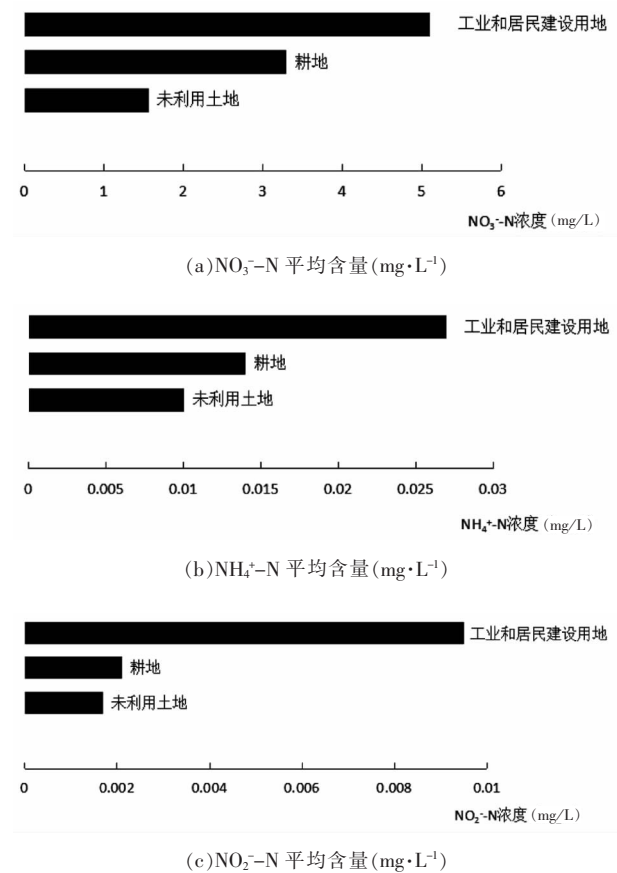


图 5 不同土地利用类型的地下水“三氮”含量差异图
Fig. 5 Diagram of nitrogenous content of groundwater from different land

嘉峪关市是以工业为主的城市,其支柱性产业有化学原料加工、金属冶炼。2018 年嘉峪关市第二产业占比 51.8%,相比于前一年增加了 12.5%,工业增加值增速为 3.4%。同时,城区扩建产生的废水、废渣的无序排放,是导致嘉峪关郊区地下水“三氮”含量增高的主要原因;2018 年,酒泉市肃州区常住人口为 44.72×10^4 人,随着社会经济的发展,人

口数量的增加,城区基础设施建设却显得不足与滞后,废水、废渣的大量排放,导致地下水“三氮”污染面逐步扩大,现已形成以肃州城区为中心,向郊区逐渐扩散的面状污染;张掖市高台县主要耕地区位于黑河中游下段,也是我国商品粮基地县之一,大面积种植农作物导致氮肥的大量施用,其中只有 60% ~ 70% 的氮肥被作物吸收,其余 30% ~ 40% 的氮肥通过大气降雨和灌溉水的溶滤作用垂直渗透到含水层中^[26],加之地下水径流作用,是导致高台县罗城镇耕地区域的地下水“三氮”含量相对较高的主要原因。

3.4 地下水“三氮”空间分布趋势分析

研究区地下水“三氮”含量具有明显的空间分布规律。由南向北,随着包气带厚度和水力坡度逐渐变小,地下水埋藏深度变浅,沉积物颗粒逐渐变细,径流逐渐迟缓,不利于硝化反应的进行,总体趋势是 NO_3^- -N 含量逐渐减少,而 NH_4^+ -N 含量逐渐增加;当包气带处于氧化、弱碱环境时,有利于硝化反应的进行, NO_2^- -N、 NO_3^- -N 含量增加;在一定条件下,随着 pH 值升高, NO_3^- -N 的含量减少,两者呈负相关且显著性明显; NH_4^+ -N 的含量增加,两者呈正相关且显著性更明显。

从西向东,研究区可分为西部嘉峪关市和酒泉市肃州区、中东部盐池—明花荒漠区和东北部黑河沿岸绿洲区 3 部分。其中西部的嘉峪关市、肃州区工厂企业、城乡居民生活污水排放渗漏是影响该区域地下水“三氮”含量分布的主要人为因素;中东部的盐池—明花荒漠区由于降雨稀少,表层为戈壁、丛草沙地和盐沼覆盖,人类活动影响弱,其地下水“三氮”含



图 6 酒泉东盆地地下水“三氮”含量影响因素的演化模式图
Fig. 6 Evolution model diagram of influencing factors of groundwater nitrogenous content in Jiuquan East Basin

量处于天然状态,基本未受到人为影响;东北部的黑河沿岸绿洲区,土地肥沃,大面积耕种和氮肥的使用,加之地下水埋深浅、径流滞缓,导致其地下水“三氮”含量高于其他地区。

由此可见,研究区工厂企业、城乡居民生活污水排放渗漏,以及耕地氮肥使用、灌溉渗漏是影响地下水“三氮”含量空间分布的主要控制因素(图 6)。

4 地下水“三氮”引起的个人年健康风险评价

健康风险评价模型采用美国国家环境环保局(EPA)推荐的健康风险评价模式,评价过程根据 EPA 综合风险信息系统来识别目标污染物的危害。其中,地下水“三氮”污染物属于非致癌物质,可通过饮水、直接接触和摄入水体中的食物 3 中暴露途径对人体健康造成危害,本次研究仅考虑最重要的饮水途径,计算评价地下水“三氮”引起的个人年健康风险^[27]。评价模型:

$$R^n = \sum_{k=1}^K R_k^n$$
$$R_k^n = \frac{D_k \times 10^{-6}}{RfD_k} / Y$$
$$D_k = \frac{Q \times C_k}{W}$$

式中: R_k^n —躯体毒物质 k 对平均个人的健康危害年风险, a^{-1}
 D_k —躯体毒物质 k 单位体重日均暴露剂量, $mg/(kg \cdot d)$;
 RfD_k —躯体毒物质 k 参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$;
 C_k —躯体毒物质 k 质量浓度, mg/L ;
 Y —人均寿命,取 70 a;
 W —人均体重,取 70 kg;
 Q —人均日饮水量,取 2.2 L;
其个人健康风险计算中参考剂量值 RfD_k 是一个重要的参数。根据美国环保局,非致癌物质“三氮”

表 5 地下水“三氮”参考剂量值和个人健康风险表
Table 5 Groundwater nitrogenous reference dose values and individual health risk

非致癌物质	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	“三氮”
参考剂量 $RfD_k(mg/(kg \cdot d))$	1.6	0.1	0.97	
个人健康风险 (a^{-1})	$(0.34 \sim 89.79) \times 10^{-10}$	$(0.22 \sim 32.78) \times 10^{-11}$	$(0.46 \sim 7.41) \times 10^{-11}$	$(0.67 \sim 93.12) \times 10^{-10}$

的参考剂量值 RfD_k 见表 5。
由非致癌物质健康风险评价模型计算结果(表 5)可知,非致癌物质 NO₃⁻个人年健康风险比 NO₂⁻、NH₄⁺高 1 个数量级,NO₃⁻物质为“三氮”优先控制污染物。NO₃⁻、NO₂⁻、NH₄⁺个人年健康风险远小于国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的标准限值 5.0 × 10⁻⁵ a⁻¹,也小于瑞典、荷兰的标准限值 1.0 × 10⁻⁶ a⁻¹。若假定地下水环境中“三氮”对人体健康毒性危害作用呈叠加关系,则“三氮”个人年健康风险为 (0.67 ~ 93.12) × 10⁻¹⁰ a⁻¹,远小于 ICRP 推荐的个人年健康总风险值。

5 结论

(1)酒泉东盆地地下水“三氮”总体含量较低,污染较轻。NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺-N 含量均值分别为 3.562 mg/L、0.004 mg/L 和 0.017 mg/L。仅有嘉峪关市西北部的断山口村附近,地下水中 NO₃⁻含量超标。整体上,地下水“三氮”含量具有明显的北高南低

的分布趋势;NO₃⁻和 NO₂⁻含量呈现东、西两侧较高,中部较低的分布特征;而 NH₄⁺-N 含量则呈现由西北向东南逐渐减少的分布规律。
(2)影响地下水“三氮”含量空间分布的主要因素是地下水氧化还原环境及酸碱环境、包气带和含水层岩性、地下水水位埋深及径流条件等自然因素,以及工厂企业、城乡居民生活污水排放渗漏,耕地氮肥使用、灌溉渗漏等人为因素,并形成酒泉东盆地地下水“三氮”含量在空间上的差异性分布。
(3)NO₃⁻物质为“三氮”优先控制污染物,“三氮”个人年健康风险远小于 ICRP 的个人年健康总风险值,其个人年健康风险的整体分布趋势相对一致,风险较高的地区主要分布在盆地西部,且向盆地东部逐渐递减。

参 考 文 献

[1] MARANDI A, KARRO E. Natural Background Levels and Threshold Values of Mmonitored Parameters in the Cambrian–Vendian Groundwater Body, Estonia [J]. Environmental Geology, 2008, 54(6): 1217–1225

- [2] IKEM A, Osibanjo O, Sridhar M K C, et al. Evaluation of Groundwater Quality Characteristics near Two Waste Sites in Ibadan and Lagos, Nigeria [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 140(1-4): 307-333
- [3] CAPRI E, CIVITA M, CORNIELLO A, et al. Assessment of Nitrate Contamination Risk: The Italian Experience [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(2): 71-86
- [4] 王曾祺. 渭南地区地下水氮污染特征及源解析 [D]. 西安: 长安大学, 2019
- [5] DENK T R A, MOHN J, DECOCK C, et al. The Nitrogen Cycle: A Review of Isotope Effects and Isotope Modeling Approaches [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 105(121-137)
- [6] 侯珺, 周金龙, 曾妍妍. 石河子地区地下水“三氮”空间分布特征及影响因素分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(01): 1-8
- [7] 吕晓立, 刘景涛, 周冰. 塔城盆地地下水“三氮”污染特征及成因 [J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(02): 42-50
- [8] 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼. 东山岛地下水“三氮”空间分布特征 [J]. *环境科学*, 2015, 36(09): 3203-11
- [9] 於嘉闻, 周金龙, 曾妍妍. 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
- [10] 杨维, 王恩德, 李勇. 浑河冲洪积扇中下游地下水中氮转化与水文地球化学特征的研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2005(02): 39-41
- [11] 初元满, 官明兰, 艾巍. 金属铁离子对农田土壤氮转化影响分析 [J]. *环境科学与管理*, 2008, 33(12): 60-64
- [12] LI J, LIU S, SHANGGUAN D, et al. Identification of Ice Elevation Change of the Shuiguan River No. 4 Glacier in the Qilian Mountains, China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2010(4): 375-379
- [13] 刘宇硕, 秦翔, 张通. 祁连山东段冷龙岭地区宁缠河3号冰川变化研究 [J]. *冰川冻土*, 2012(05): 27-32
- [14] 鲁晖. 2000—2017年河西地区植被覆盖的时空过程分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019
- [15] 兰继传. 祁连山北麓生态环境保护与综合治理建设的现状及其政策建议 [C]. 甘肃省学术年会, F, 2009
- [16] 李计生, 王静, 李斌. 河西走廊疏勒河灌区地下水特征现状分析 [J]. *冰川冻土*, 2014, 036(5): 1288-97
- [17] 王艳华. 河西走廊中段地下水环境风险防范区实证研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012
- [18] 刘明霞, 刘凯欢, 姚恩龙, 等. 黑河流域地下水“三氮”污染现状研究 [J]. *地下水*, 2018, 40(3): 74-76
- [19] 张荣, 王中美, 周向阳. 羊昌河流域岩溶地下水水化学特征及影响因素分析 [J]. *安全与环境工程*, 2019, 26(04): 15-20
- [20] 梁秀娟, 肖长来, 盛洪勋. 吉林市地下水中“三氮”迁移转化规律 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007(02): 335-40+45
- [21] CHRISTENSEN T, BJERG P, KJELDSEN P. Natural Attenuation: A Feasible Approach to Remediation of Ground Water Pollution at Landfills? [J]. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 2000, 20(1): 69-77
- [22] 马荣欣. 福建省沿海主要地区浅层地下水氮污染研究及典型区域地下水脆弱性评价 [D]. 福州: 福建师范大学, 2009
- [23] 马洪斌, 李晓欣, 胡春胜. 中国地下水硝态氮污染现状研究 [J]. *土壤通报*, 2012, 43(06): 1532-1536
- [24] 姜翠玲, 夏自强, 刘凌. 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(02): 87-92
- [25] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮. 兰州市地下水中“三氮”污染特征及成因 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(01): 95-100
- [26] 熊汉锋, 陈治平, 黄世宽. 梁子湖湿地农田碳氮循环的模拟研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2006(S2): 533-6
- [27] 李育松. 松嫩平原潜水污染风险与健康风险评价 [D]. 长春: 吉林大学, 2015
- [28] 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 等. 祁连山冰雪融水补给山前平原地下水特征 [C]. 第2届寒区水资源及其可持续利用学术研讨会论文集, 2013

DISTRIBUTION CHARACTERISTICS AND INFLUENCING FACTORS OF THREE SOLUBLE NITROGENOUS MATERIAL OF GROUNDWATER IN EAST JIUQUAN BASIN

YANG Ya-bing^{1,2}, SUN Xin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Groundwater Engineering and Geothermal Resources in Gansu Province, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Institute of Geo-environmental Monitoring, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to investigate the pollution status and personal health risk of groundwater, the paper taking East Jiuquan Basin as an example, studies the distribution, migration, influencing factors and health risk assessment of three nitrogen by means of data statistics, spatial distribution trend, pollution sources and influencing factors analysis. The results show that: under the influence of the unique landscape, geomorphology, redox environment, the aeration zone and aquifer lithology, diving depth, acid and alkali environment and underground runoff of natural factors, as well as the destruction of the ecological environment and the development of urbanization, the overall content of “three nitrogen” in groundwater is low, and the pollution is relatively light, only a NO_3^- -N content exceed the standard limit; on the regionally distribution, In terms of regional distribution, the content of “three nitrogen” has an obvious pattern of high in the north and low in the south, The content of NO_3^- -N and NO_2^- -N is high in the east and west, and low in the middle, The content of NH_4^+ -N gradually decreases from northwest to southeast. The overall distribution trend of personal annual health risk of “three nitrogen” was consistent, and the risk gradually decreased from the densely populated area in the west of the study area to the non-densely populated area in the east.

Key words: East Jiuquan Basin; nitrates; nitrite; ammonia; distribution characteristics; health risk assessment