

黄艳采, 金波, 曾牡丹, 等. 西南某城区地下水“三氮”空间分布及风险管控研究[J]. 中国岩溶, 2025, 44(2): 274-282.

DOI: 10.11932/karst20250206

西南某城区地下水“三氮”空间分布 及风险管控研究

黄艳采¹, 金波², 曾牡丹¹, 向刚¹

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局一〇四地质大队, 贵州 都匀 558000; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局一一五地质大队, 贵州 清镇 551400)

摘要: 地下水的利用日益增加, 水中“三氮”污染问题一直备受关注。研究以西南某城区为例, 通过水文地质调查和水样检测, 采用反距离权重法(IDW)对地下水中“三氮”进行插值分析, 结合地下水水流场模型, 分析“三氮”的空间分布, 并通过叠加分析, 划定风险管控区域。结果表明, 研究区“三氮”空间分布具有差异性, 城区钻孔及污水处理厂对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度影响更大, 而农业及居民集中区对 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 的影响更显著, $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 整体情况较好, 无明显污染; “三氮”含量亦有较大差异, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 最高浓度为 $96.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 远大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($8.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ ($0.500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 这与岩溶区特征相关。以Ⅲ类水指标为管控界线, 将研究区划分为重点管控区(Ⅳ~Ⅴ类)、次重点管控区(Ⅲ类)及一般区(Ⅰ~Ⅱ类), 其中重点管控区目标为控制污水的排放和渗漏以及农业活动中氮的流失, 次重点管控区重点在预防进一步污染及优化指标, 一般区维持现状。

关键词: 城区; 地下水; 三氮; 空间分布; 风险管控

创新点: (1) 地面调查结合模型分析地下水“三氮”的空间分布; (2) 依据“三氮”《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)及慢性毒害风险研究, 结合模型叠加划定污染风险管控区域。

中图分类号: X513 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810(2025)02-0274-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

自抗旱找水打井工作实施以来, 西南岩溶区域地下水的利用日益增加, 在地下水备受关注的同时, 也暴露了地下水污染问题。研究表明我国很多地区地下水氮元素污染形势严峻^[1-2], 城区及周边污染源复杂^[3], 污染途径多样, 尤其是西南岩溶区, 由于碳酸盐岩溶解, 形成裂隙、管道、洞穴、天坑等, 使得地表污染物更容易渗入地下^[4-5]。由于地下水的隐蔽性及流动性, 污染物随地下水流不断迁移, 一旦被污染,

恢复治理难度极大^[6-8]。因此, 分析污染物空间分布特征, 及时采取风险管控措施可以经济有效地减缓污染扩散。空间数据插值法是常用的污染物空间分布分析方法, 在污染场地与地下水污染空间分析中, 反距离权重法有较好的分析效果^[7, 9]和更准确的分析结果^[10-11]。在上述研究基础上, 本研究以西南某城区为研究对象, 基于泉点、钻孔、水质等数据, 采用反距离权重插值方法分析“三氮”的空间分布特征, 并以此为基础划分风险管控区域。

资助项目: 贵州省地质矿产勘查开发局地质科学研究项目(黔地矿科合[2020]5号)

第一作者简介: 黄艳采(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质、环境地质工作。E-mail: Huangyc2020@sina.com。

通信作者: 金波(1971—), 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程、矿山环境恢复与治理等工作。E-mail: 530190124@qq.com。

收稿日期: 2024-10-01

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区地势整体表现为周边高中间低,属亚热带湿润季风性气候,年平均气温约 15.5℃,年平均降水量 997.42 mm。区域处于小流域源头,河流汇合于区域西北后流出,区域范围内岩溶发育,有岩溶管道分布,枯季地下水径流模数 $1.54\sim 6.77\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-2}$,富水性弱~强,含水岩组主要为寒武系地层。区域分布 1 个垃圾填埋场和 3 个生活污水处理厂,垃圾填埋场位于区域北部,主要填埋城市垃圾,填埋方式为分层压实。3 个污水处理厂分别位于北侧小流域、东侧小流域以及河流汇集处,处理能力分别为 $5000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $5000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $10000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 。根据调查,区域内地下水多用于饮用和灌溉,其中 56% 的调查点利用方式为机井抽提,其余调查点为泉点等,因出露地表被直接利用。

1.2 数据采集与分析

岩溶调查:共调查岩溶点 66 个。泉点调查:共调查泉点 107 个。钻孔调查:共调查钻孔 34 个。采样点部署:根据场地、水文地质调查、地下水流向及居民区情况,分别在居民点、特殊点(垃圾填埋场、污水处理厂)上下游布设取样点位,并依据取样便利原则,选择机井或泉点(地下河出口)进行采样,在场区共部署采样点 43 个,部署位置如图 1。取样及分析:区域取样分析严格执行《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017),分析指标为“三氮”(NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N)。

1.3 数据处理

本研究采用 Microsoft Excel 2013 对污染物浓度数据进行初步处理,利用 ArcGIS 反距离权重插值法对 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 三种污染物进行空间插值,利用 Feflow 7.0 构建区域地下水流场,结合地面调查数据充分分析污染物空间分布规律,并以此为基础进行叠加分析,划分管控区。

2 结果与讨论

2.1 研究区域特征

主城区依山沿河而建,区域河谷平缓地带主要

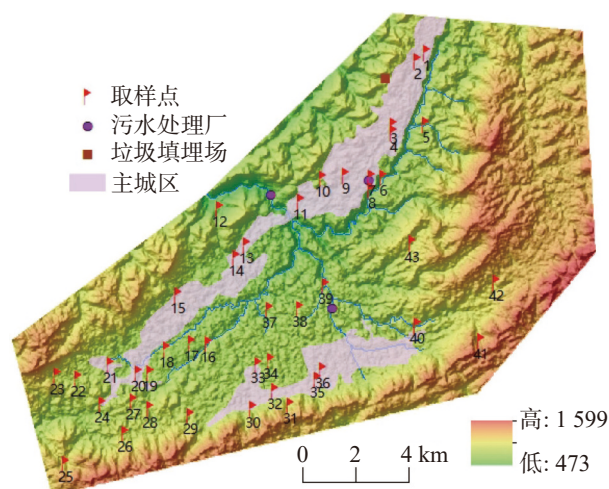


图 1 研究区调查及水样采样点布设

Fig. 1 Survey of the study area and layout of water sampling points

分布纯碳酸盐岩,钻孔揭露的含水地层主要是寒武系娄山关组($\epsilon_{3-4}l$)、石冷水组(ϵ_{3sh})和清虚洞组(ϵ_{2q}),各地层钻孔单位涌水量分别为 $0.12\sim 1.52\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-2}$ 、 $0.10\sim 0.83\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-2}$ 、 $0.09\sim 1.29\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{km})^{-2}$,地层岩性为白云岩、灰岩,含水介质为溶孔-溶隙、溶洞-管道,富水性中等~强。周边区域海拔较高,主要分布奥陶系龙马溪组(O_3S_1l)、湄潭组($O_{1-2}m$)、寒武系金顶山组(ϵ_j)、明心寺组(ϵ_m)粉砂岩、砂岩、黏土岩等碎屑岩,透水性较差,富水性较弱。

根据岩溶调查结果(图 2),区域中部和东部分布两条较大的岩溶管道,岩溶管道几乎位于地表河流之下,且地下水流向与河流基本一致,这表示污染物在降水冲刷后汇集于岩溶管道上方,增加了污染物进入地下水的概率,且区域内土层浅薄,分布亦不连续,岩溶洼地、落水洞分布较多,导致该区域污染物易通过渗透性强的浅薄土壤、溶隙、裂隙及落水洞等直接进入地下水^[12]。

依据泉与地下河出(入)口流量数据及流量插值分析(图 3a),区域地下水主要以地下河形式集中排泄,区域中部地下河出口处为最大排泄点,周边泉点分散汇入地表河排泄。污染物渗入地下后,随着水流迁移,迁移方向与地下水流动方向一致,研究中水文地质调查结果与 Feflow 水流模型结果(图 3b)大致相同,但岩溶管道的存在对模型有一定影响,该结果可作为分析污染物空间分布的依据。

2.2 “三氮”空间分布特征

氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮

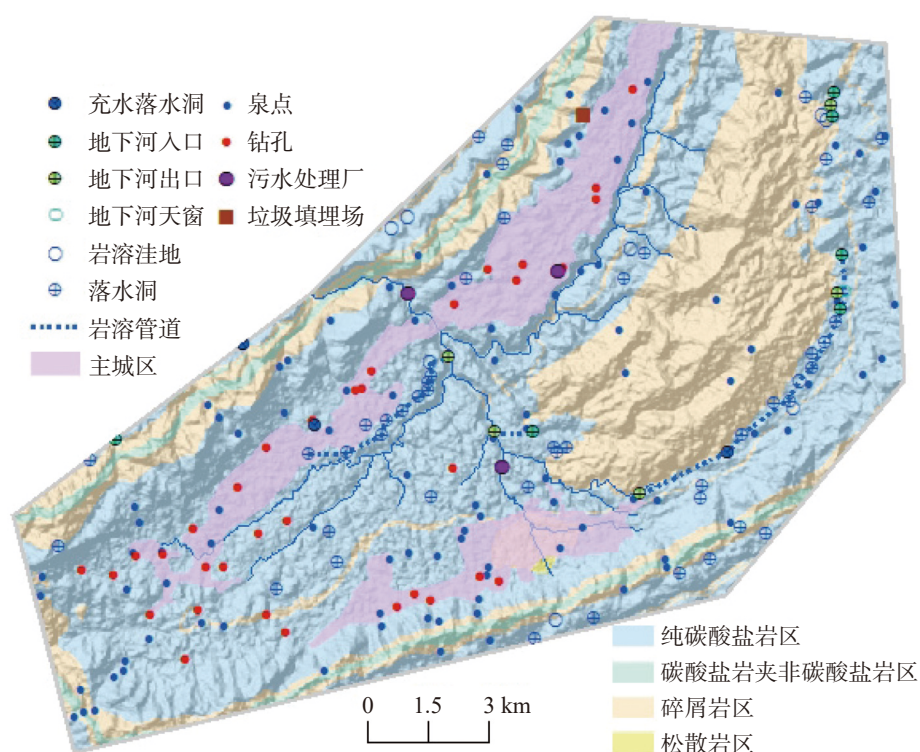


图2 研究区水文地质调查

Fig. 2 Hydrogeological survey of the study area

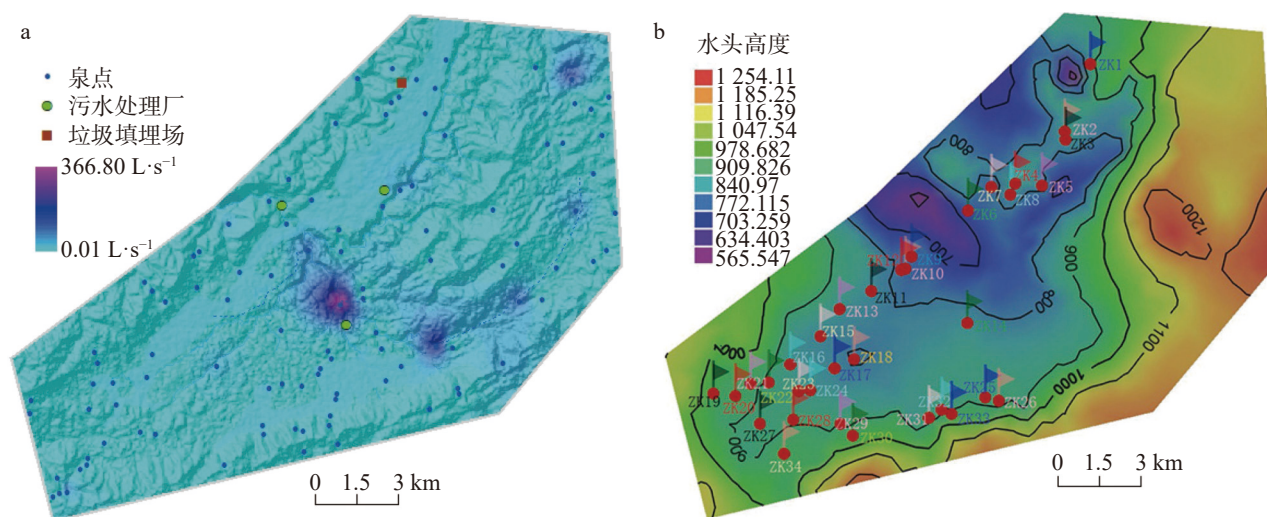
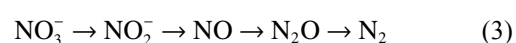
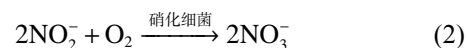


图3 研究区地下水流场

Fig. 3 Groundwater flow field in the study area

(NO_2^- -N)(简称“三氮”)是地下水中常见的污染物,其来源主要为化学肥料、农家肥、生活污水及生活垃圾^[13],三者在一定的环境条件下发生亚硝化作用(式1)、硝化作用(式2)、反硝化作用(式3)。通常,还原环境下氮素主要存在形式为 NH_4^+ -N,氧化环境中主要存在形式为 NO_3^- -N, NO_2^- 作为过渡形态,一般不会出现大量积累现象^[11, 14-15]。



NH_4^+ -N 污染来源主要是生活污水、养殖污水、农业生产活动等^[16-17]。区域中 NH_4^+ -N 浓度范围为0~8.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最高浓度8.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图4a),超过《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)(以下简称

《标准》) V 类指标(表 1)下限值的 5.3 倍(表 2)。

高浓度区域分布在以钻井 ZK4(8 号取样点)为中心区域以及北侧小流域污水处理厂下游,表明 ZK4 井及污水处理厂可能出现污染渗漏或是污水未处理达标;其次为东北侧碎屑岩区,该区域主要为农业种植区,其他区域浓度较低,水质较好。

$\text{NH}_4^+\text{-N}$ 进入包气带后,易被带负电荷的土壤颗粒强烈吸附^[1, 13],且土壤微生物含量丰富,根据式(1)和式(2),在亚硝化细菌和硝化细菌作用下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$

最终被氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。研究区是典型的岩溶区,覆土层相对较薄,土层厚度差异性大,土壤吸附量有限,而城区人口密集,污染来源广,钻孔管理不当、污水泄漏等都会造成污染入渗。根据图 3 b,高浓度区域地下水位高于南北两侧,污染物随水流方向扩散(图 4 a)。区域东北侧,整体海拔较高,农田、小村落分布多,土层偏薄,水土保持能力相对较差,化肥使用、污水散排等使得污染物入渗至地下水中,导致其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度增大,但维持在Ⅳ类指标范围内。

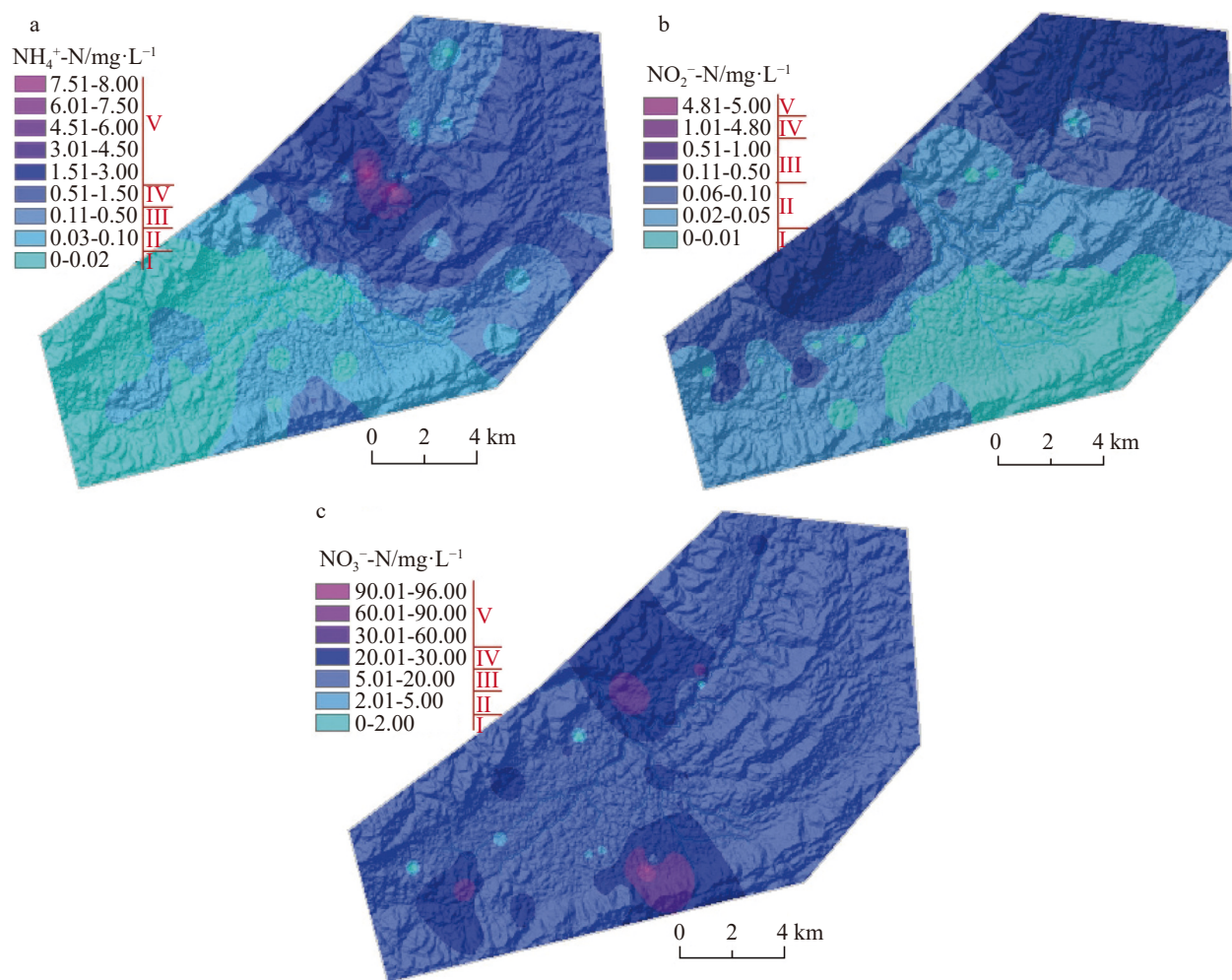
表 1 《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 分类指标
Table 1 Classification indicators for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the Standard for Groundwater Quality (GB/T 14848-2017)

序号	指标/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类	Ⅴ类
1	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	≤ 0.02	≤ 0.10	≤ 0.50	≤ 1.50	>1.50
2	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	≤ 0.01	≤ 0.10	≤ 1.00	≤ 4.80	>4.80
3	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	≤ 2.0	≤ 5.0	≤ 20.0	≤ 30.0	>30.0

注:Ⅰ类、Ⅱ类适用于各种用途;Ⅲ类主要适用于集中式生活饮用水水源及工农业用水;Ⅳ类适用于农业和部分工业用水,适当处理后可作生活饮用水;Ⅴ类不宜作为生活饮用水水源,其他用水可根据使用目的选用。

表 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 指标检测统计表
Table 2 Statistics of indicator testing for $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

编号	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	取样点 类型	取样高程 $/\text{m}$	编号	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	取样点 类型	取样高程 $/\text{m}$
1	0	0.300	22.00	上升泉	900.0	23	0	0.002	18.00	机井	951.1
2	0.05	0.160	15.00	机井	891.0	24	0.04	0.016	28.00	机井	877.5
3	0	0.300	8.00	机井	867.7	25	0.02	0.012	7.24	下降泉	1054.0
4	0	0.040	25.00	机井	870.0	26	0	0.018	22.00	机井	942.2
5	0.02	0.002	7.03	下降泉	795.8	27	0.04	0.008	46.00	机井	906.0
6	0.02	0.036	15.28	下降泉	664.7	28	0	0.014	8.00	下降泉	910.0
7	0.02	0.070	40.00	机井	845.0	29	0	0	22.00	机井	919.0
8	8.00	0.002	1.18	地下河出露	650.0	30	0	0.010	8.00	下降泉	900.7
9	8.00	0.004	20.00	机井	875.7	31	0.52	0.030	11.51	下降泉	1015.0
10	0	0.004	24.00	机井	818.5	32	0.04	0.004	30.00	机井	891.2
11	0.04	0.056	44.00	机井	763.1	33	0	0.002	4.00	下降泉	857.4
12	0	0.002	8.00	下降泉	654.4	34	0.02	0.008	3.73	下降泉	868.0
13	0.08	0.008	0	机井	794.7	35	0	0	96.00	机井	874.3
14	0	0.200	22.00	机井	762.0	36	0	0	10.00	下降泉	888.0
15	0	0.500	25.00	机井	849.0	37	0.02	0.006	10.15	下降泉	818.0
16	0	0.002	16.00	下降泉	799.0	38	0	0	5.00	机井	848.0
17	0	0.006	5.00	机井	850.0	39	0.02	0.002	22.45	地下河出口	756.6
18	0.08	0.002	2.23	机井	847.0	40	0	0.002	6.00	地下河出口	875.0
19	0	0.200	10.00	机井	851.8	41	0	0.024	4.00	下降泉	1152.0
20	0.04	0.002	28.00	机井	863.5	42	0.02	0.002	9.01	下降泉	1075.0
21	0	0.008	16.00	机井	895.7	43	0.02	0.008	5.90	下降泉	949.0
22	0	0.160	0.16	机井	919.2						

图4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 空间分布图Fig. 4 Spatial distribution of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在亚硝化细菌作用下的产物, 该反应氧化条件为低氧, 存在形式不稳定, 会进一步氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[13]。图4a中, 除区域西北和北部 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度在Ⅲ类指标范围外, 其余区域均在Ⅰ—Ⅱ类指标(表1)范围, 从单指标看, 区域整体水质良好。

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 指标多在Ⅲ—Ⅴ类水范围内, 浓度值在 $0\sim 96.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围(表2), 远大于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度, 这与岩溶区特点有关, 岩溶孔隙、裂隙等使得地下水中溶解氧浓度增加, 反应(1)和反应(2)较完全, 且 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在土壤胶体中受到排斥作用, 易随土壤水流失进入地下水^[18]。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 最大浓度达到 $96.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过《标准》Ⅴ类指标(表1)下限值3.2倍, 高浓度区在中部靠南侧、ZK25 钻孔(35号取样点)位置, 其附近为居民小区, 北侧有农业大棚; 次高值在钻孔 ZK5、ZK6 和 ZK28(分别为7号、11号和27号取样点)位置(图3, 图4), 该区域属居民集中区, 钻

孔水样 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度值分别为 $40\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $44\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过《标准》Ⅴ类(表1)下限值1.3~1.5倍。综合分析, 地下水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 主要来源于污水与粪便、化肥与土壤氮^[2, 17, 19-21], 结果与本研究对应。

2.3 “三氮”污染风险管控

人体长期饮用“三氮”含量超标的水, 可能导致人体缺氧而患血红蛋白症, 严重者可致死^[13]。在1993年的《饮用水水质准则》中指出广泛的流行病学数据支持 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的硝酸盐氮指导值^[22], 而在我国《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017)中饮用水“三氮”限值在Ⅲ类水以内, 即硝酸盐氮含量为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮和亚硝酸盐氮含量均为 $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

为保护人体健康, 必须减少“三氮”的摄入总量, 控制其在饮水中的含量。卞建民等^[23]研究中, 地下水类型为Ⅰ类和Ⅱ类水时, 慢性毒害风险在可接受范围内, 地下水类型为Ⅳ类和Ⅴ类水时, 慢性毒害风

险在不可接受范围,Ⅲ类水时视情况而定;对于 NO_3^- -N指标,He Su等^[24]的研究中指出当地下水中 NO_3^- -N达Ⅲ类时,非致癌风险超出了健康允许的限度。因此,结合我国标准,从人体健康角度考虑,本研究污染风险管控以Ⅲ类水指标为管控界线,用“三氮”指标叠加分析,划定重点管控区(Ⅳ—Ⅴ类)、次重点管控区(Ⅲ类)及一般区(Ⅰ—Ⅱ类)(图5)。

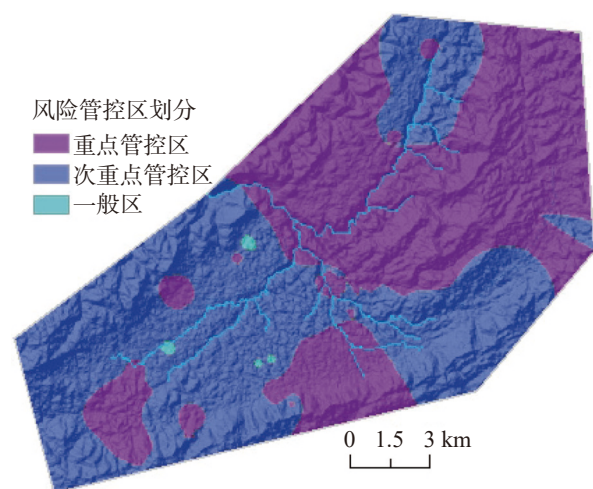


图5 风险管控区划分图

Fig. 5 Zoning of risk control areas

岩溶区由于其渗透性能较强,溶隙、裂隙及落水洞等的存在导致地下水氧含量较高,地表“三氮”污染物直接进入地下水,地下环境不利于反硝化过程的进行,一旦遭受污染,作为饮用水源的安全风险更大^[25-26],因此,控制污染源输入以及控制人体摄入至关重要。

由上述分析可知,城区“三氮”污染来源主要包括生活污水、粪便、化肥、土壤氮等,其中, NH_4^+ -N超标显著区域涉及北侧小流域污水处理厂及利用多年的钻孔, NO_3^- -N超标显著区域为居民和农业集中区。因此,从控制污染源输入以及控制人体摄入考虑,钻孔的利用与是否有必要建立台账并及时更新,在有条件情况下减少钻孔的使用,同时建立地下水监测系统,定时对地下水进行全面监测,掌握地下水质量动态变化,并及时做好防护措施。针对研究中划定的重点管控区,主要是 NH_4^+ -N浓度大于 $0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 NO_3^- -N浓度大于 $20.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的区域,根据上述污染来源分析结果,重点控制污水的排放和渗漏以及农业活动中氮的流失,具体措施为加强居民集中区污染排放控制,做好居民生活区水井、污水管网及污水处理厂的防渗工作,在农业集中区域,做到科学施

肥,合理配置肥料,从源头上阻断“三氮”迁移^[20];次重点控制区主要为 NH_4^+ -N浓度 $0.10\sim 0.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 NO_3^- -N浓度 $5.00\sim 20.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 区域,主要分布在零散居民区、农业区以及林区,重点在于预防进一步污染及优化指标,具体为优化居民区排污系统,进一步控制污染排放,提升区域水土保持能力和植被吸收效率^[27],采取作物轮作、优化作物灌溉方式^[20]、生态养殖、减少污水散排等措施整体改善区域生态空间质量^[28],使得居民生产、生活与农业发展良性循环;一般区水质好但分布面积较小,工作重点为继续保持现状,防治污染。

3 结论

(1)研究区为典型岩溶区,岩溶发育,区域土层浅薄且分布不连续,岩溶洼地、落水洞分布较多,导致该区域污染物易通过渗透性强的浅薄土壤、溶隙、裂隙及落水洞等直接进入地下水,且区域岩溶管道几乎位于地表河之下,增加了污染物进入地下水的概率。

(2)“三氮”空间分布具有差异性,其中 NH_4^+ -N超标显著区域在以钻孔ZK4为中心区域以及北侧小流域污水处理厂下游区域,而 NO_3^- -N超标显著区主要在居民区和农业集中区, NO_2^- -N整体情况较好。三者最高浓度值亦有较大差异,其中 NO_3^- -N最高浓度值为 $96.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远大于 NH_4^+ -N($8.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和 NO_2^- -N($0.500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),这与岩溶区域特征相关,氧含量充足条件下 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N转化为 NO_3^- -N。

(3)以Ⅲ类水指标为管控界线,用“三氮”指标叠加分析,将区域划分为重点管控区、次重点管控区和一般区。重点管控区重点控制污水的排放和渗漏以及农业活动中氮的流失,具体为加强居民集中区污染排放控制,做好居民生活区水井、污水管网及污水处理厂的防渗工作,在农业集中区域,做到科学施肥,合理配置肥料,从源头上阻断“三氮”迁移;次重点控制区重点在预防进一步污染及优化指标,具体为优化居民区排污系统,进一步控制污染排放,提升区域水土保持能力和植被吸收效率,采取作物轮作、优化作物灌溉方式、生态养殖、减少污水散排等措施整体改善区域生态空间;一般区重点为防治污染。

参考文献

- [1] 黄海波,高扬,曹杰君,黄红艳,张旭,毛亮,张进忠,周培.都市

- 农业村域地下水非点源氮污染及其风险评估[J]. 水土保持学报, 2010, 24(3): 56-59, 70.
- HUANG Haibo, GAO Yang, CAO Jiejun, HUANG Hongyan, ZHANG Xu, MAO Liang, ZHANG Jinzhong, ZHOU Pei. Non-point source pollution of nitrogen in groundwater in urban agricultural region of Shanghai and risk assessment[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(3): 56-59, 70.
- [2] 涂春霖, 陈庆松, 尹林虎, 李强, 和成忠, 刘振南. 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.
- TU Chunlin, CHEN Qingsong, YIN Linhu, LI Qiang, HE Chengzhong, LIU Zhennan. Research advances of groundwater nitrate pollution and source apportionment in China[J]. Environmental Science, 2024, 45(6): 3129-3141.
- [3] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 刘春燕, 刘俊建. 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(1): 95-100.
- LYU Xiaoli, LIU Jingtao, ZHU Liang, LIU Chunyan, LIU Junjian. Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater of Lanzhou city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(1): 95-100.
- [4] 黄福杨, 单婷倩, 林静, 刘菲, 王彬, 黄一倪. 典型西南岩溶地下水抗生素污染指示因子识别[J]. 地质科技通报, 2024, 43(2): 283-292.
- HUANG Fuyang, SHAN Tingqian, LIN Jing, LIU Fei, WANG Bin, HUANG Yini. Identification of indicators for antibiotic pollution in typical karst groundwater, Southwest China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2024, 43(2): 283-292.
- [5] Kalhor K, Ghasemizadeh R, Rajic L, Alshawabkeh A. Assessment of groundwater quality and remediation in karst aquifers: A review[J]. Groundwater for Sustainable Development, 2019, 8: 104-121.
- [6] 马杰. 地下水监测在污染场地管理中的重要作用、存在问题与对策建议[J]. 环境工程学报, 2022, 16(4): 1063-1067.
- MA Jie. Significance, problems and countermeasures of groundwater monitoring for contaminated site management[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(4): 1063-1067.
- [7] 黄艳采, 张忠俊, 向刚, 陆雄轩, 王嘉铭, 黄卫星. 污染场地地下水“三氮”空间分布研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 203-205, 208.
- HUANG Yancai, ZHANG Zhongjun, XIANG Gang, LU Xiongquan, WANG Jiaming, HUANG Weixing. Study on spatial distribution of ammonia-N, nitrate-N and nitrite-N in groundwater at a polluted site[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 203-205, 208.
- [8] 崔亚丰, 何江涛, 王曼丽, 赵阅坤, 王菲. 岩溶地区地下水污染风险评价方法探究: 以地苏地下河系流域为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(4): 372-383.
- CUI Yafeng, HE Jiangtao, WANG Manli, ZHAO Yuekun, WANG Fei. Exploration of risk assessment method towards groundwater contamination in karst region: A case study in Disu underground river system basin[J]. Carsologica Sinica, 2016, 35(4): 372-383.
- [9] 陈卓, 刘文晓, 张丹, 吴志远, 夏天翔. 典型化工废渣污染土壤中汞的空间分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(4): 422-431.
- CHEN Zhuo, LIU Wenxiao, ZHANG Dan, WU Zhiyuan, XIA Tianxiang. Spatial distribution and vertical migration of mercury in soil contaminated by chemical waste residues[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(4): 422-431.
- [10] Gong G, Mattevada S, O'Bryant S. Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas[J]. Environmental Research, 2014, 130: 59-69.
- [11] Almodaresi S A, Mohammadrezaei M, Dolatabadi M, Nateghi M R. Qualitative analysis of groundwater quality indicators based on Schuler and Wilcox diagrams: IDW and Kriging models[J]. Journal of Environmental Health and Sustainable Development, 2019, 4(4): 903-912.
- [12] 吴志强, 潘林艳, 代俊峰, 黄亮亮, 万祖鹏. 漓江流域岩溶与非岩溶农业小流域水体硝酸盐源解析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 61-71.
- WU Zhiqiang, PAN Linyan, DAI Junfeng, HUANG Liangliang, WAN Zupeng. Nitrate source apportionment of water in karst and non-karst agricultural sub-basins in the Lijiang River Basin of Guilin, Guangxi, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(6): 61-71.
- [13] 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.
- XU Ke, CHEN Honghan. Progression three forms of nitrogen contaminant transport and transform in groundwater[J]. China Population, Resources And Environment, 2011, 21(S2): 421-424.
- [14] 李霄, 王晓光, 柴璐, 朱巍, 何海洋, 王长琪. 沉积盆地地下水无机氮来源示踪及其演化模式[J]. 中国环境科学, 2021, 41(4): 1856-1867.
- LI Xiao, WANG Xiaoguang, CHAI Lu, ZHU Wei, HE Haiyang, WANG Changqi. Sources tracing and evolution model of inorganic nitrogen of groundwater in sedimentary basin[J]. China Environmental Science, 2021, 41(4): 1856-1867.
- [15] 王晓玲, 郑晓通, 李松敏, 张福超. 农田排水沟渠底泥-间隙水-上覆水氮磷迁移转化规律研究[J]. 水利学报, 2017, 48(12): 1410-1418.
- WANG Xiaoling, ZHENG Xiaotong, LI Songmin, ZHANG Fuchao. Study on the migration and transformation of nitrogen and phosphorus in sediment-interstitial water-overlying water in farmland drainage ditch[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1410-1418.
- [16] 李丽君, 刘强. 黑龙江省海伦地区浅层地下水中“三氮”分布特征及来源解析[J]. 岩矿测试, 2023, 42(4): 809-822.
- LI Lijun, LIU Qiang. Distribution characteristics and source analysis of “Three Nitrogen” in shallow groundwater in Hailun

- area of Heilongjiang Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2023, 42(4): 809-822.
- [17] 黄颖, 江涛, 丁杰, 禰映雪, 陈建耀, 李睿. 城镇化流域地下水氮素组成特征及来源解析[J]. *热带地理*, 2023, 43(7): 1400-1410.
- Huang Ying, Jiang Tao, Ding Jie, Xuan Yingxue, Chen Jianyao, Li Rui. Composition and source identification of nitrogen in groundwater in an urbanized basin[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(7): 1400-1410.
- [18] 黄金廷, 宋歌, 蒲芳, 王嘉玮, 李宗泽, 张方, 孙芳强. 层状包气带“三氮”污染物迁移转化原位实验研究[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(6): 1208-1214.
- HUANG Jinting, SONG Ge, PU Fang, WANG Jiawei, LI Zongze, ZHANG Fang, SUN Fangqiang. Migration and transformation of “Three Nitrogen” pollutants in multilayer unsaturated zone: an in situ experiment [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022, 31(6): 1208-1214.
- [19] 赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽. 典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(6): 2664-2670.
- ZHAO Ran, HAN Zhiwei, SHEN Chunhua, ZHANG Shui, TU Han, GUO Yongli. Identifying nitrate sources in a typical karst underground river basin[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(6): 2664-2670.
- [20] 李扬, 杨桢, 康凤新, 刘金勇, 孙彦伟, 黄静波. 东阿水文地质单元地下水硝酸盐污染来源的同位素分析[J]. *中国岩溶*, 2019, 38(1): 19-27.
- LI Yang, YANG Zhen, KANG Fengxin, LIU Jinyong, SUN Yanwei, HUANG Jingbo. Isotope analysis on the source of nitrate contamination to groundwater in the Dong'e hydrogeologic unit[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(1): 19-27.
- [21] 杨平恒, 华茂松, 罗为群, 郭文静. 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.
- YANG Pingheng, HUA Maosong, LUO Wei-qun, GUO Wenjing. Research progress of nitrate tracing in karst groundwater based on CiteSpace[J]. *Carsologica Sinica*, 2024, 43(3): 563-574.
- [22] Organization W H. Guidelines for drinking-water quality: incorporating the first and second addenda [R]. Geneva: World Health Organization, 2022.
- [23] 卞建民, 张真真, 韩宇. 松嫩平原地下水氮污染空间变异性及健康风险评估[J]. *重庆大学学报*, 2015, 38(4): 104-111.
- BIAN Jianmin, ZHANG Zhenzhen, HAN Yu. Spatial variability and health risk assessment of nitrogen pollution in groundwater in Songnen Plain[J]. *Journal of Chongqing University*, 2015, 38(4): 104-111.
- [24] Zhang Y, Wu J, Xu B. Human health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Jinghui canal irrigation area of the loess region, northwest China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(7): 273.
- [25] 陈余道, 程亚平, 蒋亚萍, 林鹏, 蒋灵芝. 岩溶地下河反硝化作用的有限性: 一个碳酸盐岩管道的实验研究[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3629-3635.
- CHEN Yudao, CHENG Yaping, JIANG Yaping, LIN Peng, JIANG Lingzhi. Limitation of denitrification in karst subterranean river: A carbonate-conduit experimental study[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10): 3629-3635.
- [26] 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁. 氧同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋[J]. *环境科学*, 2021, 42(5): 2268-2275.
- REN Kun, PAN Xiaodong, LIANG Jiapeng, PENG Cong, ZENG Jie. Sources and fate of nitrate in groundwater in a typical karst basin: insights from carbon, nitrogen, and oxygen isotopes[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(5): 2268-2275.
- [27] 扈志勇, 杨梅. 岩溶区土壤氮流失及其对地下水的污染[J]. *人民长江*, 2008(18): 32-34.
- HU Zhiyong, YANG Mei. N loss in soil in karst area and its pollution to underground water[J]. *Yangtze River*, 2008(18): 32-34.
- [28] 庞朝晖, 李立波, 岳禹峰. 农村地下水硝酸盐氮污染及其防治[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(10): 2605-2608.
- PENG Zhaohui, LI Libo, YUE Yufeng. Remediation of groundwater polluted by nitrate in rural area[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2010, 49(10): 2605-2608.

Research on the spatial distribution and risk control of "three forms of nitrogen" in groundwater in an urban area of southwest China

HUANG Yancai¹, JIN Bo², ZENG Mudan¹, XIANG Gang¹

(1. No.104 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Duyun, Guizhou 558000, China;

2. No.115 Geological Brigade, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Qingzhen, Guizhou 551400, China)

Abstract Since the implementation of drought-resistant water exploration and well-drilling work, the utilization of groundwater in the karst areas of Southwest China has been increasing. While groundwater has generated much attention, the problems of groundwater pollution have also come to light, particularly concerning the "three forms of nitrogen" pollution in water. The sources of nitrogen pollution are complex, and its pathways are varied. Under the special hydrogeological conditions of karst areas, surface pollutants are more likely to infiltrate into the ground. Given

the concealment and mobility of groundwater, pollutants continuously migrate with the groundwater flow. Once contaminated, the difficulty of restoration and remediation is extremely high.

Taking an urban area in Southwest China as an example, this study conducted hydrogeological surveys and water sample testing. Based on data such as springs, boreholes, and water quality, this study utilized the method of Inverse Distance Weighting (IDW) to interpolate and analyze the "three forms of nitrogen" in groundwater. Combined with the field model of groundwater flow, the spatial distribution of "three forms of nitrogen" was analyzed. Furthermore, the areas for risk control were delineated through overlay analysis. The results show that there were differences in the spatial distribution of "three forms of nitrogen" in the study area. Urban boreholes and sewage treatment plants had a greater impact on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration, while agricultural and residential areas significantly influenced $\text{NO}_3^-\text{-N}$ levels. The overall situation regarding $\text{NO}_2^-\text{-N}$ was favorable, with no significant pollution detected. Additionally, there were notable differences in the concentrations of the "three forms of nitrogen", with the highest concentration of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ reaching $96.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, which was much higher than the concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ($8.00 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ ($0.500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$). This variation is attributed to the characteristics of karst areas. Under conditions of adequate oxygen content, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ were converted into $\text{NO}_3^-\text{-N}$. With the use of the Class III water index specified in the Standard for Groundwater Quality (GB/T 14848-2017) as the control boundary, the study area is divided into three zones through ArcGIS overlay analysis, key control area (Class IV-V), secondary control area (Class III), and general area (Class I-II). In key control areas, the focus is on controlling sewage discharge and leakage, as well as nitrogen loss from agricultural activities. Specific measures include strengthening control of pollution emission in densely populated residential areas, ensuring the impermeability of residential water wells, sewage pipelines, and wastewater treatment plants. In agricultural-intensive areas, the implementation of scientific fertilization and rational allocation of fertilizers should be prioritized to prevent the migration of "three forms of nitrogen" at the source. In secondary control areas, the emphasis is on preventing further pollution and optimizing water quality indicators. Specific measures include optimizing the sewage systems in residential areas, further controlling pollution emissions, enhancing regional soil and water conservation capacities, and improving vegetation absorption efficiency. Additionally, measures such as crop rotation, optimizing crop irrigation methods, ecological breeding, and reducing random sewage discharge should be implemented to comprehensively improve the regional ecological space. In general areas, the focus is on maintaining the current status and preventing pollution.

Key words urban area, groundwater, three forms of nitrogen, spatial distribution, risk control

(编辑 杨杨)