

农村饮用水源地污染溯源与防护技术研究

袁 旭

河南宋韵水务开发有限公司 河南 开封 454002

【摘 要】：农村饮用水源地水质安全是农村居民健康生活与乡村振兴战略实施的基础保障。当前，我国农村供水体系建设取得显著进展，但水源地仍普遍面临农业面源污染、农村生活污水直排、流动源污染等多重压力，污染溯源与水源地防护成为亟待破解的关键技术难题。本文在系统梳理农村饮用水源地污染来源与特征的基础上，重点分析了基于水质荧光指纹图谱的污染溯源技术、常规与特征指标联合监测技术，以及综合污染流动路径分析法的溯源体系。进而，从保护区科学划定、物理隔离与标识规范化建设、面源污染源头管控、取水口应急防控能力建设等维度，构建了覆盖“源头控制—过程阻隔—末端应急”的农村饮用水源地防护技术框架。研究表明，建立“溯源—监控—防护—应急”一体化的综合技术体系，是提升农村饮用水安全保障水平的有效路径。

【关键词】：农村饮用水源地；污染溯源；水质指纹图谱；水源防护；应急防控

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.098

1 引言

饮用水安全直接关系到人民群众的身体健康和社会稳定。近年来，随着国家对农村饮水安全保障工作的持续强化，农村供水基础设施建设取得了长足进步。以吉林省为例，全省农村自来水普及率已达 97.8%，但供水保障水平仍存在进一步提升的空间。作为供水工程的“第一道关口”，水源地的水质状况从根本上决定了农村居民的饮水安全。

然而，农村饮用水源地普遍面临污染类型多样、污染源分散隐蔽、监管力量薄弱等突出问题。与城市集中式水源地相比，农村分散式水源点数量庞大，且多毗邻农田、村庄和交通线路，不可避免地受到农业生产、居民生活和交通运输等活动的影响。污染源的识别与追溯是实施精准防控的前提，而当前的溯源技术在农村复杂环境下的适用性和经济性仍有待提升。与此同时，水源防护措施的系统性和针对性也需要进一步加强。

本文以农村饮用水源地作为研究对象，系统分析其主要污染来源与特征，梳理当前污染溯源的技术方法，并在此基础上探讨从保护区划分到应急防控的全链条防护技术体系，以期在农村饮用水安全保障工作提供理论参考和技术支撑。

2 农村饮用水源地污染来源与特征分析

2.1 农业面源污染

农业面源污染是农村饮用水源地最主要且最难控制的污染类型之一，其主要来源于农田施肥、农药施用以及畜禽养殖活动。在实际案例中，农村水源地集雨范围内的农田面源污染物负荷呈现显著特征。根据对广东省罗定市某水库饮用水源地的调查数据，其集雨范围内农田（水田、旱地和园地）化学需氧量（COD）排放总量为 23353.71kg/a，氨氮（ $\text{NH}_3\text{-N}$ ）排

放总量为 4670.74 kg/a，总氮（TN）排放总量为 18682.97 kg/a，总磷（TP）排放总量为 934.15kg/a。这些数据表明，农业生产活动中氮、磷及有机污染物的排放构成了水源地水质的重要潜在威胁。

畜禽养殖污染同样是农业面源的重要组成部分。农村地区小型分散养殖户普遍存在，养殖废弃物处理设施简陋或缺失，导致污染物未经有效处理便随径流进入水源水体。农业污染源中含有的农药类、有机类、细菌类和营养盐类物质，对水质安全构成了复杂而长期的危害。

2.2 农村生活污染

农村生活污染主要表现为生活污水与生活垃圾的不规范排放。生活污水中富含有机物、氮磷等营养物质及病原微生物。以安徽省淮南市凤台水厂饮用水水源保护区为例，保护区内常住人口 646 人，年生活污水排放量为 18863.2t，其中 COD 排放量为 13.0392t/a，氨氮排放量为 0.94316t/a。

生活垃圾方面，该保护区年产生量约为 175.19t，虽已设置固定位置垃圾箱集中收集并由环卫部门统一清运，但在农村地区，尤其是地处偏远的分散式水源点周边，生活垃圾随意倾倒、堆放的现象时有发生。垃圾渗滤液中的有机污染物和重金属离子可能通过地表径流或下渗作用进入水源，进一步加剧水质的潜在恶化风险。

2.3 农村小型工业污染

伴随乡村产业发展，村镇周边零散分布小型加工厂、农产品加工作坊、小型建材加工点等，形成区域性工业污染风险。此类小型工业普遍存在治污配套设施不完善、废水处理工艺简单、运维管理缺位等问题，生产废水若未稳定达标排放，将通

过地表沟渠、土壤下渗汇入周边水源水体。

加工废水中常携带悬浮物、有机酸、重金属、盐分及少量有机溶剂,部分作坊清洗废水瞬时排放浓度波动大,易造成水源水质突发性超标。同时,厂区固体废料、废弃原料露天堆放,遇降雨冲刷形成淋溶污染,持续向水体输送污染物。多数乡村小型工业规模小、布局零散,隐蔽性较强,常规巡查难以实现常态化监管,属于农村水源地易被忽视的污染源。

2.4 流动源污染

穿越或邻近水源保护区的道路和桥梁构成流动污染源。运输车辆在行驶过程中可能因交通事故造成汽油、柴油等危险品泄漏,从而对水源造成突发性污染威胁。在典型农村水源地的风险评估中,流动源的常见风险物质包括汽油和柴油,其主要的污染环节发生在存储与运输过程中。

3 农村饮用水源地污染溯源技术

3.1 基于水质荧光指纹图谱的溯源技术

水质荧光指纹溯源依靠不同污染源特有的光谱特征实现污染判别,农业、生活、小型工业废水会形成差异化荧光峰值,可快速区分污染类型。种植、养殖废水多在310/405nm、260/425nm波段出现响应;生活与畜禽废水峰值集中在230/305nm、280/310nm等区间;乡村小型加工废水存在专属特征荧光信号,便于精准识别工业污染。该技术标准化流程为:搭建区域污染源指纹数据库、现场采样检测、图谱比对溯源、实地排查核验。水样指纹与数据库污染源匹配后可锁定疑似排污点位;无匹配结果时,结合污染流动路径法缩小排查范围,具备结果可视化、操作标准化优势。

3.2 常规监测与特征指标体系

常规水质监测是基础预警手段,监测指标包含水温、pH、溶解氧、COD、氨氮、总氮总磷、重金属、粪大肠菌群等,可结合水源周边污染类型灵活增补参数。各类污染源存在专属特征污染物:生活污水含表面活性剂,养殖废水检出抗生素、激素,农田径流农药残留突出,小型工业废水重点关注特征重金属、有机溶剂与盐分。同步开展新型污染物检测与生物毒性预警,将常规指标与特异性特征指标联用,能够大幅提升污染溯源的精准度与靶向性。

3.3 综合溯源方法体系的构建

面对农村地区污染源分散、类型多样且强度不一的复杂现状,单一的技术手段往往难以高效地完成污染溯源任务。当前更为有效的溯源模式是在指纹图谱分析的基础上构建综合溯源方法体系。

具体而言,在条件适宜的区域,可优先建立涵盖区域内各类重点排放源的水质荧光指纹数据库。在此基础上,结合资料收集与采样设计,进行系统的水质检测和数据比对。当指纹比对明确指向某一或某类污染源时,即通过现场排查予以验证确认;当指纹比对未能锁定目标时,则可运用污染流动路径法开展进一步的溯源分析。该方法的原理在于,通过比较上下游各采样节点间的指纹相似度——当相似度达到60%及以上时,表明节点间存在污染流动路径的可能性较高。在此过程中,同步开展水量稽核,能够有效排除水量剧烈变化等因素所带来的干扰。这一“指纹比对—路径分析—水量核验”的闭环溯源框架,为农村饮用水源地污染的精准追溯提供了可靠的技术保障。

4 农村饮用水源地防护技术体系

4.1 水源保护区科学划定技术

饮用水水源保护区的科学划定是实现水源有效防护的基础性和前置性工作。根据现行技术流程,保护区的划定通常分为以下关键阶段:首先完成水源地的水质与环境状况调查,然后系统分析问题清单并识别环境风险,在此基础上提出相应环境管理要求,筛选适宜的划分方法,并通过计算分析确定保护区的范围。

保护区的级别按功能的严格程度依次划分为一级保护区和二级保护区。各等级保护区的一般划定原则为:一级保护区以取水口为中心,覆盖一定范围的水域与陆域。例如,对于河流型水源地,一级保护区水域通常设定为取水口上游1000m至下游100m的河段,沿岸纵深一般为50m;二级保护区则扩展至取水口上游3000m至下游300m的相应范围。此后,需要完成“现场定界—坐标初步确定—技术报告编制—专家评审—边界修订—图件制作—政府审批”等程序。这一规范化、系统化的技术路线有力地保障了保护区划定的科学性和法定性。

4.2 物理隔离与标识规范化

物理隔离设施是防止人为干预和水源地遭受意外污染的重要物质屏障。实际工程中,隔离防护可采用架设防护围栏、隔离网等方式实现。例如,在陕西省石泉县的农村供水水源地防护工程项目中,采用低碳钢丝浸塑防护网作为隔离材料,立柱材质为镀锌空心管,防护网片规格为长3m、高1.7m,塑后丝径4.5mm,网孔尺寸17cm×9cm。配套设置的警示牌尺寸为60cm×40cm,材质为UV板材。

标识系统同样是防护措施的重要组成部分。在一级保护区边界处需设置水源保护区界标,其上明确标注“饮用水水源一级保护区”字样,以及禁止新改扩建与供水设施无关的建设项目、禁止网箱养殖和游泳垂钓等活动的禁令。在道路和水源地

交界区域还应设置交通警示牌与告示宣传牌,以提醒过往车辆已进入敏感区域。标识系统的规范化建设有助于更好地发挥环境管理和公众警示的双重功能。

4.3 面源污染源头控制技术

面源污染的管控应从源头控制着手,针对农业和生活两大污染源实施综合治理。在农业污染的控制方面,水源地二级保护区内应禁止集约化的农作物种植模式,同时严格管控化肥和农药的施用强度,并积极推广绿肥种植和测土配方施肥等环境友好型农业技术。

在生活污染的控制方面,水源保护区内的生活污水分户收集后,宜经由管道系统集中运送至保护区外进行处理;生活垃圾也应统一收集并实行外运处置。对于分散式供水工程的水源地,应引导周边居民采取更为严格的卫生防护措施,杜绝污水直排和垃圾倾倒行为。

水源涵养林建设是一种兼具生态效益与防护效果的综合性面源污染阻控手段。在水库上游入库河流的上溯一定距离内,通过加强林地保护并进行渐进的林分改造,能够有效增强土壤的水源涵养与保土蓄水能力,从而减少污染物随地表径流向水源地的输送量。这种以生态系统自我修复与维护为核心的调控方式,尤其适用于山区农村水源地的污染防治需求。

4.4 取水口应急防控能力建设

加强取水口应急防控能力建设,是保障农村饮用水水源安全最后一道防线的重要内容。在工程措施方面,可取水口附近预先配置应急风险防控物资,包括管材、水泵、发电机和阀门等设施,以确保突发环境事件发生时能够第一时间展开应对。

在监测预警方面,取水口应当配备自动监测设备及视频监

控设施,并安排专门人员进行日常巡检。相关技术方案建议应为自来水厂出厂水和管网末梢水安装自动监控设备,并实行24 h 值班制度以保证通信畅通。

在应对突发污染事件的过程中,当确认发生饮用水水源污染突发情况时,应果断采取措施快速切断受污染水源的供应,并同步启动备用水源进行应急供水,以确保停水时间最短化和影响范围最小化。此外,水源地的管理体系还应包括预案编制、物资准备、应急演练和专家库建设等柔性保障环节。

5 结论

(1) 农业面源污染、农村生活污染和流动源污染是导致农村饮用水源地水质恶化的三类主要污染源。这些污染源中的有机污染物(以COD为标志)和含氮化合物(以TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为标志)的特征性排放负荷最高,构成了水源防护中亟需优先管控的对象。

(2) 基于水质荧光指纹图谱的污染溯源技术、常规与特征指标联合监测技术以及综合污染流动路径分析法的组合应用,可以有效提升农村饮用水源地复杂环境条件下污染来源追溯的精准度和效率。

(3) 构建涵盖水源保护区科学划定、物理隔离与标识规范化建设、面源污染源头控制、取水口应急防控以及全过程系统管控的新型水源防护技术体系,是提升农村饮用水安全保障水平的必由之路。

(4) 当前应当重点推进“溯源—监控—防护—应急”一体化管控框架的建立和完善,通过污染来源精准识别、水质状况动态监测、污染负荷过程拦截、突发事件快速响应等多维度的协同发力,全面筑牢农村饮用水水源地的生态安全屏障。

参考文献:

- [1] 吉林省人民政府办公厅.吉林省农村供水高质量发展实施方案(2023-2026年)[Z].2023.
- [2] 云浮市罗定市人民政府.云浮市罗定市农村千人以上供水工程水源地保护区划分技术报告[R].2025.
- [3] 生态环境部.入河入海排污口监督管理技术指南水质荧光指纹溯源方法[S].2024.
- [4] 淄博市水利局.淄博市太河水库饮用水水源地保护专项规划(2024—2035年)[R].2024.
- [5] 淮南市人民政府.淮南市凤台水厂饮用水水源地突发环境事件应急预案[R].2024.
- [6] 红河州生态环境局绿春分局,云南省有色地质局三〇八队.红河州绿春县八尺水库县级饮用水水源地保护区划定方案[R].2025.