

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.01.021

滇池流域地下水入渗量化评估体系研究

余黎^{1,2}, 李萌^{1,2}, 赵冬泉^{1,2}

(1. 浙江清环智慧科技有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100086)

摘要: 为量化评估滇池流域地下水入渗情况,以减轻污水处理厂负荷并提升进水浓度,选取滇池流域某典型片区为研究对象,布设在线监测点位,并采集水样进行水质分析,利用水质-流量综合检测法,构建滇池流域地下水入渗量化评估体系,获取片区旱季和雨季旱天污水排放的真实过程数据,定量化评估该典型片区地下水入渗情况,识别外来水入渗与区域特征、降雨特征等之间的关联关系,判断影响地下水入渗的关键因素,同时对多种地下水入渗计算水质指标的适用性和可靠性进行分析,为滇池流域管网排查、地下水入渗定量分析与剥离提出建议。

关键词: 地下水入渗; 水质-流量综合检测; 水质水量平衡; 水质特征因子

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)01-0131-06

Quantitative Assessment System for Groundwater Infiltration in Dianchi Lake Basin

YU Li^{1,2}, LI Meng^{1,2}, ZHAO Dongquan^{1,2}

(1. Zhejiang Tsinghuan Smart Tech Co. Ltd., Ningbo 315000, China; 2. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: To quantitatively assess groundwater infiltration in the Dianchi Lake basin, thereby reducing the load on wastewater treatment plants and improving influent concentration, a typical area in the Dianchi Lake basin was selected as the study object. Online monitoring stations were established, and water samples were collected for quality analysis. Utilizing the water quality-flow integrated monitoring method, a quantitative assessment system for groundwater infiltration in the Dianchi Lake basin was developed. Real process data for wastewater discharge during dry days in dry and rainy seasons were obtained for the study area. This enabled a quantitative assessment of groundwater infiltration in the typical area, identifying correlations between external water infiltration and regional characteristics, rainfall patterns, and other factors. Key influences on groundwater infiltration were determined, while the applicability and reliability of various water quality indicators for calculating groundwater infiltration were analyzed. Recommendations were proposed for pipeline network inspections, quantitative analysis and separation of groundwater infiltration in the Dianchi Lake basin.

Keywords: groundwater infiltration; water quality-flow integrated monitoring method; water quality and quantity balance; water quality characteristic factor

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3203201)

通信作者: 余黎 E-mail: yuli198909@163.com

污水处理厂收集的污水中常包含清水,这些清水主要来源于直接入流的外水和渗入的地下水,这会导致管网负荷加重、合流制管道溢流问题加剧,同时增加污水厂的处理成本并降低处理效率^[1-2]。为了定量分析地下水入渗情况,国内外研究者已开发了多种方法,其中流量分析法和化学分析法是两种主要手段。流量分析法虽然简单、直接,但存在一定的误差和不确定性^[3-4]。而化学分析法基于地下水与生活污水中化学物质的差异性,能够更准确地定位管道中污水的成分及来源^[5-6]。在化学分析法中,常用的指标包括COD、NH₃-N、TN、TP等。然而,COD虽然有效,但检测成本较高,且在污水管网中易发生反应而导致浓度变化。相比之下,氨氮、总氮和总磷在污水管网中浓度相对稳定,更适合作为地下水入渗的计算指标。

滇池流域的污水处理厂存在实际处理量超出理论值的问题,且部分进水浓度较低,主要是地下水入渗所致,因此,对地下水入渗的量化评估和防治剥离工作显得尤为重要。以滇池流域某典型片区为研究对象,利用水质-流量综合检测法定量分析该片区的地下水入渗量,并通过对比分析旱季与雨季、不同水质指标的入渗率计算结果,识别外来水入参与区域特征、降雨特征等之间的关联关系,同时对多种地下水入渗计算水质指标的适用性和可靠性进行分析,为滇池流域管网排查、地下水入渗定量分析与剥离提出建议。

1 技术方法

1.1 技术路线

技术路线如图1所示。

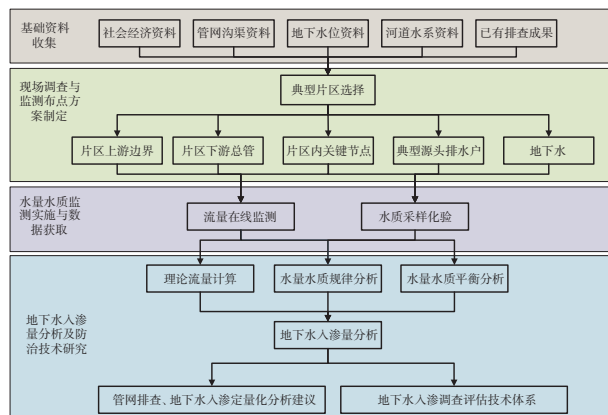


图1 技术路线

Fig.1 Technology roadmap

首先需收集相关基础资料,包括人口和用地等社会经济资料、管网沟渠资料、地下水位资料、河道水系资料,以及滇池流域关于地下水入渗已有的相关排查和研究成果等。之后对典型片区开展现场复核与监测方案编制工作,监测点位应考虑片区上下游边界及片区内关键转输点,并需对典型源头排水户及地下水进行同步监测。监测方案确定后,开展水量水质监测工作,获取相关数据。最终根据获得的数据进行地下水入渗量分析,提出管网排查与地下水入渗定量分析建议。

1.2 研究方法

采用水质-流量综合检测法定量分析地下水入渗量,该方法基于污水与地下水的水质差异,结合流量监测和水质检测数据,通过联立方程组,计算监测点所在服务片区的地下水入渗量,基本计算公式如下:

$$Q_i \cdot C_i + Q_w \cdot C_w + \sum (Q_u \cdot C_u) = Q_m \cdot C_m \quad (1)$$

$$Q_i + Q_w + \sum Q_u = Q_m \quad (2)$$

由此可得:

$$Q_i = \frac{Q_w \cdot (C_m - C_w) - \sum (Q_u \cdot C_u) + \sum Q_u \cdot C_m}{C_i - C_m} \quad (3)$$

式中: Q_i 为片区地下水入渗量, m^3/d ; C_i 为地下水水质浓度, mg/L ; Q_w 为片区产生的污水量, m^3/d ; C_w 为典型污水水质浓度, mg/L ; Q_u 为上游来水量, m^3/d ; C_u 为上游来水水质浓度, mg/L ; Q_m 为监测点流量, m^3/d ; C_m 为监测点水质浓度, mg/L 。

该方法的数据需求为典型污水水质浓度、地下水水质浓度、监测点流量、监测点水质浓度,基本适用于所有监测点位。

2 典型片区选取

在流域范围内选择地下水入渗调查研究的典型片区时,需综合考虑以下原则:

① 面积适中:若挑选的典型片区面积过小,地下水入渗研究的偶然性增大,将影响结果的代表性;若面积过大,会引入更多的影响因素,研究难度增大,结果的可靠性降低。本研究选取的典型片区面积以2~4 km^2 为宜。

② 具备地下水监测条件:地下水水位和水质数据对地下水入渗研究至关重要,同时,不同区域的地下水水位和水质可能存在差异,因此,在选择

典型片区时,应尽量保证该片区内或附近有地下水监测点位。

③ 排水户类型尽量单一:不同类型的排水户(居民小区、企业、学校、医院等),其排水水质特征存在差异,会影响区域源头水质的判断,在选择典型片区时应尽量减少区域排水户的类型。

④ 远离清水渠道:避免清水渠道直接与污水管网连通而导致清水直接入流,以及减少山泉水、河水等清水对入渗量计算的影响。

基于上述原则,在流域范围内选取典型分区,其分布如图2所示,位于水质净化厂服务范围内,面积为3.22 km²,共包含污水管道17.4 km、污水渠道0.3 km,片区内排水管道整体走向为从北向南,污水汇集至片区南侧后转输进入水质净化厂,片区东侧有一潜水类型的地下水国考点。

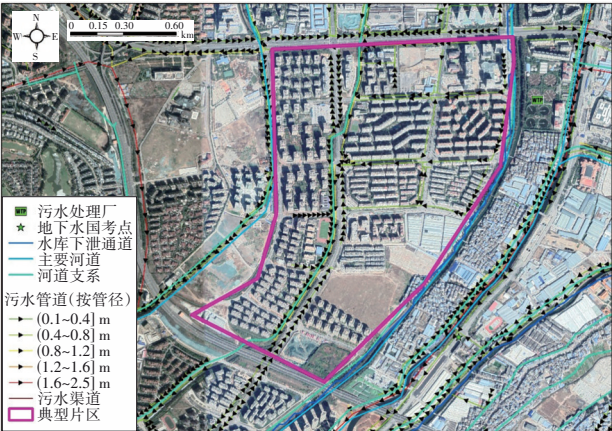


图2 典型片区分布

Fig.2 Distribution map of a typical area

3 监测布点方案

根据典型片区内污水管网的拓扑关系,确定监

测布点方案,在1个片区出水节点(C1)、2个片区内转输节点(Z1与Z2)布设流量在线监测仪,另外包括2个源头排水户节点(Y1与Y2),地下水监测点位取附近地下水国考点。监测点位布置及各点位对应的排水分区如图3所示,连续在线监测时长不少于2个月,其中1个月为旱季、1个月为雨季。

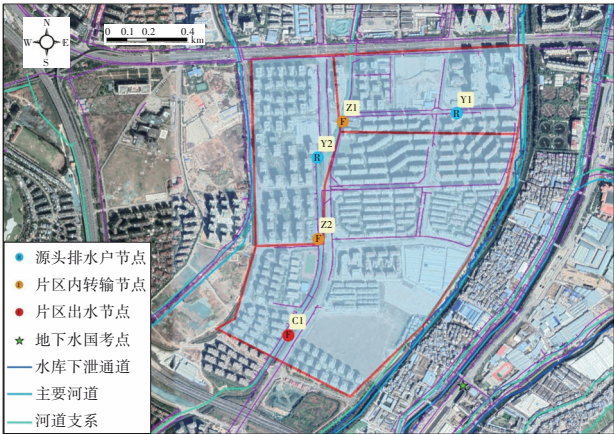


图3 典型片区监测布点示意

Fig.3 Monitoring point layout map of a typical area

对试点片区6个点位进行水质采样检测,每周采集1个旱天(采样日前2 d内未发生降雨),每天采样3次,分别在早晨、中午、晚上三个时段采样,检测指标为COD、NH₃-N、总硬度、TP。

4 监测数据分析

4.1 水质采样检测结果

本研究各点位的水质检测结果如表1所示。其中,点位Y1与Y2为典型小区出口,片区内小区出口水质浓度检测结果的平均值作为该片区典型污水水质浓度,片区地下水水质数据采用相邻地下水国考点检测数据。

表1 所研究片区的水质检测结果

Tab.1 Water quality test results of study area

mg/L

项目	COD		氨氮		TP		总硬度	
	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季
地下水国考点	4.00	13.89	0.13	0.03	0.03	0.02	342.78	348.78
Y1	331.83	248.33	91.26	47.50	8.23	5.28	160.11	199.44
Y2	271.67	114.33	68.08	34.97	7.07	2.68	189.00	192.11
Z1	174.33	110.89	62.15	30.18	4.03	1.41	191.78	240.67
Z2	109.44	38.00	30.71	11.96	3.42	0.90	232.78	306.44
C1	117.50	47.89	34.17	13.36	3.35	1.10	235.00	257.33

为了复核地下水与源头排水户在旱季与雨季污染物浓度变化的原因,利用手持机(便携式流量计)分别在旱季与雨季对地下水国考点、Y1和Y2的

液位与流量进行了临测,结果显示,在雨季3个点位的液位与流量均有所上升,推断部分雨水通过下渗、入流等方式进入地下水与源头排水户,从而影

响各点位的污染物浓度。

4.2 监测数据的指标计算和统计分析

Z1为典型片区内转输节点,管径为0.5 m,液位较高,大部分时间处于接近满管的状态。在旱季该点位旱天平均流量为1 398.90 m³/d,流量最小值为400.90 m³/d、最大值为2 565.22 m³/d,平均液位为0.42 m、最大液位为0.48 m,平均流速为0.18 m/s;在雨季该点位旱天平均流量为1 619.50 m³/d,流量最小值为676.50 m³/d、最大值为2 697.40 m³/d,平均液位为0.45 m、最大液位为0.63 m,平均流速为0.16 m/s。流量、液位变化规律符合居民用水习惯,02:00—06:00及15:00—18:00流量相对较低,12:00左右及18:00以后流量逐渐升高,该点位旱季与雨季流量特征曲线如图4所示。

Z2为典型片区内转输节点,管径为0.7 m,液位较低但井深较高。在旱季该点位旱天平均流量为4 816.65 m³/d,流量最小值为3 536.35 m³/d、最大值为5 650.56 m³/d,平均液位为0.29 m、最大液位为0.34 m,平均流速为0.37 m/s;在雨季该点位旱天平均流量为7 838.80 m³/d,流量最小值为6 600.10 m³/d、最大值为8 874.10 m³/d,平均液位为0.33 m、最大液位为0.38 m,平均流速为0.52 m/s。流量、液位变化规律符合居民用水习惯,02:00—06:00及15:00—18:00流量相对较低,12:00左右及18:00以后流量逐渐升高。

C1为典型片区的出水节点,管径为0.8 m。在旱季该点位旱天平均流量为7 999.07 m³/d,流量最小值为6 372.86 m³/d、最大值为10 107.07 m³/d,平均液位为0.21 m、最大液位为0.30 m,平均流速为0.85 m/s;在雨季该点位旱天平均流量为17 352.80 m³/d,流量最小值为15 902.7 m³/d、流量最大值为

18 631.3 m³/d,平均液位为0.38 m、最大液位为0.53 m,平均流速为0.83 m/s。流量、液位变化规律符合居民用水习惯,02:00—06:00及15:00—18:00流量较低,12:00左右及18:00以后流量逐渐升高。

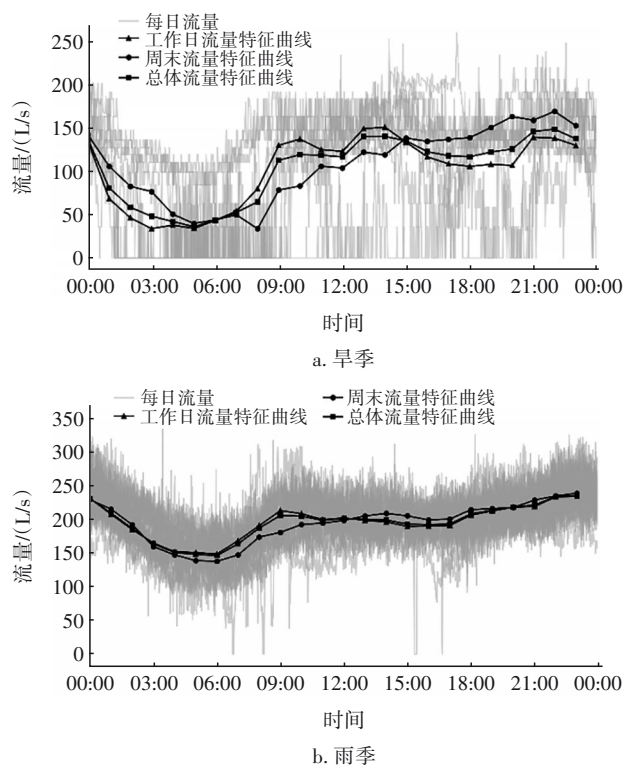


图4 点位Z1旱季和雨季流量特征曲线

Fig.4 Flow characteristic curves at point Z1 in dry and rainy seasons

4.3 地下水入渗分析

由于源头水质采样点位数量及采样次数有限,本研究获取的源头水质数据可能有一定误差,因此取各点位所有时间段检测到的水质数据平均值作为计算依据。基于各点位流量数据和平均水质数据计算各分区的入渗率,结果如表2所示。

表2 旱季与雨季片区入渗率计算结果

Tab.2 Calculation results of infiltration rate of study area in dry season and rainy season

项目	服务面积/ hm ²	旱天流量/(m ³ /d)		入渗率/%							
				COD		NH ₃ -N		TP		总硬度	
		旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季	旱季	雨季
分区1	52.97	1 399	1 619.47	42.79	42.07	22.02	26.82	47.54	64.82	8.84	29.34
分区2	169.68	4 817	7 838.82	64.59	85.60	61.55	71.05	55.55	77.70	21.27	72.33
分区3	99.26	1 366	7 894.54	71.89	81.55	77.89	72.64	68.38	69.24	11.58	10.59
整个片区	321.91	7 582	17 352.83	61.88	79.69	57.20	67.64	56.38	72.65	15.70	40.23

水质指标浓度随着管网转输过程而降低会对地下水入渗率的计算造成一定影响。孙丽萍等^[7]和

金鹏康等^[8]分别通过实验室模拟及现场实测对城市污水管网中各水质指标在转输过程中的变化进行

了研究,结果表明TP在污水管网转输过程中损失量较小,在流经10 km的管道后损失率不超过13.7%,其次为TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总有机物(TCOD)。故本研究采用TP作为评估片区入渗情况的主要指标。

从统计结果来看,典型片区及各分区均存在地下水入渗情况,且相比旱季,典型片区雨季整体入渗率有明显升高,从56.38%升至72.65%。通过查阅区域资料获知,滇池流域的地下水主要为降水补给,地下水资源量的年内分配受降水季节变化影响较大,地下水年最低水位一般出现在旱季末,地下水年最高水位出现在雨季末。经推断,雨季地表水入渗增加,使得地下水位升高,可能会导致更多的地下水入渗至污水管道中。

4.4 不同水质指标计算得到的入渗率比较

对水质-流量综合检测法中利用不同水质指标计算得到的入渗率进行比较,结果如图5所示。

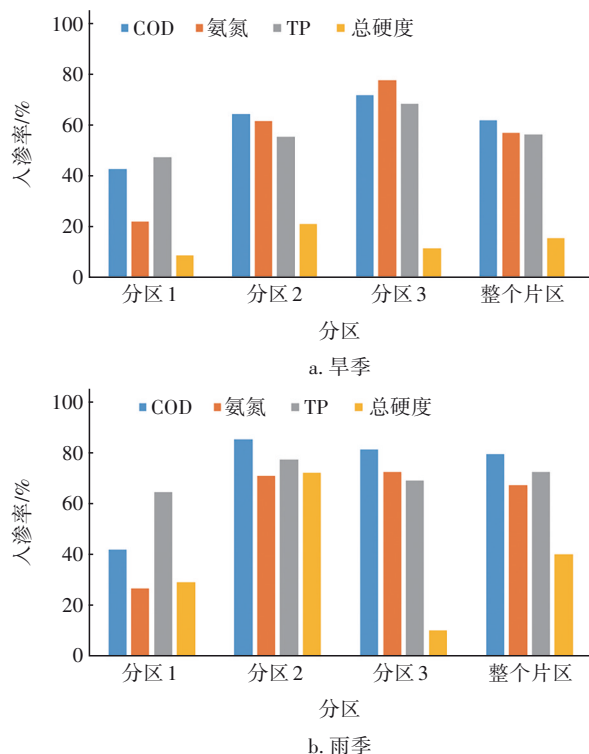


图5 旱季和雨季不同水质指标计算得到的入渗率对比

Fig.5 Comparison of infiltration rates calculated by different water indicators in dry and rainy seasons

将不同水质指标计算得到的整个片区的地下水入渗率与流域已有项目成果进行对比,发现COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP的计算结果与项目中的入渗率计算成果较为匹配。由于TP在管网转输过程中相对

稳定,本研究以TP的计算结果为基准,将其他水质指标的计算结果与之相比较,得到相关系数,其中旱季COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和总硬度与TP计算结果的相关系数分别为0.86、0.99和0.75,雨季的相关系数分别为0.88、0.99和0.31。可以看出, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的入渗率计算结果相关系数最高,均超过0.95,COD次之但相对可靠,总硬度计算结果与其他几个指标差异较大,不适合用来计算地下水入渗率。

由于COD中挥发性有机物等还原性物质可能逸出、污水中微生物对COD进行降解、污水中的颗粒有机物可能会沉淀或残留在管道中等原因,COD在管道转输过程中不够稳定,因此其入渗率计算结果相比 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的要偏大,在片区面积较大、监测点间距较长的情况下,其计算结果与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和TP的偏差进一步加大。在常规指标中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与磷酸盐在排水管道中较为稳定,且在生活污水中较其他水质指标浓度差异较为明显。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 属于相对稳定的离子态物质,在有COD和BOD存在的污水管网中一般不会发生明显的硝化或其他反应而被消耗;TP的变化相对较小,这与管道内相对稳定的缺氧环境有关^[8-9]。地下水和城市河湖水等相对“清洁”的非生活污水倒灌或入渗进入污水管网,是污水处理厂进水浓度,尤其 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、磷酸盐等相对稳定的溶解性水质指标浓度降低的主要原因。在本研究中,TP与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计算得到的多组入渗率结果相近,与国内外相关研究结果具有很高的一致性,综合经验公式法、水质水量综合检测法及其他项目研究成果来看,TP与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 指标相对更加稳定可靠。

许多地区的地下水硬度都高于地表水,所以在地下水和市政污水硬度差异较大的地区,可将硬度作为表征地下水入流入渗的特征因子。但滇池流域研究片区地下水硬度略高于管网中污水硬度,两者差异不太显著。而且研究表明,经过一定的沉降及土壤过滤再渗入管道中后,地下水的总硬度可能存在大幅降低的情况,混入污水时硬度远小于采样检测时的硬度,这会更进一步缩小地下水与管道污水的硬度差。另一方面,若直接采用检测到的地下水硬度指标计算地下水入渗率,计算结果极低。同时,硬度作为非线性水质指标,检测到的生活污水总硬度与管道转输过程中节点处的总硬度差异相比TP与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 等指标较小,计算结果总体偏低且易受到采样检测值波动的影响。综上,总硬度并不

适用于滇池流域地下水入渗量的计算。

5 结论

① 基于基础资料,选取典型片区并布设在线监测点位,利用水质-流量综合检测法,计算结果最终能较准确地反映地下水入渗情况,本研究提出的滇池流域地下水入渗量化评估体系具有一定的普适性。

② 不同水质指标计算得到的地下水入渗率有一定差异,TP在管网转输过程中的稳定性较好,以TP的计算结果为基准, $\text{NH}_3\text{-N}$ 与TP的计算结果相关系数最高,均超过0.95,计算结果可靠。采用COD指标计算得到的地下水入渗率偏大,可能是管道沉积和管内微生物作用所致。利用总硬度计算得到的地下水入渗率有很大的波动,不适合作为地下水入渗量化评估的水质特征因子。考虑到各个水质指标在管网中的衰减情况,水质浓度的变化与计算得到的地下水入渗率为高度的负相关,因此在水质-流量综合检测法中,片区越大、管线越长,计算得到的地下水入渗率越容易偏大。按照现有典型片区管网情况估算,水质浓度衰减对地下水入渗率计算结果的影响在10%以内。

③ 通过在线监测结合水质检测手段,能够定量分析片区地下水入渗情况,但要完全区分地下水与其他外水仍有一定难度。根据现场踏勘情况判断,典型片区中旱天进入管网的外水除地下水之外,还有可能存在河水等地表水的入渗,结合本研究经验,若能取得较为准确的片区用水/人口数据,结合河道水质采样,能够进一步将入渗的地下水与其他外水剥离。另一方面,根据国内外研究成果,使用同位素追踪及模型定量分析是有效区分入渗地下水与其他外水的手段,但要精确区分外水成本较高。对于滇池流域地区而言,水质-水量综合检测法评估得到的地下水入渗率能满足大部分需求,若需进一步将入渗的地下水与其他外水剥离,建议综合考虑项目成本与成果效益。

参考文献:

- [1] DIRCKX G, BIXIO D, THOEYE C, et al. Dilution of sewage in Flanders mapped with mathematical and tracer methods[J]. Urban Water Journal, 2009, 6(2): 81-92.
- [2] DIRCKX G, VAN DAELE S, HELLINCK N. Groundwater Infiltration Potential (GWIP) as an aid to determining the cause of dilution of waste water [J]. Journal of Hydrology, 2016, 542: 474-486.
- [3] HOUHOU J, LARTIGES B S, FRANC-LANORD C, et al. Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer: a combined water and dissolved sulfate stable isotope approach [J]. Water Research, 2010, 44(1): 256-266.
- [4] BARE V, STRÁNSKÝ D, SYKORA P. Sewer infiltration/inflow: long-term monitoring based on diurnal variation of pollutant mass flux [J]. Water Science & Technology, 2009, 60(1): 1-7.
- [5] WATANBE R, HARADA H, YASUI H, et al. Exfiltration and infiltration effect on sewage flow and quality: a case study of Hue, Vietnam [J]. Environmental Technology, 2021, 42(11): 1747-1757.
- [6] KARP F C, KREBS P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach [J]. Water Research, 2011, 45(10): 3129-3136.
- [7] 孙丽萍, 李玲玲, 王爱华, 等. 某城市污水管网水质变化规律[J]. 净水技术, 2019, 38(3): 15-20, 69.
- SUN L P, LI L L, WANG A H, et al. Variation regularity of water quality in an urban sewer network [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 15-20, 69 (in Chinese).
- [8] 金鹏康, 郝晓宇, 王宝宝, 等. 城市污水管网中水质变化特性[J]. 环境工程学报, 2015, 9(3): 1009-1014.
- JIN P K, HAO X Y, WANG B B, et al. Characteristics of water quality variation in sewer networks [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(3): 1009-1014 (in Chinese).
- [9] RODRIGUEZ F, LE DELLIOU A, ANDRIEU H, et al. Groundwater contribution to sewer network baseflow in an urban catchment—case study of Pin Sec catchment, Nantes, France [J]. Water, 2020, 12(3): 689.

作者简介:余黎(1989—),女,湖北武汉人,硕士,工程师,主要研究方向为排水管网监测诊断与海绵城市监测评估。

E-mail:yuli198909@163.com

收稿日期:2024-10-10

修回日期:2024-11-13

(编辑:刘贵春)