不同混接程度分流制雨水系统旱流水量及污染负荷来源研究

孟莹莹,冯沧,李田*,王玲
(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室,上海 200092)

摘要:对上海市 3 个典型分流制雨水系统 H、G、N 的旱流污水水量水质进行了研究.在调查泵站运行情况、服务区域的特点的基础上,得出 3 个系统单位面积的截流水量分别为 3 610、1 550 和 2 970 $m^3/(km^2 \cdot d)$;生活污水混入比例分别为 25%、85%、71%;H 系统以地下水渗入为主,旱流污染程度最轻,G、N 系统都以生活污水混入为主,旱流污染较为严重.对旱流污水可能的混接来源——灰水、黑水、地下水的水质特征进行了初步探索,提出以 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K、Mg/K 3 个参数作为灰水、黑水和地下水的示踪水质参数,灰水的特点为 LAS/NH_4^+-N > 0.2、NH_4^+-N/K < 1,包含黑水的生活污水的特点为 LAS/NH_4^+-N < 0.2、NH_4^+-N/K > 1.在此基础上初步探讨了流程图法和 CMBM 法在雨水系统旱流溯源中的应用,得到的结果与水量水质综合分析的结果基本相符.研究结论和方法可为国内类似分流制雨水系统旱流来源的分析诊断以及后续改造工程提供指导.

关键词:雨污混接;旱流污染;水量水质分析;流程图法;CMBM 法;示踪水质参数
中图分类号:X52 **文献标识码**:A **文章编号**:0250-3301(2009)12-3527-07

Identifying Dry-weather Flow and Pollution Load Sources of Separate Storm Sewer Systems with Different Degrees of Illicit Discharge

MENG Ying-ying, FENG Cang, LI Tian, WANG Ling
(State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Dry-weather flow quantity and quality of three representative separate storm sewer systems in Shanghai-H, G, N were studied. Based on survey of operating status of the pumping stations as well as characteristics of the drainage systems, it was obtained that the interception sewage volumes per unit area in the three systems were 3 610 $m^3/(km^2 \cdot d)$, 1 550 $m^3/(km^2 \cdot d)$, 2 970 $m^3/(km^2 \cdot d)$ respectively; the sanitary wastewater included accounted for 25%, 85% and 71% respectively; the interception volume of H was mainly composed of infiltrated underground water, so the dry-weather flow pollution was slighter, and the interception volumes of G, N were both mainly composed of sanitary wastewater, so the dry-weather which were flow pollution was relatively serious. The water characteristics of potential illicit discharge sources of dry-weather which were flow-grey water, black water and underground water were preliminarily explored, so that treating three parameters-LAS/NH_4^+-N, NH_4^+-N/K, Mg/K as tracer parameters of grey water, black water and underground water was put forward. Moreover, the water characteristics of grey water and sanitary wastewater including black water were summarized: the feature of grey water was LAS/NH_4^+-N > 0.2, NH_4^+-N/K < 1, and sanitary wastewater was LAS/NH_4^+-N < 0.2, NH_4^+-N/K > 1. Based on the above, the applications of flow chart method and CMBM method in dry-weather flow detection of monitored storm systems were preliminarily discussed, and the results were basically same as that obtained in flow quantity and quality comprehensive analysis. The research results and methods can provide guidance for analysis and diagnosis of dry-weather flow sources and subsequent reconstruction projects in similar separate storm sewer systems at home.

Key words: illicit discharge; dry-weather flow pollution; flow quantity and quality analysis; flow chart method; CMBM method; tracer parameter

国内由于公众意识、建设程序、设施不配套等方面的原因,排水系统雨污混接现象严重.深圳市是新建城市,其排水工程的规划与建设完全采用分流制,然而,1990 年排水管理部门对特区内开发建设最早的罗湖、上步两区进行雨水管道的检测时,发现两区的雨、污水系统几乎已全部混流[1].武汉市主城区的规划排水体制中分流制所占面积约为总面积的 80%,但 2004 年武汉市水务部门对排水管网进行的普查中发现,规划分流制系统的雨水和污水管道大多成了双排合流管道,全市分流制地区所占比例仅为 22%[2].上海市中心城区 261 个分流制排水系统单位面积的混接污水量高达 3 140 $m^3/(km^2 \cdot d)$[3].目前,相关城市主要通过在雨水系统出口增设截流设施以控制旱流污水的污染,然而,旱流截污不能解决雨天管道沉积物遭冲刷造成的严重出流污染,而且

收稿日期:2009-01-24;修订日期:2009-05-11
基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07317-001)
作者简介:孟莹莹(1984~),女,硕士,主要研究方向为城市面源污染控制,E-mail:myy840729@163.com
* 通讯联系人,E-mail:tianli@tongji.edu.cn

一些混接系统实际难以有效地截流旱流污水.只有从源头上消除雨污混接,才是控制其污染的理想方法,因此,混接污水来源的诊断已成为国内城市面源污染控制工作的重要内容.

在美国,雨污混接的检测和清理 IDDE(illicit discharge detection and elimination)是城市面源污染控制的基本措施之一[4],EPA 早在 1993 年就已经颁布了针对 IDDE 的用户手册[5],并提出了根据旱流污水水质分析判断混接污水来源的方法,目前,已形成了流程图法(flow chart method)和 CMBM 法(chemical mass balance model)2 种主要的方法[6~11].

本研究在对上海市代表性分流制雨水系统以及合流制系统的旱流污水进行水量水质调查的基础上,分析了相关分流制系统旱流水量及污染的来源,初步探讨了流程图法和 CMBM 法在判断旱流污水来源中的应用,旨在为类似分流制系统旱流污水来源的分析诊断提供指导.

1 材料与方法

1.1 研究系统及分析方法

选择上海市区不同混接程度的 3 个分流制雨水系统(简称 H、G、N 系统)进行旱流水量调查与水质监测,同时对 1 个典型合流制系统(简称 A 系统)进行同步调查监测以提供对比.上述系统均为泵排系统,服务范围以居住区为主,相关泵站具体信息见表 1.各泵站都配置有 SCADA 系统,可记录前池水位、水泵运行状况等参数,水质检测样品通过在泵站前池安装自动采样仪(ISCO 6712),设定"2 h 等间隔采样"程序自动获得,对 H、G、N、A 这 4 座泵站分别进行了 7、4、3、5 次 24 h 连续采样.为掌握居住区旱流污水的排放规律,使用速度面积流量计(NIVUS PCMPro)对上海市 1 个合流制居住小区 B 进行了 24 h 旱流流量的连续测定.为掌握可能的混接来源的水质特点,在非降雨日对上海市区多个居住小区的灰水、黑水分别进行了 10 次、22 次瞬时样取样分析(黑水是抽水马桶的出水,灰水是除黑水之外的所有生活污水),灰水取自建筑内洗涤盆、洗衣机的排水管出口窨井,黑水取自化粪池入口窨井;对于可能渗入管道的浅层地下水的水质特征主要参考夏晨等的调查结果[12].

水质分析参数包括:TP、TN、NH_4^+-N、COD、阴离子表面活性剂 LAS、金属离子(Zn、Fe、Mn、Mg、Ca、Na、K).泵站样品的金属离子分析使用过程样等体积混合得到的混合样,其它参数均直接进行过程样分析;灰水、黑水分析都使用瞬时样.分析方法为:金属离子使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Perkin Elmer,Optima 2100DV)测定,其它参数均采用国家标准方法进行分析[13].

表 1 监测泵站基本信息

Table 1 Basic information about monitored pumping stations

泵站类型	泵站名称	服务面积 /km²	截流泵/台	单台流量 /m³·s⁻¹
雨水	H	2.1	2	0.25
	G	1.6	2	0.028
	N	4.0	2	0.14
合流	A	1.3	4	0.45(2 用);0.28(2 备)

1.2 研究方法

1.2.1 水量水质综合分析法

综合各系统旱流水量、水质的调查结果,对各分流制系统旱流水量及污染负荷进行分析.

1.2.2 流程图法

流程图法是根据各混接来源的水质特征不同,从而对混接污染的主要来源进行分析的方法.它需要掌握各种可能的混接来源的水质特征,确定各来源污水的示踪水质参数,以确定区分不同来源污水的水质分类标准,选取的示踪水质参数及分类标准与地域特点密切相关.

1.2.3 CMBM 法

CMBM 法是根据质量守恒原理,从而对各来源混接污水的比例进行定量的方法.它首先根据旱流污水实测结果初步判断混接的主要来源,确定每种来源的示踪水质参数,然后,对每种混接来源建立一个方程式,建立联立方程组以求解各种混接来源的比例.如可能的混接来源有 j 种,则建立的方程组形式如式(1):

$$\begin{cases} P_1: A_1 \times C_{11} + A_i \times C_{i1} + A_j \times C_{j1} = m_1 \\ P_i: A_1 \times C_{1i} + A_i \times C_{ii} + A_j \times C_{ji} = m_i \\ P_j: A_1 \times C_{1j} + A_i \times C_{ij} + A_j \times C_{jj} = m_j \end{cases} \quad (1)$$

式中,P 为示踪水质参数,A 为各来源污水的比例,C 为各来源污水中示踪水质参数的特征值,$i = 2、3、\cdots、j-1$,m 为污水中示踪水质参数的实测值.方程组简单的求解方法是对各特征值 C 给出确定的值,求解出唯一的 $A_1、A_2、\cdots、A_j$.然而,来源于实地调查的 C 值往往存在波动范围,选取单一值会造成 A 值计算结果的总和不等于 100%.但简单的估算方法得到的结果,在多数情况下仍可基本反映混接污水的组成情况.

2　结果与分析

2.1　旱流水量

根据各泵站截流泵的铭牌流量和运行时间计算所得的截流水量列于表 2,其中 H 系统的运行水位特别低,根据特性曲线对水泵铭牌流量进行了校正.从表 2 可看出,H 系统的单位面积截流水量最大,N 次之,G 最小.根据对 H、G、N、A 这 4 个泵站 SCADA 数据的统计,在未开雨水泵时其前池水位变化范围分别为 -3 ~ -0.27 m、1.8 ~ 2.1 m、2 ~ 2.8 m、-2.3 ~ 2.6 m,平均水位分别为 -2.3 m、1.9 m、2.3 m、0.33 m,可见 G、N 系统的运行水位较高,截流能力相对不足,特别是 N 系统;又由上海市区地下水位约 3.0 m 可知,H、A 系统可能有地下水渗入的发生,H 系统发生的可能性很大.

合流制B小区的旱流流量变化过程与截流泵

表 2　各泵站旱流截流水量计算

Table 2　Dry-weather flow interception quantity computation of all monitored pumping stations

监测泵站	截流泵平均运行时间[1)] /h·d^{-1}	单台流量 /m^3·s^{-1}	截流水量 /m^3·d^{-1}	单位面积截流水量 /m^3·(km^2·d)$^{-1}$
H	10	0.250	7 580	3 610
G	24	0.028	2 450	1 550
N	24	0.139	12 010	2 970
A	10	0.450	16 200	12 460

1)H、A 泵站 1 d 中截流泵多次启闭

24 h 运行的 G、N 泵站在非降雨日 2008-07-06 ~ 2008-07-10 的前池水位变化过程如图 1 ~ 3 所示.图 1 中 B 小区的流量高峰发生于早晨起床至午饭后以及晚饭至就寝前 2 个时段,且后 1 个时段的峰值显著高于前 1 个;图 2、图 3 中 G、N 泵站的水位变化规律都与图 1 类似,表明这 2 个泵站的旱流来源主要为生活污水,此外,2 个泵站每日水位峰值出现的时间约后移 0.5 h,呈现受潮汐河道潮位影响的明显迹象[14].为探究 G、N 系统与河水的水量变化关系,将泵站排放河道在 2008-07-07 的水位与泵站前池水位的变化关系表示于图 4、图 5.从图 4 可看出,大多数时间内,河道水位都高于 G 泵站前池水位,河水流入系统的可能性不大,当前池水位较高时,会很快恢复到

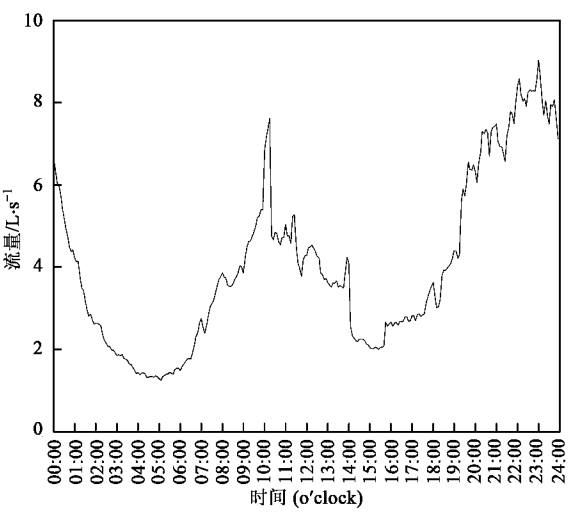

图 1　B 小区旱流流量变化过程

Fig.1　Curve of dry-weather flow rate versus time in B district

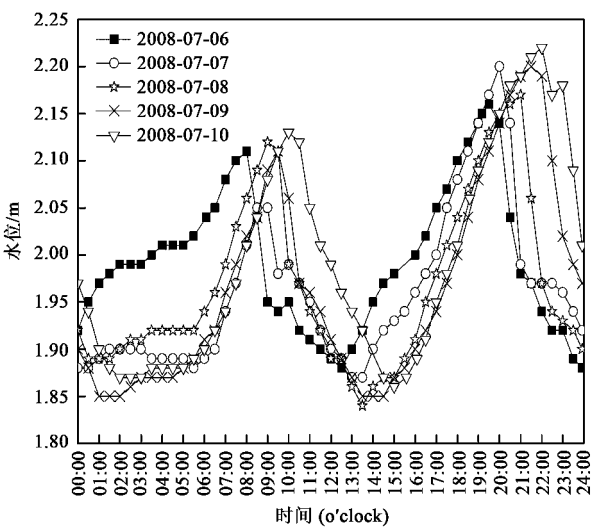

图 2　G 泵站前池水位逐时变化过程

Fig.2　Curves of water level versus time in the receiving basin of G pumping station

低于河道水位的水平,表明系统中污水通过重力流自拍潮门向外溢流,但因为水位相差较小,溢流情况应不严重.从图 5 可看出,N 系统水位随河道水位变化,水位始终高于河道水位约 0.2 m,接近拍门的水头损失.这说明污水溢流进入河道,而不存在河水流入系统的情况.

2.2　旱流水质

将 4 个泵站所有监测日各瞬时水样的污染物实测值简单平均后列于表 3,并将各污染物的浓度分布概率用箱式图表示于图 6、图 7.从图 6 可看出:TP、TN、NH_4^+-N、COD、LAS 等常规污染物在 H 泵站样

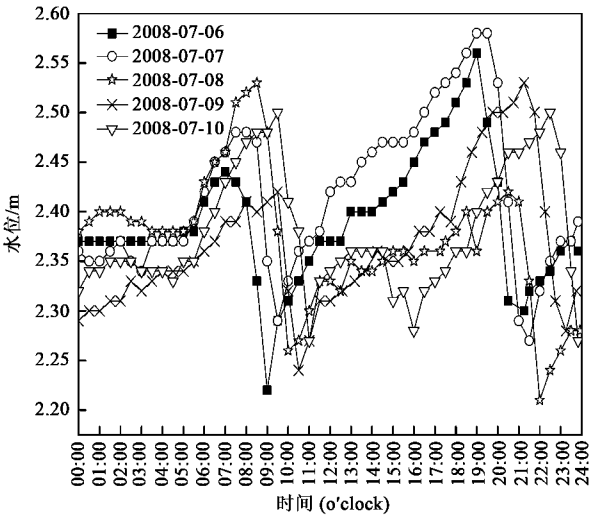

图 3 N 泵站前池水位逐时变化过程

Fig.3 Curves of water level versus time in the receiving basin of N pumping station

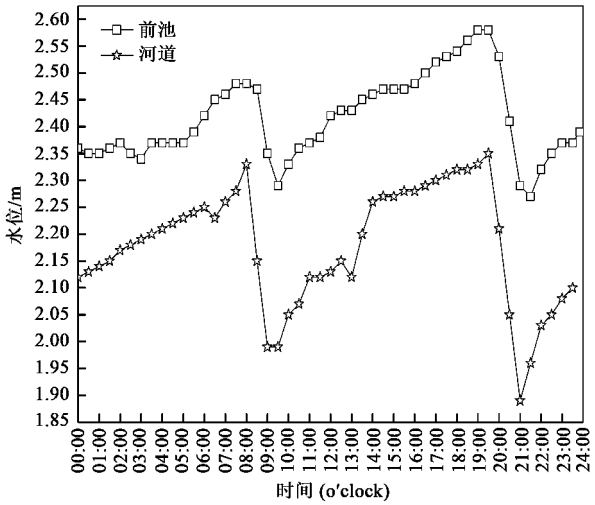

图 5 N 泵站 2008-07-07 前池与河道水位变化关系

Fig.5 Water level variation relation in the receiving basin of N pumping station and river on July 7th, 2008

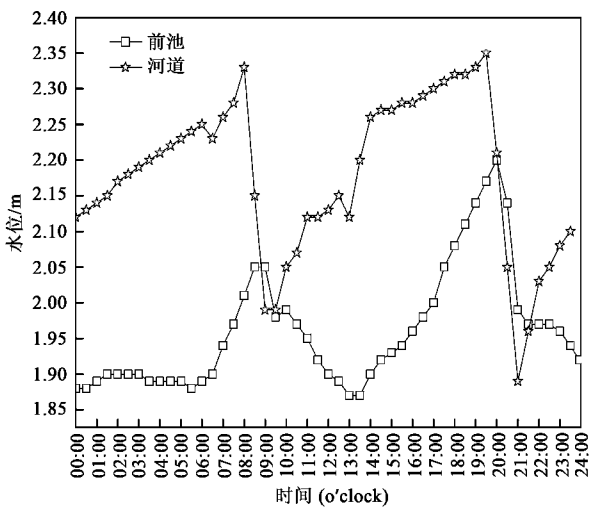

图 4 G 泵站 2008-07-07 前池与河道水位变化关系

Fig.4 Water level variation relation in the receiving basin of G pumping station and river on July 7th, 2008

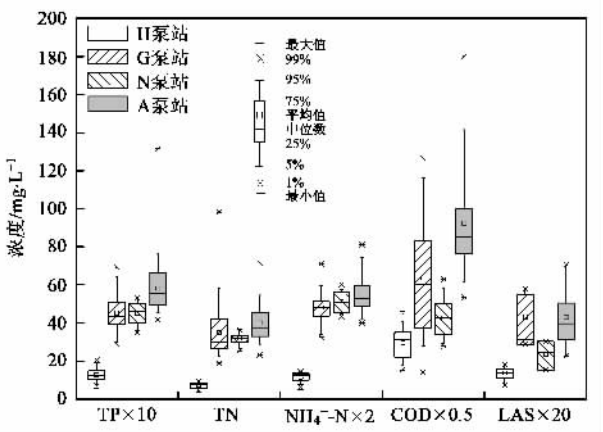

图 6 各监测泵站主要污染物浓度分布概率

Fig.6 Concentration distribution probability of major pollutants in all monitored pumping stations

品中的浓度显著小于其它泵站样品中的浓度;对于 G、N 这 2 个泵站,G 泵站的 COD、LAS 浓度显著大于 N 泵站,其余各污染物浓度水平相当,总体上 G、N 泵站的污染物浓度水平低于合流制的 A 泵站.从图 7 可看出:对于常规污染物浓度显著较低的 H 泵站,只有 Zn 的浓度明显小于 G、N、A 泵站,而 Mn、Mg、Ca 的平均浓度比其它 3 个泵站都要高,表明 H 泵站旱流污水中这 3 种金属离子的含量较高.

表 3 各监测污染物平均浓度统计

Table 3 Mean concentration statistics of all monitored pollutants

监测泵站	平均浓度/ mg·L⁻¹											
	TP	TN	NH_4^+-N	COD	LAS	Zn	Fe	Mn	Mg	Ca	Na	K
H	1.3	7.2	5.8	59	0.68	0.16	0.40	0.11	13	55	65	11
G	4.5	35	25	127	2.2	0.63	0.78	0.08	12	50	69	12
N	4.5	32	25	85	1.2	0.38	0.38	0.05	11	34	43	11
A	5.8	40	27	185	2.1	0.51	0.70	0.08	12	37	79	16

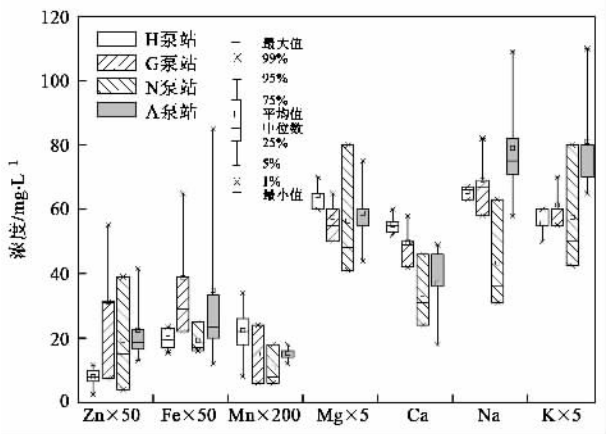

图 7　各监测泵站金属离子浓度分布概率

Fig.7　Concentration distribution probability of metals in all monitored pumping stations

各泵站服务范围都以居住区为主,其混接污水主要为生活污水.以 A 系统旱流污水中 TP、TN、NH_4^+-N、COD、LAS 这 5 种常规污染物的浓度作为生活污水中相关污染物的参照浓度,统计 H、G、N 系统相应污染物浓度与之的比值列于表 4.可以看出,H、G、N 与 A 系统旱流污水中各监测污染物浓度比值的平均值分别为 0.25、0.85、0.71,而且各污染物比值间的变差系数较小,表明混接污染的来源为一般生活污水,且 H、G、N 的旱流污水中生活污水的比例大致为 25%、85%、71%,同时,由于未考虑 A 系统可能的地下水渗入,此估算比例可能偏高.

2.3　潜在混接来源的水质调查

灰、黑水样品分析结果以及文献[12]对上海市浅层地下水水质调查的结果列于表5.可以看出,对于 TP、TN、NH_4^+-N、COD、LAS 等常规污染物,在灰水中的浓度都显著小于黑水,地下水中 TP 浓度稍高,NH_4^+-N、COD 的浓度显著小于其它 2 种污水;对常见金属离子,地下水中 Mn、Mg、Ca 的浓度显著较高,灰水中 Zn 浓度显著较高,黑水中 K 浓度显著较高.通过对各水质参数的分析比较,发现可利用 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K、Mg/K 这 3 个比值作为灰水、黑水、地下水的示踪水质参数.图 8 为这 3 个参数在灰水、黑水中的分布概率以及在地下水中的背景值,文献[12]没有将 LAS 列入浅层地下水的污染物监测对象,据此认为地下水中 LAS/NH_4^+-N的值接近于 0.从图 8 可直观地看出,LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K、Mg/K 对于灰水、黑水、地下水具有较好的区分度.表 6 为这3个参数分别在灰水、黑水、地下水中的统计平均

表 4　各监测泵站常规污染物浓度的比例关系

Table 4　Concentration ratio of general pollutants for all monitored pumping stations

比值	TP	TN	NH_4^+-N	COD	LAS	平均值	变差系数
H/A	0.22	0.18	0.21	0.32	0.32	0.25	0.24
G/A	0.78	0.87	0.88	0.69	1.05	0.85	0.14
N/A	0.78	0.80	0.93	0.46	0.57	0.71	0.24

表 5　潜在混接来源水质概况

Table 5　Water quality survey of potential illicit discharge sources

水质参数	灰水/ mg·L^{-1}			黑水/ mg·L^{-1}			地下水/ mg·L^{-1}		
	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值	均值	最小值	最大值
TP	0.71	0.56	0.96	9.1	3.2	17	1.0	0.05	8.1
TN	8.6	4.3	13	102	35	267	/[2)]	/	/
NH_4^+-N	2	0.58	4	73	20	148	1.2	0.04	47
COD	138	130	146	597	273	1062	2.9	0.6	9.1
LAS	3.1	0.63	6.8	3.5	1.1	7	/	/	/
Zn	1.1	0.78	1.3	0.6	0.54	0.65	0.18	0.025	2.4
Fe	0.4	0.36	0.45	0.62	0.55	0.66	0.60	0.05	18
Mn	<[1)]	<	<	0.01	<	0.016	0.35	0.005	8.9
Mg	10	9.5	11	16	14	16	46	5	244
Ca	53	41	65	58	55	60	105	12	418
Na	66	56	77	168	151	185	142	26	2 132
K	9.9	6.3	13	40	27	54	20.8	0.4	177

1)“ < ”表示低于检测限,Mn 的检测限为 0.001 4 mg·L^{-1};2)“ / ”表示未分析

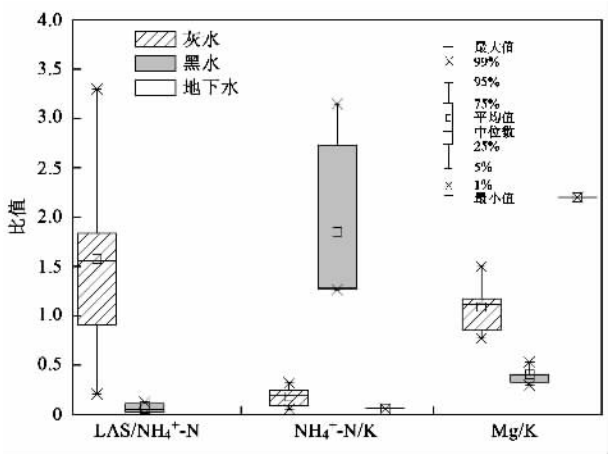

图 8 示踪水质参数的分布概率

Fig.8 Distribution probability of tracer parameters

表 6 示踪水质参数的特征值

Table 6 Characteristic value of tracer parameters

示踪水质参数	特征值		
	灰水	黑水	地下水
LAS/NH_4^+-N	1.6	0.06	0
NH_4^+-N/K	0.18	1.8	0.06
Mg/K	1.1	0.4	2.2

值,本研究将其作为在 3 类水中的特征值使用.

3 讨论

3.1 水量水质综合分析

综合分析对 3 个分流制系统旱流水量水质的调查结果,对于 H 系统,其运行水位最低,混接水量最大,地下水渗入的可能性很大,其旱流污水中 Mn、Mg、Ca 的含量较高,符合 2.3 节对浅层地下水水质特点的分析,而且根据常规污染物浓度估算的生活污水比例仅为 25%,可判断 H 系统旱流的主要来源为渗入的地下水.本课题组采用 InfoWorks CS 7.0 软件对 H 系统管道的日流量变化过程进行了模型计算,所得 H 系统的日平均混接水量为7 580 m^3/d,夜间最小流量约为 50 L/s.按混接污水夜间最小流量占日平均流量的 5%估算,H 系统的地下水渗入量约为3 940 m^3/d,占旱流日平均流量的 52%,这一估算结果也显示 H 系统旱流水量的主要来源为渗入的地下水.

G、N 系统因截流能力相对不足,均有溢流情况发生,但无河水进入系统,根据水质估算的旱流水量中生活污水的比例分别为 85%、71%,混接污水主要为生活污水.

3.2 流程图法

2.3 节的分析表明,LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K 可作为灰水、黑水的示踪水质参数,将合流制 A 系统旱流污水中 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K 两者的平均值 0.080、1.8 与图 8 对照后发现,其较符合黑水的特点,但显然其旱流中还包含其它类型的污水,因此,黑水和包含黑水的生活污水在 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K 的范围上表现出相似的特点.根据图 8 总结出灰水的特点为 LAS/NH_4^+-N > 0.2、NH_4^+-N/K < 1,包含黑水的生活污水的特点为 LAS/NH_4^+-N < 0.2、NH_4^+-N/K > 1.据此并参照文献[7]建立的上海市居住区混接来源探查流程图如图 9 所示,依据该图,H、G、N 系统旱流污水中 LAS 的平均浓度分别为 0.68、2.2、1.2 mg/L,LAS/NH_4^+-N的平均值分别为 0.12、0.090、0.045,NH_4^+-N/K 的平均值分别为 0.50、2.0、2.4,可知 G、N 系统旱流污染的主要来源都为生活污水,H 系统的主要来源不明显,可以确定不是生活污水,这与以上水量水质分析的结果基本相符.

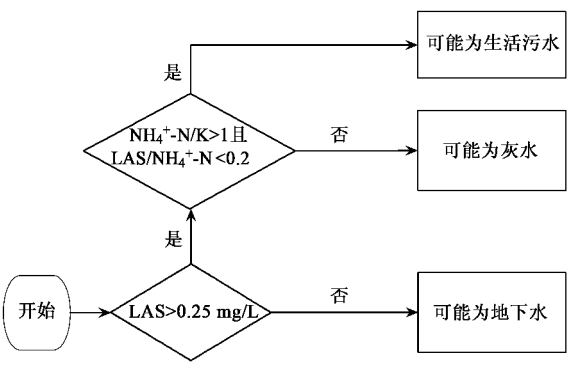

图 9 上海市居住区混接来源探查流程

Fig.9 Flow chart to identify illicit discharge sources in Shanghai residential areas

3.3 CMBM 法

由于 G、N 系统都有溢流情况发生,本研究仅使用简单求解的 CMBM 法对 H 系统进行估算.根据以上水量水质分析结果,H 系统旱流污水可能的来源为灰水、黑水和渗入地下水,表 6 提供了这 3 类水的示踪水质参数 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K、Mg/K 的特征值,H 系统旱流污水中 3 个参数的实测值分别为 0.12、0.50、1.2,据此建立的联立方程组如式(2)所示.由式(2)解出 $A_1 = 6.5\%$、$A_2 = 26\%$、$A_3 = 47\%$,可见 H 系统旱流水量以地下水为主,其次为灰水和黑水构成的生活污水,这与以上水量水质分析的结果基本相符.由于实验条件以及时间的限制,本研究对潜在混接来源水质调查的数据尚不够充分,因此

H 系统水量来源的计算结果之和 < 100%.今后应继续开展相关的研究,逐步积累数据,为确定潜在混接来源的水质分类标准提供充足的背景资料.

$$\begin{cases} LAS/NH_4^+\text{-}N: A_1 \times 1.6 + A_2 \times 0.06 + A_3 \times 0 = 0.12 \\ NH_4^+\text{-}N/K: A_1 \times 0.18 + A_2 \times 1.8 + A_3 \times 0.06 = 0.50 \\ Mg/K: A_1 \times 1.1 + A_2 \times 0.4 + A_3 \times 2.2 = 1.2 \end{cases} \quad (2)$$

4　结论

(1) 本研究对上海市不同混接程度的 3 个分流制雨水系统 H、G、N 和 1 个典型合流制系统 A 进行的旱流水量调查、水质监测结果表明:H、G、N、A 系统单位面积的截流水量分别为3 610、1 550、2 970和 12 460 $m^3/(km^2 \cdot d)$;根据 TP、TN、NH_4^+-N、COD、LAS 等主要污染物浓度估算的 H、G、N 系统中生活污水混入比例分别为 25%、85%、71%,其中 H 系统以地下水渗入为主,旱流污染程度较轻,G、N 系统都以生活污水混入为主,旱流污染较为严重.

(2) 本研究对灰水、黑水的水质特征进行初步探索,结合文献对地下水水质特征的调查结果,提出以 LAS/NH_4^+-N、NH_4^+-N/K、Mg/K 这 3 个参数作为灰水、黑水和地下水的示踪水质参数,并总结出灰水的特点为 LAS/NH_4^+-N > 0.2、NH_4^+-N/K < 1,包含黑水的生活污水的特点为 LAS/NH_4^+-N < 0.2、NH_4^+-N/K > 1.根据由此建立的上海市居住区混接来源探查流程图对 H、G、N 系统旱流污染来源进行了分析,以及使用 CMBM 法对 H 系统旱流污水组成进行了验算,得出的结果与水量水质分析的结果基本相符,这 2 种方法可为今后分流制雨水系统旱流污染来源的初步判断提供借鉴.

(3) 在国内目前的条件下,本研究提出的对旱流水量水质进行综合分析的方法可为类似分流制雨水系统旱流水量及污染负荷来源的分析诊断提供参考.今后应加强对各种混接来源水质的调查,建立完善水质特征数据库,为总体把握旱流水量水质概况以及雨水系统旱流溯源提供可靠的工具.

参考文献:

[1] 唐鸿亮.雨污兼合的排水系统体制探讨[J].给水排水,2005,**31**(3):45-50.

[2] 汪常青.武汉市城市排水体制探讨[J].中国给水排水,2006,**22**(8):12-15.

[3] 张厚强,尹海龙,金伟,等.分流制雨水系统混接问题的调研技术体系[J].中国给水排水,2008,**24**(14):95-98.

[4] US EPA. Storm water phase Ⅱ final rule: illicit discharge detection and elimination minimum control measure[R]. Washington DC: US EPA Office of Water, 2005.

[5] US EPA. Investigation of inappropriate pollutant entries into storm drainage systems: a user's guide[R]. Washington DC: US EPA Office of Water, 1993.

[6] US EPA. Methods for detection of inappropriate discharges to storm drainage systems: background literature and summary of findings[R]. Washington DC: US EPA Office of Water and Wastewater, 2001.

[7] Pitt R. Illicit discharge detection and elimination: a guidance manual for program development and technical assessments[R]. Washington DC: US EPA Office of Water and Wastewater, 2004.

[8] Field R, Pitt R, Laior M, *et al*. Investigation of dry-weather pollutant entries into storm drainage systems[J]. Environmental Engineering, 1994, **120**(5): 1044-1066.

[9] Jurisdictional Urban Runoff Management Program. Illicit connection/illegal discharge (IC/ID) detection and elimination model program guidance[R]. San Diego Stormwater Copermittees, 2001.

[10] Chaturvedula S. Watershed investigation for the identification of sources of inappropriate discharges to the cribbs mill creek[D]. Alabama: University of Alabama, 2004.

[11] Karri V. Source Verification of inappropriate discharges to storm drainage systems[D]. Alabama: University of Alabama, 2003.

[12] 夏晨,李金柱,何中发.上海市浅层地下水环境地球化学背景值研究[J].上海地质,2006,**1**:24-28.

[13] 国家环境保护局.水和废水监测分析方法[M].(第三版).北京:中国环境科学出版社,1989.

[14] 李田,周永潮,李贺,等.基于流量调查的分流制雨水系统诊断研究[J].中国给水排水,2007,**23**(7):1-5.