

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021110204

张海清, 李豪, 孙涛, 等. 多参数人口模型的建立及其在精神活性物质评估中的应用[J]. 环境化学, 2023, 42(4): 1156-1164.

ZHANG Haiqing, LI Hao, SUN Tao, et al. Establishment of multi-parameter population model and its application in assessment of psychoactive substances[J]. Environmental Chemistry, 2023, 42 (4): 1156-1164.

多参数人口模型的建立及其在精神活性物质评估中的应用*

张海清¹ 李豪¹ 孙涛² 刘和平³ 李先国¹ 张大海^{1**}

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛, 266000; 2. 莱阳市公安局, 烟台, 264000; 3. 山东省公安厅禁毒总队, 济南, 250000)

摘要 精神活性物质对人类中枢神经系统具有强烈兴奋或抑制作用, 其滥用已经成为全球广泛关注的社会问题. 我国传统精神活性物质以甲基苯丙胺和海洛因为主, 两者滥用及流行率的准确评估对控制和监管滥用情况具有重大意义. 本文对2019年和2020年我国西北部某城市主城区及县(市、区)的8个污水处理厂样品进行检测, 使用层次分析法对设计容量法、水质参数法、生物标志物法以及人均用水量法的权重系数进行赋值, 建立了多参数人口模型, 并用于该市甲基苯丙胺及海洛因人均滥用及流行率的评估. 结果显示, 所有样品均检出甲基苯丙胺和吗啡, 其中2019年甲基苯丙胺和海洛因人均滥用量分别为 $(112.60 \pm 25.20) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(31.70 \pm 10.93) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 流行率分别为 $(0.49 \pm 0.17)\%$ 和 $(0.43 \pm 0.10)\%$; 2020年甲基苯丙胺和海洛因人均滥用量分别为 $(92.81 \pm 28.41) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(25.65 \pm 11.42) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, 流行率分别为 $(0.34 \pm 0.11)\%$ 和 $(0.41 \pm 0.18)\%$. 两种精神活性物质的人均滥用及流行率整体都有所减小, 疫情防控措施对精神活性物质的滥用产生了遏制作用, 同时不同地区精神活性物质滥用与经济发展程度有关.

关键词 多参数人口模型, 精神活性物质, 滥用, 流行率.

Establishment of multi-parameter population model and its application in assessment of psychoactive substances

ZHANG Haiqing¹ LI Hao¹ SUN Tao² LIU Heping³
LI Xianguo¹ ZHANG Dahai^{1**}

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266000, China; 2. Laiyang Public Security Bureau, Yantai, 264000, China; 3. Anti-Narcotics Unit of Shandong Province Public Security Department, Jinan, 250000, China)

Abstract Psychoactive substances have strong excitement or inhibition on human central nervous system. Their abuse has become a social problem of global concern. Methamphetamine and heroin are the main traditional psychoactive substances in China. Accurate assessment of their abuse and prevalence rate is of great significance to control and regulate abuse. In this paper, the samples of eight sewage treatment plants in the main urban areas and counties (cities and districts) of a city in northwest China in 2019 and 2020 were tested. The weight coefficients of design capacity method, water quality parameter method, biomarker method and per capita water consumption method were assigned by analytic hierarchy process. Then a multi-parameter population model was established to evaluate the per capita abuse and prevalence of methamphetamine and heroin in the city. The results showed that methamphetamine and morphine were detected in all samples. In 2019, the per capita

2021年11月2日收稿(Received: November 2, 2021).

* 山东省公安厅禁毒总队污水检测项目(20200366)资助.

Supported by the Sewage Detection Project of Shandong Provincial Public Security Anti-drug Corps (20200366).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 15963249389, E-mail: dahaizhang@ouc.edu.cn

abuse of methamphetamine and heroin was $(112.60 \pm 25.20) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ and $(31.70 \pm 10.93) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, and the prevalence rates were $(0.49 \pm 0.17)\%$ and $(0.43 \pm 0.10)\%$, respectively. The per capita abuse of methamphetamine and heroin in 2020 was $(92.81 \pm 28.41) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ and $(25.65 \pm 11.42) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, and the prevalence rates were $(0.34 \pm 0.11)\%$ and $(0.41 \pm 0.18)\%$ respectively. The per capita abuse and prevalence of the two psychoactive substances decreased, and the epidemic prevention and control measures had a restraining effect on the abuse of psychoactive substances. At the same time, the abuse of psychoactive substances in different regions was related to the degree of economic development.

Keywords multi-parameter population model, psychoactive substances, consumption, prevalence.

精神活性物质是指对人类中枢神经系统具有强烈兴奋或抑制作用的成瘾性物质, 主要包括: 阿片类, 可卡因、海洛因和美沙酮等; 安非他命类, 苯丙胺、甲基苯丙胺和摇头丸等; 大麻类, 大麻酚和四氢大麻酚等^[1]。《2021 年世界毒品形势报告》显示, 全球超过约 2.75 亿(15—64 岁)人口, 在过去一年中至少使用过一次精神活性物质, 比 2010 年增加 22%, 每年约 50 万人直接死于精神活性物质的滥用^[2], 精神活性物质的滥用已经成为全球关注的问题。精神活性物质进入人体后, 经过肌体的新陈代谢, 以药物母体及其代谢产物的形式排出体外, 经由下水道进入污水处理系统。Christian^[3] 在 2001 年首次提出, 通过检测市政污水中目标物质的浓度与人体药物代谢动力学相结合, 可以反推评估该地区精神活性物质的滥用情况及流行率。目前对市政污水中低浓度精神活性物质定性定量检测的主流方法为液相色谱质谱联用法^[4] 及气相色谱质谱联用法^[5]。美国^[6-7]、意大利^[8]、西班牙^[9]、澳大利亚^[10] 等多个国家已经利用 Christian 提出的方法开展了多种精神活性物质滥用情况的调查研究。

目标覆盖区域的服务人口数是利用精神活性物质滥用情况反推其滥用用量及流行率过程中一个非常重要的参数, 其数值的合理性和准确程度极大影响着推算结果的准确度。目前, 目标覆盖区域服务人口数的推算方法主要有静态法和动态法, 静态法有设计容量法和人口普查法等; 动态法有水质参数法, 常用的水质参数包括氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、化学需氧量(COD)和总氮(TN)等^[11], 生物标志物法, 常用的生物标志物包括可替宁、肌酸酐和咖啡因等^[12]。其中设计容量法更偏向污水处理厂初建时设计的服务人口数, 水质参数法和人均用水量法受工业污水占比影响较大, 生物标志物法会受到年龄和身体状况等参数的影响, 造成吸收和代谢的比例不一致。每种推算方法都有自身的特点和局限性, 会给调查结果带来不确定性。因此, 服务人口数的估算直接影响目标物滥用用量和流行率的反演推算结果。

本研究使用层次分析法, 综合多种目标覆盖区域服务人口数的估算方法, 建立多参数人口模型, 以此获得更为准确的服务人口数, 并应用于精神活性物质滥用用量和流行率的评估。

1 材料与方法(Materials and methods)

1.1 实验材料

实验试剂与耗材: 甲基苯丙胺(METH)、苯丙胺(AMP)、吗啡(MOR)、O⁶ 乙酰吗啡(6MAM)、可替宁(CTN) ($1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$, 美国 Cerilliant 公司); 甲基苯丙胺- d_8 (METH- d_8)、苯丙胺- d_8 (AMP- d_8)、吗啡- d_3 (MOR- d_3)、O⁶ 乙酰吗啡- d_3 (6MAM- d_3)、可替宁- d_3 (CTN- d_3) ($100 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$, 美国 Cerilliant 公司); 甲醇、二氯甲烷、氨水(色谱纯, 上海安谱实验科技股份有限公司); 盐酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)、MCX 固相萃取柱(3mL, 60 mg, 美国 Waters 公司), 玻璃纤维滤膜($0.45 \mu\text{m}$, Whatman GF/F);

实验设备: Thermo Scientific TSQ Endura 型高效液相色谱质谱仪(美国 Thermo Scientific 公司), WD-12 型氮吹仪(杭州奥盛仪器有限公司), 12 孔配真空抽干装置固相萃取仪(美国 Supelco 公司), XW-80A 型旋涡混合器(上海精科实业有限公司)。

1.2 样品采集

样品采集于我国西北部某城市主城区污水处理厂(S1、S2、S3、S4)和县(市、区)污水处理厂(X1、

X2、X3、X4), 以上 8 个污水处理厂基本覆盖该市所有行政区, 覆盖人口数约占全市人口总数的 89%。使用自动取样器于 2019 年冬季和 2020 年夏季, 在污水处理厂进水口采集 24 h 混合水样约 400 mL, 样品连续采集一周。精神活性物质的吸食频率存在一定的周期性, 连续采集样品一周基本能反映一个地区精神活性物质的滥用情况。样品采集后存放于聚酯(PET)瓶内, 加盐酸调节 pH≤2, 冷冻运输至实验室, 待后续分析。

1.3 样品前处理

样品在常温下解冻, 经 0.45 μm 的玻璃纤维滤膜过滤, 振荡混合均匀, 量取 50 mL 滤液并添加氘代内标为待测样, 固相萃取富集目标物: 分别用甲醇、超纯水和 pH 2 的盐酸水溶液充分活化并平衡固相萃取柱, 固相萃取待测样, 样品流速控制在每滴 1—2 s。富集完成后真空干燥固相萃取柱, 依次用甲醇和 5% 氨水/甲醇溶液(M/M)淋洗洗脱并收集洗脱液。洗脱液在柔和氮气吹至近干后用 20%(V/V)甲醇水复溶, 转移至色谱瓶进行二次氮吹, 最后用 200 μL 20%(V/V)甲醇水溶液定容。

1.4 样品分析

使用 Thermo Scientific TSQ Endura 型高效液相色谱-质谱联用仪进行分析。色谱条件为: Waters XTerra MS C18 反相色谱柱(100 mm×2.1 mm, 3.5 μm), 流动相 A 为 0.12% 甲酸和 30 mmol·L⁻¹ 甲酸铵水溶液, B 相为甲醇, 流速 0.3 mL·min⁻¹, 柱温 30℃, 进样量 5 μL。质谱选用电喷雾离子源(ESI), 采用 ESI(+)模式。目标物特征选择离子、质谱条件及回收率如表 1 所示。

表 1 目标物特征选择离子、质谱条件及回收率

Table 1 Target feature selection ions, mass spectrometry conditions and recovery rate

物质 Compound	母离子 Parent ion m/z	定量离子 Quantitative ion			定性离子 Qualitative ion			保留时间/min Retention time	回收率/% Recovery rate
		m/z	DP/V	CE/V	m/z	DP/V	CE/V		
MOR	286.0	152.1	82.0	55.0	165.0	82.0	32.0	2.73	88.45±5.22
MOR-d ₃	289.2	152.1	80.0	55.0	165.0	80.0	41.0	2.72	—
6MAM	328.1	165.3	90.0	36.0	211.3	90.0	36.0	4.35	84.61±3.40
6MAM-d ₃	331.1	165.1	90.0	38.3	211.2	90.0	25.0	4.36	—
METH	150.1	91.1	30.0	16.0	119.1	30.0	16.0	4.62	101.65±4.95
METH-d ₈	158.2	93.2	40.0	19.0	124.2	40.0	10.3	4.59	—
AMP	136.1	91.1	40.0	21.0	119.1	40.0	21.0	4.51	99.00±4.90
AMP-d ₈	144.2	127.2	40.0	10.3	97.2	40.0	16.0	4.44	—
CTN	177.2	80.2	30.0	24.0	101.2	30.0	11.0	3.09	98.31±4.78
CTN-d ₃	180.1	80.2	30.0	25.0	101.2	30.0	22.4	3.08	—

1.5 质量控制

配制浓度分别为: 1.56、3.13、6.25、12.50、25.00、50.00、100.00、150.00、200.00、250.00、300.00 μg·L⁻¹ 的混合标准溶液, 绘制标准曲线, 线性良好($R^2 \geq 0.999$)。

为确定目标物回收率在合理范围内, 每 12 个样品添加一组浓度为 100.00 μg·L⁻¹ 的混合标准溶液为质控样品, 结果显示目标物的回收率均在 85%—105% 之间。同时每 12 个样品添一组空白实验。

1.6 计算方法

利用水质参数法、生物标志物法和人均用水量法计算服务人口数, 具体计算方法如式所示:

$$P_T = \frac{C_T \times F}{m_T} \quad (1)$$

式(1)中, P_T 是通过水质参数 T 计算后得到的服务人口数(万人); C_T 为水质参数 T 的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); m_T 是水质参数 T 的人均产生量($\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$); F 为污水处理厂日均处理量($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)。

本文选用的水质参数 T 为氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$), 由于地区、生活习惯、年龄和性别比例的不同, 人均排放量的比例亦不相同, 结合文献调查结果^[13-14] 和该市具体情况, 人均排放量 m_T 取值为 $10 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

$$P_S = \frac{C_S \times F}{m_S} \quad (2)$$

式(2)中, P_S 是通过生物标志物 S 计算后得到的服务人口数(万人); C_S 为生物标志物 S 的浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); m_S 是生物标志物的日产生量($\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$); F 为污水处理厂日均处理量($10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$).

本文选用的生物标志物为可替宁, 根据该市的烟草消耗、尼古丁含量及其在人体内代谢比例, 运用水晶球软件模拟得到该市人均可替宁日产生量为 $1.47 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$.

$$P_Q = \frac{Q}{10^{-3}\bar{Q}} \quad (3)$$

式(3)中, P_Q 是通过人均用水量法计算得到的服务人口数(万人); Q 为污水处理厂日均处理污水量($10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); \bar{Q} 为该市人均用水量($\text{L}\cdot\text{d}^{-1}$).

该市 2019 年水资源利用公报显示, 城镇居民和农村居民人均用水量分别为 $123 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $52.9 \text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$.

检验层次分析法建立模型的合理性与可靠性, 需要对判断矩阵一致性进行检验, 公式为:

$$\text{C.I.} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\text{C.R.} = \frac{\text{C.I.}}{\text{R.I.}} \quad (5)$$

式(4)和(5)中, C.I. 为计算一致性指标; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为矩阵阶数; R.I. 是判断矩阵特征值的算术平均数, 当 $n=4$ 时取值 0.90; C.R. 为计算一致性比例.

精神活性物质濫用量及流行率的具体计算公式如下:

$$C_{i,1} = \frac{C_{i,2} \times M_{i,1}}{E \times M_{i,2}} \quad (6)$$

式(6)中, $C_{i,1}$ 是精神活性物的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); $C_{i,2}$ 是精神活性物质标志物的浓度($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); $M_{i,1}$ 和 $M_{i,2}$ 分别是精神活性物及其标志物的分子量; E 是精神活性物质标志物的代谢率, 甲基苯丙胺的生物标志物为母体, 代谢率为 42%, 海洛因的生物标志物为吗啡, 代谢率为 77%^[15].

$$m_i = \frac{C_{i,1} \times F'}{P} \quad (7)$$

式(7)中, m_i 是精神活性物质的人均濫用量($\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$); $C_{i,1}$ 是精神活性物的浓度($10^{-3} \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$); F' 是污水处理厂进水流量($10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$); P 是服务人口数(万人).

$$\text{PR}(\%) = \frac{m_i}{R_{18-60} \times D \times n} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中, PR 为特定时间内, 使用某种精神活性物质的人群数量占 18—60 岁总人数数量的比例; R_{18-60} 是该市居民中 18—60 岁的成年人口比例, 经调查该市居民 18—60 岁成年人口的比例为 62.4%; D 是精神活性物质使用的典型剂量大小($\text{mg}\cdot\text{次}^{-1}$), n 是每天的平均使用频率($\text{次}\cdot\text{d}^{-1}$).

Bao 等^[16] 研究发现, 甲基苯丙胺的典型剂量为 $(135 \pm 80) \text{ mg}\cdot\text{次}^{-1}$, 平均使用频率为 $0.31 \text{ 次}\cdot\text{d}^{-1}$; 陈小波, 乔静等^[17-18] 研究发现, 海洛因的典型剂量为 $44 \text{ mg}\cdot\text{次}^{-1}$, 平均使用频率为 $2.40 \text{ 次}\cdot\text{d}^{-1}$.

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 污水处理厂服务人口数计算模型

计算所需相关参数大小如表 2 所示. 通过各方法获得的污水处理厂服务人口数, 相关数据如表 3 所示.

专家估算人口是以该市统计年鉴人口数为基础, 结合污水处理厂日内污水流量波动、日间污水处理量波动和污水来源组成等因素综合推算得到的污水处理厂服务人口数. Castiglioni 等^[19] 认为专家估算人口是最可靠的服务人口数的估算方法, 因此以专家估算人口数为标准判断各方法推算服务人口数的准确度. 但是该方法耗时耗力且经济成本较高. 设计容量法是一种较为方便和简单获得服务人口数

的方法,但是设计容量法获得的人口数更偏向污水处理厂初建设的服务人口数,获得的服务人口数往往高于实际人口数.但也存在一些污水处理厂满负荷运行,甚至高于污水处理厂初建设的服务人口数,如 S1.而通过水质参数法推算的服务人口数,会受到工业污水的影响,导致主城区服务人口数偏高.主要是因为主城区 4 个污水处理厂的工业污水业占比较高,导致氨氮数据偏高,从而影响服务人口数的估算.生物标志物法推算的服务人口数也会与真实服务人口数有所差异,这是因为可替宁是尼古丁通过细胞色素 P450(CYP)亚型 2A6 介导产生的代谢物^[20],年龄和身体状况的差异,会导致尼古丁代谢为可替宁的比例不同.人均用水量法推算得到的服务人口数明显偏高,主要原因有两个方面,一是污水处理厂的人均用水量数据比实际值高;二是污水处理厂的工业污水占比比登记值高,从而导致推算结果的偏高.

表 2 各方法相关参数

Table 2 Correlation parameters of each method

污水处理厂 Sewage treatment plant	日处理污水量/万t Daily amount of sewage treated	NH ₄ -N/(mg·L ⁻¹)	可替宁/(μg·L ⁻¹) Cotinine concentration
S1	7.50	67.50	5.88
S2	15.00	60.72	5.29
S3	7.50	49.98	6.21
S4	5.50	49.57	6.07
X1	1.00	107.93	8.05
X2	0.50	30.97	4.46
X3	0.30	50.45	6.34
X4	2.00	28.39	4.14

表 3 污水处理厂服务人口数(万人)

Table 3 Population served by sewage treatment plant (ten thousand people)

污水处理厂 Sewage treatment plant	专家估算人口 Expert estimates of population	设计容量法 Design capacity method	水质参数法 Water quality parameter method	生物标志物法 Biomarker method	人均用水量法 Per capita water consumption	多参数模型法 Multi-parameter model method
S1	41.1	30.0	50.6	30	48.8	37.2
S2	52.1	70.0	91.1	54	85.4	68.1
S3	40.7	50.0	37.5	32	42.7	36.3
S4	22.0	27.0	27.3	23	44.7	27.2
X1	4.70	6.00	11.0	5.5	15.3	8.08
X2	2.00	2.30	1.50	1.5	4.80	2.00
X3	1.54	3.00	1.50	1.3	4.00	1.85
X4	5.72	8.00	5.70	5.6	30.7	9.10

由此可见,使用不同方法推算污水处理厂的服务人口数会得到不同的数据,每种方法都有其自身的特点和局限性,为减小单个计算方法带来的不确定性,本文使用层次分析法对不同参数所占的权重进行计算,建立污水处理厂服务人口数多参数计算模型.

在层次分析中,以可替宁计算得到的服务人口数为基础,其他方法推算的服务人口数与可替宁推算人口的相关系数矩阵(表 4)作为依据,使用 1—9 标度法对重要性进行对比打分,将服务人口数相关系数矩阵转为服务人口数判断矩阵(表 5),对不同方法的权重进行赋值.

计算得到的多参数人口模型公式为:

$$P = 0.09 \times P_{\text{设计容量法}} + 0.23 \times P_{\text{水质参数法}} + 0.55 \times P_{\text{生物标志物法}} + 0.13 \times P_{\text{人均用水量法}} \quad (9)$$

对矩阵的一致性进行检验,得到 C.R.为 0.078<0.1,认为矩阵的一致性是可以接受的.

表 4 服务人口数相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of service population

	设计容量人口 Design capacity population	水质参数法 Water quality parameter method	生物标志物法 Biomarker method	人均用水量法 Per capita water consumption
设计容量人口	1	0.55	0.43	0.83
水质参数法		1	0.53	0.77
生物标志物法			1	0.57
人均用水量法				1

表 5 服务人口数判断矩阵

Table 5 Judgment matrix of service population

	设计容量人口 Design capacity population	水质参数法 Water quality parameter method	生物标志物法 Biomarker method	人均用水量法 Per capita water consumption
设计容量人口	1	1/4	1/5	1
水质参数法	4	1	1/4	2
生物标志物法	5	4	1	3
人均用水量法	1	1/2	1/3	1

各方法计算得到的服务人口数与专家估算服务人口数相关性分析如图 1 所示。相关性分析中, 设计容量法的 $R^2=0.9037$, 水质参数法的 $R^2=0.8850$, 生物标志物法的 $R^2=0.9238$, 人均用水量法的 $R^2=0.8238$, 多参数模型法的 $R^2=0.9472$, 其中多参数模型法得到的服务人口数与专家估算的服务人口数相关性最强, 更能够准确反映服务人口数。

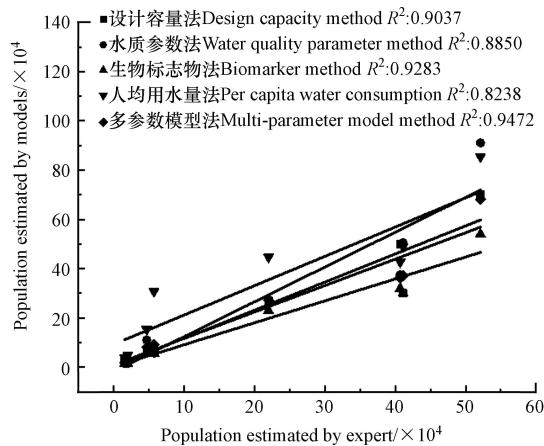


图 1 各方法相关性分析

Fig.1 Correlation analysis of different methods

2.2 全市精神活性物滥用情况

该市 2019 和 2020 年甲基苯丙胺和海洛因人均滥用量如图 2 所示。在 2019 年和 2020 年两次精神活性物质滥用调查中, 每个样品均检出甲基苯丙胺和吗啡, 甲基苯丙胺的人均滥用量分别为 $(112.60 \pm 25.20) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(92.81 \pm 28.41) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$; 海洛因的人均滥用量分别为 $(31.70 \pm 10.93) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $(25.65 \pm 11.42) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。以《2019 年中国毒品形势报告》、《2020 年中国毒情形势报告》和该市公安部门提供的吸食精神活性物质信息为基础, 从图 2 可以看出, 该市主要吸食的传统精神活性物质为甲基苯丙胺, 这也与《2020 年中国毒情形势报告》相一致, 同时该地区海洛因滥用水平低于全国滥用水平^[21-22]。与 2019 年相比, 2020 年精神活性物质滥用量有所减小。我国传统精神活性物质以甲基苯丙胺和海洛因为主, 因此精神活性物质总滥用量多采用两种物质加和的形式^[21-22], 该市精神活性物质总滥用情况为 2019 年 $(144.30 \pm 30.56) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 2020 年 $(118.46 \pm 37.34) \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。这与该市公安部门自 2019 年起加强对精神活性物质制造、贩售和吸食等行为的打击力度有着密不可分的关系。同时考虑到我国有近 85% 的毒品来源于长三角、金新月和北美等境外地区, 2020 年新冠疫情致使国内涉毒行为和境外流动受限也

是导致精神活性物质滥用下降的一个原因. 对该市八个主城区及县(市、区)的精神活性物质滥用调查发现该市 S2 和 S3 的 AMP/METH 比值高于苯丙胺全部由甲基苯丙胺代谢的理论比值 0.05—0.24^[23](S2 比值为 0.99±0.17, S3 比值为 0.83±0.19), 说明这两个地区苯丙胺存在其他来源. 我国临床禁止使用苯丙胺类药物, 因此可以推断这两个地区存在苯丙胺的滥用. 同时该市的滥用量均小于北京、广州和大连等地^[24-26], 主城区高于县(市、区), 说明精神活性物质的滥用情况与经济发展程度有关. 这也与 Bishop 等^[27] 对小城市和农村精神活性物质的滥用量调查结果相一致, 城市化水平和经济发展程度更高以及富裕人口更多的小城市, 精神活性物质的滥用量高于农村精神活性物质的滥用量. 经济的迅速发展导致人们生活节奏变快, 在心理上, 人们往往会选择吸食精神活性物质来释放压力, 从而使得经济条件发达的地区精神活性物质的滥用情况更严重.

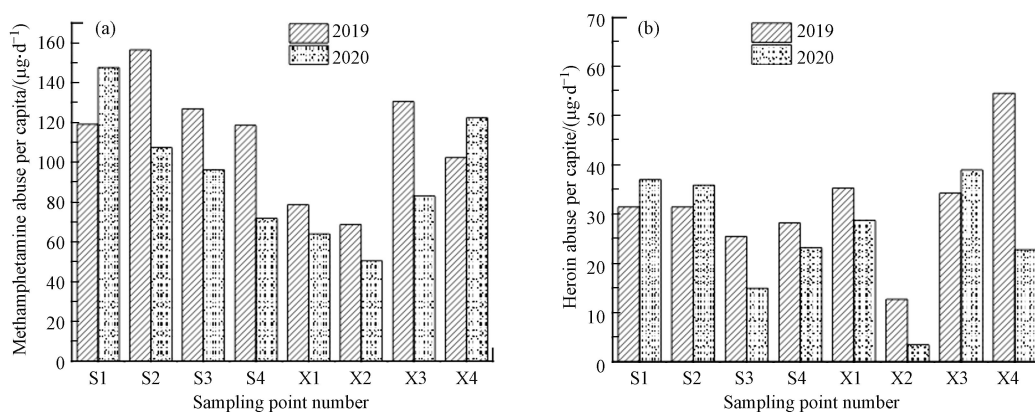


图2 目标区域甲基苯丙胺(a)和海洛因(b)人均滥用量

Fig.2 Methamphetamine (a) and heroin (b) abuse per capita in target areas

2.3 全市精神活性物质流行率

该市 2019 和 2020 年精神活性物质流行率, 如表 6 所示. 该市 2019 和 2020 年甲基苯丙胺的流行率分别为 0.49%±0.17% 和 0.34%±0.11%, 2019 和 2020 年海洛因的流行率分别为 0.48‰±0.17‰ 和 0.39‰±0.18‰. 该市 18—60 岁成年人甲基苯丙胺的流行率在 Shao 等^[28] 调查的全国 15—65 岁成年人甲基苯丙胺流行率 0.08%—1.25% 范围内, 低于 Pei 等^[29] 对北京甲基苯丙胺流行率的估算. 海洛因流行率低于 Du 等^[26] 调查的全国主要城市海洛因的平均流行率 1.01‰. 甲基苯丙胺的流行率与海洛因的流行率相比处于较高水平, 这也与近年来甲基苯丙胺缉获量远高于海洛因缉获量这一事实相符合. 造成以上现象的主要原因是甲基苯丙胺在中国更容易获得, 其合成几乎不受地理位置的限制, 从而导致甲基苯丙胺的流行率在某种程度上远高于海洛因的流行率.

表 6 精神活性物质流行率

Table 6 Epidemic rate of psychoactive substances

污水处理厂 Sewage treatment plant	2019年		2020年	
	METH流行率/% Prevalence rate	MOR流行率/‰ Prevalence rate	METH流行率/% Prevalence rate	MOR流行率/‰ Prevalence rate
S1	0.46	0.48	0.57	0.56
S2	0.60	0.48	0.41	0.55
S3	0.49	0.39	0.37	0.23
S4	0.45	0.43	0.28	0.35
X1	0.30	0.54	0.24	0.44
X2	0.26	0.19	0.19	0.05
X3	0.50	0.52	0.32	0.60
X4	0.83	0.83	0.35	0.35

3 结论(Conclusion)

利用设计容量法、水质参数法、生物标志物法和人均用水量法对污水处理厂的服务人口数进行推算,使用层次分析法对权重进行赋值,建立了更合理的污水处理厂服务人口数估算模型,同时评估了2019和2020年该市精神活性物质的濫用量和流行率.结果显示,该市2019和2020年甲基苯丙胺的人均濫用量为 $(112.60\pm 25.20)\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $(92.81\pm 28.41)\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,流行率为 $0.49\%\pm 0.17\%$ 和 $0.34\%\pm 0.11\%$;海洛因的人均濫用量 $(31.70\pm 10.93)\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $(25.65\pm 11.42)\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$,流行率为 $0.43\%\pm 0.10\%$ 和 $0.41\%\pm 0.18\%$.该市2020年较2019年精神活性物质的濫用量有所下降,不仅是因为公安机关加大了对毒品制造、贩卖、吸食的打击力度,也是新冠疫情防控措施导致毒品的流通受阻所带来的结果,同时经济发展水平在一定程度上也影响了精神活性物质的濫用程度.

参考文献 (References)

- [1] 杜娟. 污水流行病学方法调查尼古丁消费量研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
DU J. Using sewage epidemiology to investigate the consumption of nicotine[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017(in Chinese).
- [2] UNODC. World drug report 2021 [EB/OL]. [2021-10-31]. <https://www.unodc.org/unodc/en/data-and-analysis/wdr2021.html>
- [3] DAUGHTON C G. Environmental stewardship and drugs as pollutants [J]. *The Lancet*, 2002, 360(9339): 1035-1036.
- [4] FOPPE K S, HAMMOND-WEINBERGER D R, SUBEDI B. Estimation of the consumption of illicit drugs during special events in two communities in Western Kentucky, USA using sewage epidemiology [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 249-256.
- [5] 袁媛, 漆寿元, 公维民, 等. 新冠肺炎疫情防控对城市毒品濫用的影响 [J]. 环境化学, 2021, 40(4): 1187-1192.
YUAN Y, QI S Y, GONG W M, et al. Wastewater-based epidemiology studies of drug abuse in Donggang during COVID-19 [J]. *Environmental Chemistry*, 2021, 40(4): 1187-1192 (in Chinese).
- [6] SKEES A J, FOPPE K S, LOGANATHAN B, et al. Contamination profiles, mass loadings, and sewage epidemiology of neuropsychiatric and illicit drugs in wastewater and river waters from a community in the Midwestern United States [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1457-1464.
- [7] GUSHGARI A J, VENKATESAN A K, CHEN J, et al. Long-term tracking of opioid consumption in two United States cities using wastewater-based epidemiology approach [J]. *Water Research*, 2019, 161: 171-180.
- [8] ZUCCATO E, CASTIGLIONI S, SENTA I, et al. Population surveys compared with wastewater analysis for monitoring illicit drug consumption in Italy in 2010-2014 [J]. *Drug and Alcohol Dependence*, 2016, 161: 178-188.
- [9] BIJLSMA L, PICÓ Y, ANDREU V, et al. The embodiment of wastewater data for the estimation of illicit drug consumption in Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 772: 144794.
- [10] BADE R, WHITE J M, NGUYEN L, et al. Determining changes in new psychoactive substance use in Australia by wastewater analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 731: 139209.
- [11] ZHENG Q D, LIN J G, PEI W, et al. Estimating nicotine consumption in eight cities using sewage epidemiology based on ammonia nitrogen equivalent population [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 226-232.
- [12] DAUGHTON C G. Real-time estimation of small-area populations with human biomarkers in sewage [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414: 6-21.
- [13] 朱环, 李怀正, 叶建锋, 等. 上海市居民生活用水主要污染物产生系数的研究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 37-41.
ZHU H, LI H Z, YE J F, et al. Coefficients of major pollutants in domestic sewage in Shanghai [J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(1): 37-41 (in Chinese).
- [14] 王钟. 典型城市居民家庭排水产污系数研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
WANG Z. Investigation on sewage coefficient in wastewater from urban family[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009(in Chinese).
- [15] 王德高. 污水流行病学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
WANG D G. Sewage epidemiology[M]. Beijing: Science Press, 2018(in Chinese).
- [16] BAO Y P, QIU Y, YAN S Y, et al. Pattern of drug use and depressive symptoms among amphetamine type stimulants users in Beijing and Guangdong Province, China [J]. *PLoS One*, 2013, 8(4): e60544.
- [17] 陈小波, 王卉. 中国海洛因市场研究 [J]. 中国人民公安大学学报(社会科学版), 2005, 21(4): 114-121.
CHEN X B, WANG H. Study on heroin market in China [J]. *Journal of Chinese People's Public Security University*, 2005, 21(4): 114-121 (in Chinese).

- [18] 乔静, 杨士云, 常红发, 等. 北京地区零包毒品滥用形势分析 [J]. 中国药物依赖性杂志, 2010, 19(2): 128-131.
QIAO J, YANG S Y, CHANG H F, et al. An analysis of retail abuse situation in Beijing market [J]. Chinese Journal of Drug Dependence, 2010, 19(2): 128-131 (in Chinese).
- [19] CASTIGLIONI S, BIJLSMA L, COVACI A, et al. Evaluation of uncertainties associated with the determination of community drug use through the measurement of sewage drug biomarkers [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(3): 1452-1460.
- [20] MALLOCK N, RABENSTEIN A, LAUX P, et al. Rapid, sensitive, and reliable quantitation of nicotine and its main metabolites cotinine and trans-3'-hydroxycotinine by LC-MS/MS: Method development and validation for human plasma [J]. Journal of Chromatography B, 2021, 1179: 122736.
- [21] 国家禁毒委员会办公室. 2019中国毒情形势报告 [EB/OL]. [2021-10-31]. http://www.nncc626.com/2020-06/24/c_1210675813.htm
- [22] 国家禁毒委员会办公室. 2020中国毒情形势报告 [EB/OL]. [2021-10-31]. http://www.nncc626.com/2021-07/16/c_1211244064.htm
- [23] KHAN U, NICELL J A. Sewer epidemiology mass balances for assessing the illicit use of methamphetamine, amphetamine and tetrahydrocannabinol [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421/422: 144-162.
- [24] 孙鹏. 市政污水中苯丙胺和甲基苯丙胺衍生化测定应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
SUN P. Study on determination of derivatization of amphetamine and methamphetamine in municipal wastewater[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017(in Chinese).
- [25] LI J, HOU L L, DU P, et al. Estimation of amphetamine and methamphetamine uses in Beijing through sewage-based analysis [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 724-732.
- [26] DU P, ZHOU Z L, BAI Y, et al. Estimating heroin abuse in major Chinese cities through wastewater-based epidemiology [J]. Science of the Total Environment, 2017, 605/606: 158-165.
- [27] BISHOP N, JONES-LEPP T, MARGETTS M, et al. Wastewater-based epidemiology pilot study to examine drug use in the Western United States [J]. Science of the Total Environment, 2020, 745: 140697.
- [28] SHAO X T, LIU Y S, TAN D Q, et al. Methamphetamine use in typical Chinese cities evaluated by wastewater-based epidemiology [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8): 8157-8165.
- [29] PEI W, ZHAN Q X, YAN Z Y, et al. Using Monte Carlo simulation to assess uncertainty and variability of methamphetamine use and prevalence from wastewater analysis [J]. International Journal of Drug Policy, 2016, 36: 1-7.