

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.09.2015020901

易建婷, 张成, 徐凤, 等. 全国投运城镇污水处理设施现状与发展趋势分析[J]. 环境化学, 2015, 34(9): 1654-1660

YI Jianting, ZHANG Cheng, XU Feng, et al. The status and developing trend of municipal sewage treatment plants in China[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(9): 1654-1660

全国投运城镇污水处理设施现状与发展趋势分析*

易建婷¹ 张 成^{1,2**} 徐 凤³ 罗程钟³ 陈 宏^{1,2} 赵秀兰^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆, 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆, 400715;
3. 重庆市固体废物管理中心, 重庆, 401117)

摘 要 对全国 1982—2013 年 30 个省市投运城镇污水处理设施现状、处理规模、运行负荷等进行统计分析, 探讨了我国污水处理产业的发展历程、处理工艺和技术的演变趋势. 分析表明, 截止 2013 年, 全国投运城镇污水处理设施 4136 座, 总污水处理能力达到 $1.2 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 平均污水处理负荷率约为 76.7%. 污水处理设施的数目、规模以及处理能力存在明显的地域差异, 东部发达地区明显高于西部欠发达地区. 随着污水处理设施的发展, 污水处理工艺也处于不断改进完善和探索中, 而主体处理工艺的选择主要受到经济发展水平、地域特点等因素的影响. 目前应用最多的主体工艺技术有厌氧-缺氧-好氧法 (A^2/O)、氧化沟工艺、循环活性污泥法 (CASS) 以及厌氧-好氧工艺 (A/O) 4 种. 近 10 年, CASS 工艺在新建污水处理设施中的应用有逐渐增加的趋势.

关键词 污水处理设施, 处理技术, 主体工艺, 发展趋势.

The status and developing trend of municipal sewage treatment plants in China

YI Jianting¹ ZHANG Cheng^{1,2**} XU Feng³ LUO Chengzhong³
CHEN Hong^{1,2} ZHAO Xiulan^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing, 400715, China;
2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing, 400715, China;
3. Chongqing Solid Wastes Management Center, Chongqing, 401117, China)

Abstract: The present situation, treatment scale and operating load of municipal sewage treatment plants (MSTP) in 30 cities in China from 1982 to 2013 were analyzed to investigate their development history and evolution trend of treatment technology. The results showed that 4136 MSTP have been in operation nationwide by the end of 2013 with a total sewage treatment capacity of $0.12 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ and average actual treatment load rate of 76.7%. An obvious regional difference was observed in the number of the facility and treatment scale and capacity, which are significantly higher in eastern developed regions than in the western undeveloped regions. With the development of sewage treatment industry, the treatment technology is in the process of continual improvement and exploration. However, it is noted that the selection of primary treatment technology is mainly influenced by the local economic development level and geographic distribution. At present, the most frequently applied processes are anaerobic-anoxic-oxic (A^2/O), oxidation ditch, cyclic activated sludge system (CASS) and anoxic/oxic (A/O). The increasingly wide application of CASS during the last ten years in newly founded MSTP would push this main process to a promising future.

2015 年 2 月 9 日收稿.

* 国家自然科学基金(51208426); 重庆市科技攻关计划(CSTC, 2008AC7013)资助.

** 通讯联系人, E-mail: zhcheng@126.com

Keywords:sewage treatment facilities, treatment technology, main treatment processes, developing trend.

快速城镇化是我国社会经济发展的重要标志,我国城镇化率从上个世纪 80 年代起快速增长,“十一·五”和“十二·五”期间是我国城镇发展的重要时期^[1],城镇化率从 2005 年的 43.0% 增加到 2013 年的 53.7%^[2].随着城镇化的快速增加,我国污水排放量也急剧上涨,从 2005 年的 524.5 亿吨快速增加到 2012 年的 684.8 亿吨^[2-3].城镇污水处理已经成为影响区域环境质量、区域经济发展潜力和社会发展水平的重要因素^[4-7].城市水污染治理设施的建设和运行受到各级政府的重视和人民群众的广泛关注.根据全国城市污水处理管理信息系统的统计数据,到 2013 年 12 月,已建污水处理厂达到 4136 座^[3].由于我国地域辽阔,城镇污水处理事业发展极不均衡,不同区域污水处理工艺和技术存在较大差异.因此,了解我国城镇污水处理设施的整体现状与发展趋势十分必要.

本文在统计分析全国 1982—2013 年投运城镇污水处理设施现状、处理规模、主体工艺等基础上,分析探讨我国污水处理行业的发展历程、主要处理工艺和技术的变化趋势,这对于推进国家及地方节能减排、制定有效对策,合理利用水资源,改善城市水环境质量具有重要意义.

1 分析方法

1.1 数据来源

在本研究中,相关数据主要来源于环保部近期公布的《2013 年全国投运城镇污水处理设施清单》^[3],其次来源于政府公开的报告、年鉴等.

1.2 数据分析

文章中的数据分析均采用 Origin9.0 和 SPSS19.0 软件完成.

1.3 全国城镇污水处理设施地域分区

根据国家环保局 2003 年的划分标准,将我国各地区依据经济发展水平以及地域特征划分为东、中、西部等 3 个经济地带.东部地区包括北京、天津、辽宁、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东和海南等 11 省(市、区);中部地区包括黑龙江、吉林、山西、河南、安徽、湖北、湖南、江西等 8 省(市、区);西部地区包括陕西、甘肃、宁夏、新疆、重庆、四川、贵州、青海、广西、内蒙古、云南等 11 省(市、区).

2 结果与讨论

2.1 中国城镇污水处理事业发展趋势

我国污水处理事业起步较晚,发展也较为缓慢,污水处理设施严重缺乏^[4].直至 1982 年,投入运行的污水处理厂才逐渐缓慢增长,到 1995 年全国投入运行污水处理厂有 73 座(见图 1).总处理水量为 $745.97\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,建厂速率仅为每年 5.2 座.“九五”期间,水污染防治法的修订以及《国家环境保护“九五”计划和 2010 年远景目标》等文件的发布,使得投入运行的污水处理设施逐年增加,2000 年达到 172 座,年均增加 18.8 座,处理能力增至 $1493.46\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.随着我国经济快速发展,环保问题越来越受到重视,国家对于环境整治方面的投入逐年增加^[5].2000 年,原建设部发布《城市污水处理及污染防治技术政策》,引导城市污水处理及污染防治技术的发展,加快城市污水处理设施的建设.在 2001—2005 年期间,污水处理设施年均增加 114 座,总污水处理能力增加了 $3155.37\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.2007 年,国务院发布了《全国城镇污水处理及再生利用设施建设“十一·五”规划》,新增各类投资 3320 亿元,全国各地都开始建设大型污水处理项目并相继投产,“十一·五”期间污水处理行业迎来发展的高峰期,平均建厂速率高达每年 500.4 座.2011 年后,国务院相继发布了《国家环境保护“十二·五”规划》和《“十二·五”全国城镇污水处理及再生利用设施建设规划》等文件,各类设施建设投资近 4300 亿元.截止 2013 年,全国投运城镇污水处理设施达 4136 座,总污水处理能力约为 $1.2\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.2015 年,新环保法的实施以及《水污染防治行动计划》的发布,标志着我国城镇污水处理设施建设将进一步发展.

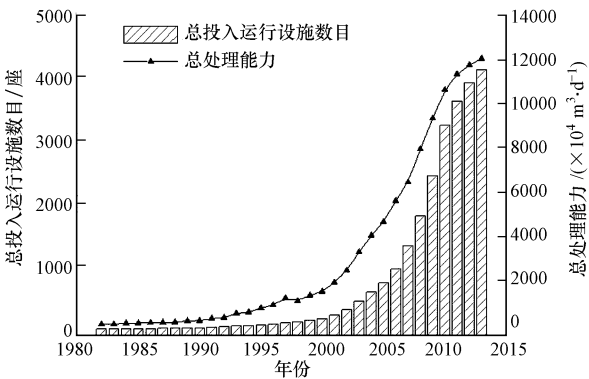


图 1 我国城镇污水处理设施变化趋势

Fig.1 Variation trend of municipal sewage treatment plants in China

2.2 我国污水处理设施规模与现状分析

2.2.1 各省市污水处理设施规模现状

各省市污水处理设施数量与处理能力见表 1.由表 1 可知,污水处理设施最多的省份为江苏省 (512 座),其次分别为广东(368 座)和山东(332 座),三省的污水处理能力均超过 $1000\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,其中最大的为广东,高达 $1703.76\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.污水处理设施数目最少的为青海、宁夏和海南,分别为 18、20 和 27 座.

表 1 2013 年各省污水处理设施现状

Table 1 Status of sewage treatment plants in 2013

省份	城镇污水处理设施数目/座				设计处理量/ ($\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	实际处理量/ ($\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	人均处理量/ ($\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	人均 GDP /元 ^[2]
	小型	中型	大型	总数				
青海	11	6	1	18	39.10	30.69	0.06	12809
宁夏	3	15	2	20	73.50	60.87	0.11	12695
海南	8	17	2	27	168.90	133.96	0.16	13361
上海	8	23	14	45	755.55	565.75	0.35	65473
天津	19	20	7	46	260.76	192.44	0.19	47972
甘肃	24	28	3	55	154.66	82.52	0.03	9527
吉林	6	40	9	55	284.15	193.33	0.07	17211
新疆	23	34	7	64	228.85	121.00	0.06	16164
北京	32	37	8	77	426.01	355.46	0.25	57431
重庆	42	43	3	88	289.60	252.30	0.08	14011
黑龙江	30	52	12	94	353.22	226.74	0.06	18463
贵州	76	25	4	105	197.87	169.97	0.04	6742
广西	34	63	9	106	380.70	280.90	0.06	11417
陕西	54	43	11	108	327.78	237.41	0.06	12843
云南	55	46	7	108	290.25	219.80	0.05	9459
福建	36	61	13	110	423.91	351.97	0.10	23663
江西	57	50	5	112	306.90	270.78	0.06	12204
内蒙古	40	74	4	118	305.20	198.25	0.08	25558
辽宁	23	81	24	128	741.47	564.21	0.13	24645
湖南	32	77	21	130	528.32	429.41	0.06	13123
安徽	33	91	15	139	524.99	459.79	0.07	11180
山西	74	75	3	152	304.45	213.27	0.06	16143
湖北	38	97	18	153	643.48	522.28	0.09	14733
河南	17	148	25	190	834.60	697.82	0.07	15056
浙江	81	106	29	216	1086.08	847.25	0.18	35730
河北	44	167	18	229	835.93	631.13	0.09	19363
四川	115	102	14	231	565.46	474.24	0.05	11708
山东	78	222	32	332	1350.03	1108.65	0.12	27148
广东	89	217	62	368	2008.56	1703.76	0.22	32142
江苏	233	251	28	512	1450.49	1140.58	0.15	32985

青海、宁夏和甘肃的污水处理能力较低,均小于 $100\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.西部地区和中小城市的人均污水处理能力仍处于较低的状态,如甘肃省人口近 3000 万,总污水处理能力仅为 $82.52\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,人均污水处理能力仅 $0.03\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,贵州和四川的人均污水处理能力也较低,分别为 0.04 和 $0.05\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.上海和北京等发达城市,虽然污水处理设施较少,但人均污水处理能力却较高,分别为 0.35 和 $0.25\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,领先其他省市.

全国各省市污水处理设施差别较大,与经济发展水平有一定关系.经济发达地区由于城镇化程度较高,用水量导致污水处理需求较大,人均污水处理能力相对较高,如图 2 所示.由此造成污水处理投入具有区域不平衡的特点,北京、广东等经济水平发达省市投入较高,而甘肃、贵州等水资源匮乏且经济能力不足的省市投资较少.其次,与地方政府对环境保护的重视程度也有一定关系,如海南省的人均 GDP 仅为 13361 元,低于全国约 2/3 的城市,但其人均污水处理能力却位于全国第 6,仅次于少数发达地区.

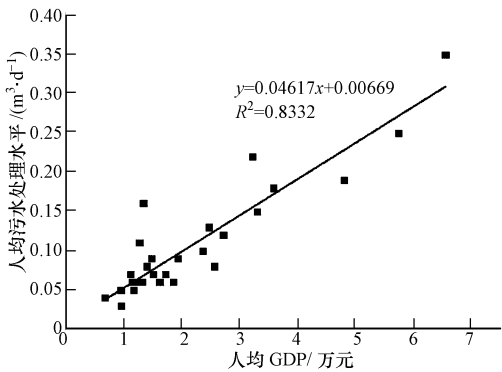


图 2 人均污水处理量与人均 GDP 的关系

Fig.2 Relationship between the sewage treatment capacity for each person and GDP per capita

2.2.2 不同地域污水处理设施的规模现状

由于地理位置、经济水平以及需求的不同,我国污水处理厂的规模差别极大,从最低 $0.2\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 到最高的 $280\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,相差 1400 倍.其中多数为中型规模,处理量在 $1\text{—}10\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 范围内,占 55.9%.其次为小型污水处理厂,占 34.1%,仅有 10.0%的污水厂处理量大于 $10\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.处理能力在 $100\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 以上的超大型污水厂共有 4 座,均位于经济发达地区(北京、上海和广州).

我国的污水处理设施主要集中在东部地区(表 2).

表 2 不同规模污水处理设施的地域分布情况

Table 2 Regional distribution of three scaled-up sewage treatment facilities

规模	地域	污水处理厂数量/座	设计处理量/ ($\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	实际处理量/ ($\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	有效负荷率/%
大型	东部	237	4859.40	4030.90	82.9
	中部	108	1682.01	1387.66	82.5
	西部	67	1099.41	916.59	83.4
	合计	412	7640.82	6326.15	82.8
中型	东部	1204	4187.43	3196.87	76.3
	中部	630	1893.55	1485.38	78.4
	西部	479	1454.59	1019.50	70.1
	合计	2313	7537.07	5702.45	75.7
小型	东部	649	507.36	380.52	75.0
	中部	286	204.56	149.42	73.0
	西部	476	298.96	193.32	64.7
	合计	1411	1010.88	723.26	71.5

占总数的 50.5%,有效污水处理能力为 $7608.29\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.中部和西部数量相差不大,分别占 24.8%和 24.7%,总污水处理能力中部高于西部,分别为 $3022.46\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $2129.41\times10^4\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$.其中,

大型污水处理厂多位于东部沿海发达地区,如江苏、广东等经济水平高的城市,其自控、基建和投资等^[6]能够满足大型污水处理设施的各方面要求.同时,东部地区城市化程度显著高于其他地区,污水处理需求相应较大,总污水处理能力占全国一半以上.西部地区污水处理技术相对较为落后,管理水平不高,因此中小型规模较多,但其有效利用率相对于东部与中部地区低 10% 以上,因此在处理技术及管理水平上还需进行改善与提高^[7].同时,东部地区 and 中部地区处理设施的平均负荷率相当,实际处理量分别为设计处理量的 78.1%、78.0%,西部地区稍低,为 72.7%.这主要是由于西部地区小型污水处理厂较多,负荷率较低(小于 65%).

2.3 我国城镇污水处理设施主体工艺分析

2.3.1 城镇污水处理设施主体工艺应用情况

我国城镇污水处理设施主体工艺应用情况见图 3.应用最广泛的主要有厌氧-缺氧-好氧法(A^2/O)、氧化沟工艺、循环活性污泥法(CASS)以及厌氧-好氧工艺(A/O),分别占 21.42%、16.95%、11.99% 和 8.58%.城市污水中的主要污染物是有机物,因此目前绝大多数均采用生物法,包括活性污泥法和生物膜法两大类,目前生物膜法的处理效果不太令人满意,因此应用相对较少^[8-9].

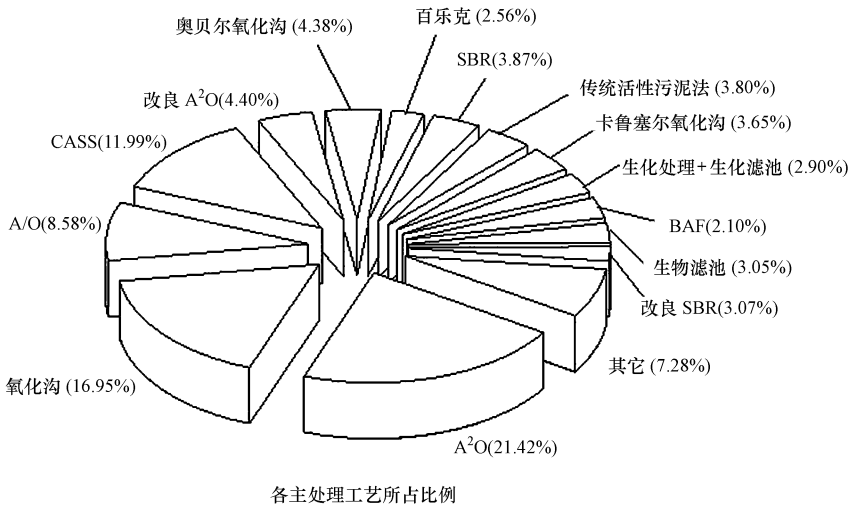


图 3 污水处理厂主体工艺应用情况

Fig.3 Distribution of principal treatment processes applied in wastewater treatment plants

将图 3 中涉及的 14 种处理工艺分为传统活性污泥法及其改进型、序批式活性污泥法(SBR)及其改良工艺、氧化沟及其改良工艺、生物膜法 4 大类(表 3),前三者均属于活性污泥法的范畴^[10],相对于生物膜法中的几种生物滤池法,其应用范围占有绝对优势.整体而言,大型规模的污水处理设施主要采用传统活性污泥法及其改进型工艺,约占总数的 60%,其次分别为氧化沟及其改良工艺(19.66%)、SBR 及其改良工艺(10.68%).可见传统活性污泥法及其改进型工艺在大型规模处理设施的应用中具有明显优势,其中 A^2/O 为主导,占该大类的半数以上.中、小型规模处理厂的工艺选择相对较均衡,以上 3 大类工艺类型在中型规模污水处理设施中所占比例分别为 39.21%、19.71%和 28.02%,在小型规模中所占比例分别为 37.70%、20.06%和 19.42%.

传统活性污泥法及其改进型工艺比氧化沟和 SBR 工艺的同步好氧消化显著节省能耗,且规模越大这种优势越明显^[7-8].其中 A^2/O 应用最为广泛,主要是因为其排放的污泥中含有大量聚磷菌,比一般好氧活性污泥系统磷的去除率更高^[11-12].中、小型城市污水处理厂优先选择的工艺分别是氧化沟和 SBR 工艺,它们的共同优点是有机物去除效率很高,处理设施简单,管理方便^[6-7].不足之处在于氧化沟工艺占地面积相对较大、能耗较高,SBR 自动化控制要求高^[13].

2.3.2 城镇污水处理设施主体工艺发展趋势

如图 4 所示,在污水处理事业起步阶段,传统活性污泥法、 A/O 、 A^2/O 为主导工艺,约占一半以上,同时常规型氧化沟工艺以及生物膜法也占有一定比例,约占 10% 左右,各工艺的改良型也崭露头角.

1995 年后,污水处理行业开始迅速发展,各种新型处理工艺均得到推广,而我国对水环境质量要求逐步提高,修订后的国家《污水综合排放标准》(GB8978—1996)及《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918—2002)在污水处理以及排放限制上愈加严格.同时,国务院在 2013 年 10 月发布的《城镇排水与污水处理条例》在对污水处理行业的管理以及法律规范上也越来越严,因此优选主体工艺显得极为关键.A/O、A²/O 由于其较低的能耗与运行费用,且能有效地脱氮除磷仍然是主流技术^[5].氧化沟工艺及其改进型因其良好的脱氮效果且无需沉淀池,具有简单高效的特点^[11],因此在此期间也得到了大范围的应用.SBR 及其改良工艺由于处理设施简单且处理效果好,也逐渐被接受,但由于自控要求高的限制,起初应用程度不高^[13-14].2005—2013 年,随着科技的发展特别是自控技术的发展与提高,SBR 工艺得以推广,其改良型工艺近几年来在国内外得到广泛应用^[15].

表 3 污水处理设施主体处理工艺选用情况

Table 3 Statistical results of the scale of sewage treatment plants and the processes they choose							
工艺种类	工艺项目	大型(412 座)		中型(2313 座)		小型(1411 座)	
		数目/个	比例/%	数目/个	比例/%	数目/个	比例/%
传统活性污泥法及其改进型	A/O	36	8.74	143	6.18	176	12.47
	A ² /O	137	33.25	498	21.53	251	17.79
	百乐克	3	0.73	92	3.98	11	0.78
	改良 A ² /O	48	11.65	83	3.59	43	3.05
	传统活性污泥法	23	5.58	91	3.93	51	3.61
	合计	247	59.95	907	39.21	532	37.70
SBR 及其改良工艺	CASS	21	5.10	293	12.67	182	12.90
	SBR	11	2.67	91	3.93	58	4.11
	改良 SBR	12	2.91	72	3.11	43	3.05
	合计	44	10.68	456	19.71	283	20.06
氧化沟及其改良工艺	奥贝尔氧化沟	3	0.73	110	4.76	38	2.69
	卡鲁塞尔氧化沟	12	2.91	110	4.76	29	2.06
	氧化沟	66	16.02	428	18.50	207	14.67
	合计	81	19.66	648	28.02	274	19.42
生物膜法	BAF 曝气生物滤池	8	1.94	46	1.99	33	2.34
	生化处理+生物滤池	8	1.94	44	1.90	68	4.82
	生物滤池	14	3.40	72	3.11	84	5.95
	合计	30	7.28	162	7.00	185	13.10
其它		10	4.66	140	3.83	137	10.71
总计		412	100	2313	100	1411	100

随着污水处理需求增加和处理要求的提高,许多新型工艺和改进型工艺投入使用,逐步取代原始工艺.如传统活性污泥法被改良 A²/O 所取代,同样 CASS 作为 SBR 的改进型具有更多优势,与其他主体工艺相比,近 10 年来,其在新建污水处理设施中的应用比例逐年升高(图 5),具有较大的发展前景.

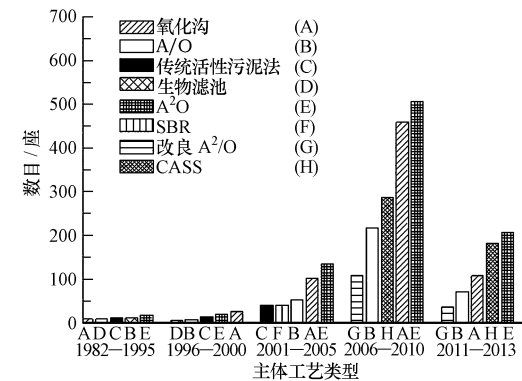


图 4 主要工艺类型的应用情况
注:每一阶段仅统计应用最多的前 5 项主体工艺
Fig.4 Variation of sewage treatment process application

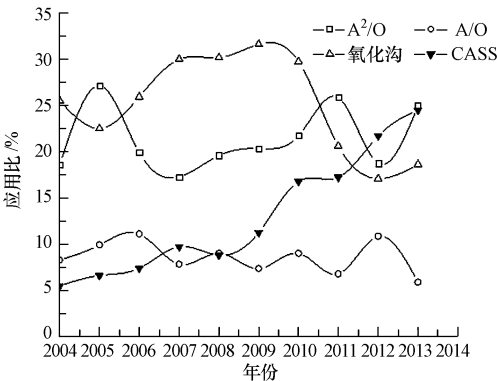


图 5 近 10 年新建污水处理厂主体工艺的应用比例
Fig.5 Percentage of main processes applied in newly founded MSTP during the last ten years

3 结论

- (1)“十五”至“十二五”期间,我国污水处理事业快速发展.截止 2013 年底,我国污水处理能力已达到 $1.2\times 10^8\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,平均污水处理负荷率约为 76.7%.但区域发展存在较大的地域性差别,80%位于东部地区.西部地区和中小城市人均污水处理能力较低.
- (2)传统活性污泥法及其改进型、SBR 及其改良工艺、氧化沟及其改良工艺在我国城镇污水处理厂中占有绝对优势,应用最广泛的主要有 A^2/O 、氧化沟工艺、CASS 以及 A/O 工艺.大型污水处理设施主要采用 A^2/O 工艺,而中、小型污水处理厂则分别偏好于氧化沟和 CASS 工艺.
- (3)随着污水处理需求的增加和处理要求的提高,污水处理新技术和新工艺不断发展,部分老工艺将逐步被取代.近年来,CASS 工艺在新建污水处理设施中的应用逐渐增加.

参 考 文 献

[1] 《中国城市发展报告》编委会. 中国城市发展报告(2012)[M]. 北京:中国城市出版社, 2013

[2] 国家统计局. 2013 年中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2014

[3] 国家环境保护部. 2013 全国投运城镇污水处理设施清单[EB/OL]. [2014-05-10].http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201404/t20140415_270550.htm

[4] Hellström D, Jøpsson U, Kärrman E. A framework for systems analysis of sustainable urban water management[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2000, 20(2): 311-321

[5] Palme U, Lundin M, Tillman A M, et al. Sustainable development indicators for wastewater systems-Researchers and indicator users in a co-operative case study[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 43: 293-311

[6] 宋连朋, 魏连雨, 赵乐军, 等. 我国城镇污水处理厂建设运行现状及存在问题分析[J]. 给水排水, 2013, 39(3): 39-44

[7] 刘允, 孙宗光. 2001—2012 年全国水环境质量趋势分析[J]. 环境化学, 2014, 33(2): 286-290

[8] 刘智晓, 崔福义, 丁雷, 等. 中小城镇高效低耗污水处理工艺的选择[J]. 给水排水, 2006, 32(4): 32-37

[9] 唐然. 城镇污水处理工艺优选决策模型研究[D]. 重庆:重庆大学博士学位论文, 2008

[10] Song D, Yang S B. Influence factors of phosphorus removal by chemical method in sewage treatment system[J]. Meteorological and Environmental Research, 2013, 4(7): 50-52

[11] 周芑, 谭振江. 中、小型城市污水处理厂的优选工艺[J]. 中国给水排水, 2000, 16(10): 21-23

[12] 王涛, 楼上游. 中国城市污水处理工艺现状调查与技术经济指标评价[J]. 给水排水, 2004, 30(5): 1-4

[13] 华佳, 柏双友, 李治阳, 等. CASS 工艺用于小城镇污水处理的工程设计研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(2): 59-62

[14] Wang L, Wang L, Jiang Y F. Performance of Wuxi WWTP in China[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2003, 2(2): 224-229

[15] 丁德才. 三峡库区小城镇污水处理工艺的比较研究[D]. 武汉:武汉科技大学硕士学位论文, 2008