

文章编号: 1000-5862(2021)05-0485-08

# 江西省工业源水劣化足迹核算与评估 ——基于2006—2017年江西省生态环境厅《环境统计年报》数据

江 驰<sup>1</sup>, 黄 振<sup>2</sup>

(1. 江西省生态环境监测中心, 江西 南昌 330077; 2. 江西省华赣环境集团有限公司, 江西 南昌 330072)

**摘要:** 基于水劣化足迹的评价方法, 对江西省不同工业行业在多个时间和空间维度上排放的污染物进行水富营养化足迹、水酸化足迹和水生态毒性足迹的核算和评价。研究结果表明: (i) 2017年, 对江西省水富营养化足迹影响最大的关键行业是有色金属冶炼和压延加工业, 其次是造纸和纸制品业, 再次是化学原料和化学制品制造业, 关键污染物是氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ ); 对水酸化足迹影响较大的关键行业是非金属矿物制品业与黑色金属冶炼和压延加工业, 关键污染物是 $\text{SO}_2$ ; 对水生态毒性足迹影响最为显著的是有色金属矿采选业, 关键污染物是Cd。(ii) 空间维度评估表明对水富营养化足迹贡献最大的是赣州市, 对水酸化和水生态毒性足迹影响最突出的均为宜春市。(iii) 2006—2017年江西省3种水劣化足迹均总体呈下降趋势, 水富营养化足迹与峰值相比降低了70.06%, 水酸化足迹与峰值相比降低了59.99%, 水生态毒性足迹与峰值相比降低了24.33%。

**关键词:** 水劣化足迹; 水富营养化; 水酸化; 水生态毒性; 江西省; 工业

中图分类号: X 32 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2021.05.07

## 0 引言

水资源与人类社会经济活动息息相关, 涉及工业、农业和居民日常生活等各个方面, 同时工业、农业和生活废水的大量排放又会导致水环境污染, 进一步加剧水资源短缺。2019年《中国生态环境状况公报》<sup>[1]</sup>显示: 中国Ⅳ类以上地表水水质比例只有25.1%。水资源短缺和水环境污染问题仍然是制约中国可持续发展的关键要素<sup>[2]</sup>。因此, 水资源和环境相关的评价得到了越来越广泛的关注<sup>[3-9]</sup>。

水足迹(Water Footprint)<sup>[10-12]</sup>是一种可以同时定量评价人类活动对水资源消耗和水环境污染的综合指标。2014年国际标准化组织(ISO)提出了水足迹标准(ISO14046), 包括水稀缺足迹和水劣化足迹<sup>[13]</sup>。该标准把水劣化足迹分成水富营养化足迹、水酸化足迹和水生态毒性足迹等类型, 可选择具有代表性的影响类型进行详细评价。如严岩等<sup>[14]</sup>利用水劣化足迹评价体系, 选择了关键特征污染物对2004—2013年北京市城市发展造成的水富营养化足迹、水酸化足迹和水生态毒性足迹影响进行了评估, 结果

表明减缓人口增长速率、调整产业结构和减少化肥用量有利于水劣化足迹的改善。伴随水足迹理论体系的发展, 其概念也在不断得到完善和延伸。2017年中国发布GB/T 33859—2017《环境管理水足迹原则、要求与指南》<sup>[15]</sup>的国家标准, 该标准来源于ISO 14046, 它认为水足迹评价是“编制产品、过程或组织用水或影响水的输入输出清单, 并评估其潜在环境影响”。水足迹是可以评价人类生产和生活活动在多个时间和地理维度上直接或间接造成的水资源消耗和水环境污染的综合性指标。

江西省水资源丰富, 其水资源总量居中国第7位, 地表水资源多年平均值约为1 487亿 $\text{m}^3$ <sup>[16]</sup>。其境内拥有中国最大的淡水湖——鄱阳湖, 该湖广纳赣江、抚河、信江、饶河、修河5大河系, 连通长江, 是天然的水资源宝库<sup>[17]</sup>。所以江西省的水环境资源保护问题更显重要。工业源废水废气排放的污染物成分复杂, 包含COD、氨氮( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、氰化物、挥发酚、石油烃、重金属(As、Pb、Cd、Cr、Pb等)、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 等, 对水环境造成严重危害。不同行业排放的污染物性质差异巨大, 如金属开采和冶炼行业排放的主要是无机物废水, 以重金属为主; 造纸、印染行业排放的

收稿日期: 2021-05-20

基金项目: 江西省生态环境大数据平台建设(2020-360000-65-01-002037)资助项目。

作者简介: 江 驰(1970—), 男, 福建永定人, 高级工程师, 主要从事环境信息研究。E-mail: 18970011691@189.cn

主要是有机物废水. 不同行业污染物排放量、种类及其环境风险也有着巨大差异, 这为实现工业污染物的精准治理和环境风险的管控增添了许多不确定因素. 本文运用水劣化足迹评价方法对江西省不同行业的工业污染物在多个时间和空间维度上对水环境的影响进行全面评估, 从而为政府相关部门实现工业污染物的精准管控提供科学参考.

## 1 评价方法

由于江西省水资源丰富, 所以本文不进行水稀缺足迹评价. 按照水劣化足迹评价理论 (ISO 14046), 主要对江西省工业源污染物排放进行水富营养化足迹、水酸化足迹和水生态毒性足迹的影响评价.

### 1.1 水富营养化足迹

水富营养化足迹是指由含 N、P 元素污染物引起的富营养化效应. COD 是指污水中能被强氧化剂氧化的物质 (一般是有机物) 的氧当量, 而在污水中有机物包含一定的有机氮、磷, 虽然 COD 富营养化系数低<sup>[18]</sup>, 但由于其排放量巨大, 因此 COD 也能作为特征污染物来核算水富营养化足迹<sup>[13]</sup>. 本文以 COD、NH<sub>3</sub>-N 为特征污染物, 换算成 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 作为统一单位进行比较. 水富营养化足迹具体计算方法为

$$W_{FAE} = \sum_{i=1}^2 N_{P_i} M_i, \quad (1)$$

其中  $W_{FAE}$  为水富营养化足迹 (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> eq);  $N_{P_i}$  为污染物  $i$  的富营养化潜力因子, 按 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 当量计算;  $M_i$  为污染物  $i$  的年排放质量 (kg);  $i = 1, 2$ .

### 1.2 水酸化足迹

水酸化足迹是指主要由 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 等酸性气体排放后随降雨沉降到水环境中引起的酸化效应<sup>[19]</sup>. 本文以 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 为特征污染物, 统一换算成 SO<sub>2</sub> 进行比较. 水酸化足迹具体计算方法为

$$W_{FAC} = \sum_{i=1}^2 A_{P_i} M_i, \quad (2)$$

其中  $W_{FAC}$  为水酸化足迹 (kg SO<sub>2</sub> eq);  $A_{P_i}$  为污染物  $i$  的酸化潜力因子, 换算成 SO<sub>2</sub> 当量;  $M_i$  为污染物  $i$  的年排放质量 (kg);  $i = 1, 2$ .

### 1.3 水生态毒性足迹

水生态毒性足迹是指重金属排放引起的水环境生态毒性污染的水量. 本文以 As、Pb、Cd、Cr、Hg 为特征污染物, 核算区域水生态毒性足迹. 水生态毒性足迹具体计算方法为

$$W_{F_{tox}} = \sum_{i=1}^5 E_{CA_i} M_i, \quad (3)$$

其中  $W_{F_{tox}}$  为水生态毒性足迹 (m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq);  $E_{CA_i}$  为污染物  $i$  的特征水生态毒性分类因子, 即 1 kg 污染物  $i$  造成生态毒性污染的水体体积 (m<sup>3</sup>);  $M_i$  为污染物  $i$  的排放质量 (kg);  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ .

本文数据来自江西省生态环境厅发布的 2006—2017 年《环境统计年报》(所需数据仅更新到 2017 年)<sup>[20]</sup>. 污染物  $i$  富营养化潜力因子、酸化潜力因子、特征水生态毒性分类因子统称为特征因子, 均来源于文献<sup>[18]</sup>. 部分污染物水劣化足迹特征因子如表 1 所示.

表 1 部分污染物水劣化足迹特征因子

影响类型	污染物	特征因子	单位
水富营养化	COD	0.022	kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> eq · kg <sup>-1</sup> 污染物
	NH <sub>3</sub> -N	0.330	
水酸化	SO <sub>2</sub>	1.00	kg SO <sub>2</sub> eq · kg <sup>-1</sup> 污染物
	NO <sub>x</sub>	0.70	
水生态毒性	As	2.0 × 10 <sup>5</sup>	m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O eq · kg <sup>-1</sup> 污染物
	Pb	2.0 × 10 <sup>6</sup>	
	Cd	2.0 × 10 <sup>8</sup>	
	Cr	1.0 × 10 <sup>6</sup>	
	Hg	5.0 × 10 <sup>8</sup>	

## 2 评价结果

### 2.1 关键行业和污染物评估

本文关键行业和污染物评估是指对江西省各工业行业和各污染物分别进行水劣化足迹核算, 以评估出对江西省水环境影响较为突出的关键行业和关键污染物, 从而帮助政府相关部门科学精准地对某一行业、某一污染物或某一行业中的某一污染物进行环境管控. 为了评估出在江西省工业体系中对水环境污染较大的关键行业, 选取了现有数据 (即 2017 年《环境统计年报》) 进行水劣化足迹核算, 各工业行业对江西省水环境影响的贡献如图 1 所示. 由图 1 可知: 对水富营养化影响比较显著的是有色金属冶炼和压延加工业 (行业 2)、造纸和纸制品业 (行业 27)、化学原料和化学制品制造业 (行业 5)、农副食品加工业 (行业 14)、医药制造业 (行业 30) 和有色金属矿采选业 (行业 1), 其贡献占比分别为 16.90%、14.50%、13.20%、9.40%、7.68% 和 7.16%. 其他行业贡献占比不足 5.00%. 而非金属矿物制品业 (行业 33) 对水酸化影响最为显著, 其贡献占比高达 64.39%; 其次是黑色金属冶炼和压延加工业 (行业 6), 其贡献占比为 12.36%; 此外, 电

力、热力生产和供应业(行业 39)、化学原料和化学制品制造业(行业 5)、有色金属冶炼和压延加工业(行业 2)也有一定的贡献(大于 3.00%),其他行业的贡献相对较少。对水生态毒性影响最为突出的是有色金属矿采选业(行业 1),其贡献占比高达 75.28%;其次是有色金属冶炼和压延加工业(行业 2),贡献占比为 19.44%;化学原料和化学制品制造业(行业 5)及黑色金属冶炼和压延加工业(行业 6)对水生态毒性影响也有一定贡献,其贡献占比为 1.00%~2.00%,而其他行业贡献率则相对较轻微。表 2 汇总了 2017 年各工业行业水劣化足迹排名情况。由表 2 可知:有色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业的 3 种水劣化足迹排名均较前,这表明该 2 个行业对水环境综合污染比较严重,

是需要重点治理和密切关注的行业。

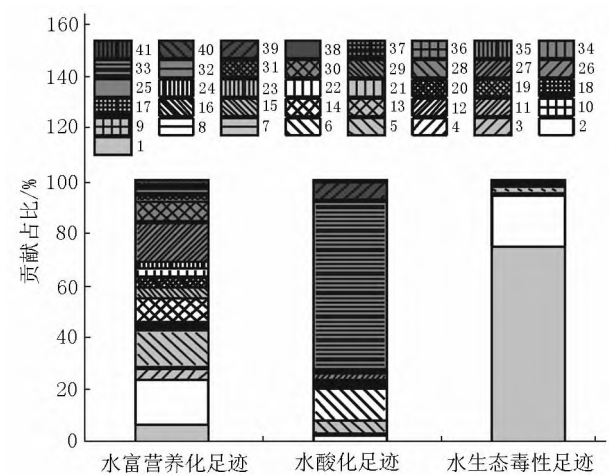


图 1 2017 年江西省工业污染物排放水劣化足迹影响评价关键工业行业

表 2 2017 年江西省各工业行业水劣化足迹排名汇总

序号	行业	水富营养化 足迹排名	水酸化 足迹排名	水生态毒性 足迹排名
1	有色金属矿采选业	6	23	1
2	有色金属冶炼和压延加工业	1	5	2
3	电气机械和器材制造业	8	15	6
4	计算机、通信和其他电子设备制造业	15	28	5
5	化学原料和化学制品制造业	3	4	3
6	黑色金属冶炼和压延加工业	16	2	4
7	废弃资源综合利用业	20	22	7
8	非金属矿采选业	18	9	14
9	铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造业	22	35	13
10	黑色金属矿采选业	29	33	18
11	金属制品业	26	20	9
12	印刷和记录媒介复制业	32	29	20
13	仪器仪表制造业	35	37	21
14	农副食品加工业	4	10	22
15	食品制造业	9	8	16
16	煤炭开采和洗选业	25	27	12
17	石油和天然气开采业	/	/	/
18	开采专业及辅助性活动	36	36	/
19	其他采矿业	/	/	/
20	酒、饮料和精制茶制造业	7	17	/
21	烟草制品业	37	30	/
22	纺织业	10	11	19
23	纺织服装、服饰业	30	31	/
24	皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋业	11	25	11
25	木材加工和木、竹、藤、棕、草制品业	24	12	/
26	家具制造业	33	26	/
27	造纸和纸制品业	2	6	/
28	文教、工美、体育和娱乐用品制造业	28	21	15
29	石油、煤炭及其他燃料加工业	17	7	8
30	医药制造业	5	13	10
31	化学纤维制造业	12	14	/

表 2(续)

序号	行业	水富营养化 足迹排名	水酸化 足迹排名	水生态毒性 足迹排名
32	橡胶和塑料制品业	23	16	/
33	非金属矿物制品业	13	1	/
34	通用设备制造业	27	24	/
35	专用设备制造业	34	32	/
36	汽车制造业	21	19	17
37	其他制造业	31	34	/
38	金属制品、机械和设备修理业	38	38	/
39	电力、热力生产和供应业	19	3	/
40	燃气生产和供应业	39	18	/
41	水的生产和供应业	14	39	/

注 “/”表示该种水劣化足迹忽略不计,故无排名。

为了评估出在江西省工业体系中对水环境污染较大的关键污染物,选取了现有的数据(即 2017 年《环境统计年报》)进行水劣化足迹核算,各污染物对江西省水环境影响的贡献如图 2 所示。由图 2 可知:在水富营养化影响中  $\text{NH}_3\text{-N}$  的贡献最大,约占 60.40%;其次是 COD,其贡献占比约为 39.60%。在水酸化影响中的关键物质是  $\text{SO}_2$ ,其贡献占比为 59.51%; $\text{NO}_x$  对水酸化影响的贡献占比为 40.49%。在水生态毒性影响中的关键物质是 Cd,其贡献占比高达 87.18%;其次是 Hg,其贡献占比为 9.56%;Pb 也有一定程度贡献(2.08%),其他物质的贡献则相对较轻微。

为进一步分析关键污染物的排放源,以确定关键污染物排放的主要行业,归纳了在上述关键行业中关键污染物的水劣化足迹,结果如表 3 所示。由表 3 可知:造成水富营养化影响的主要排放源从高到低排序依次是有色金属冶炼和压延加工业(行业 2)排放的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、造纸和纸制品业(行业 27)排放的 COD、化学原料和化学制品制造业(行业 5)排放的  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、农副食品加工业(行业 14)排放的 COD 和

化学原料和化学制品制造业(行业 5)排放的 COD。对水酸化影响贡献最显著的排放源是非金属矿物制品业(行业 33)排放的  $\text{SO}_2$ ,其次是其排放的  $\text{NO}_x$ 。造成水生态毒性影响的排放源从高到低排序依次是有色金属矿采选业(行业 1)排放的 Cd、有色金属冶炼和压延加工业(行业 2)排放的 Cd、有色金属矿采选业(行业 1)排放的 Hg,而其他排放源则相对较轻微。

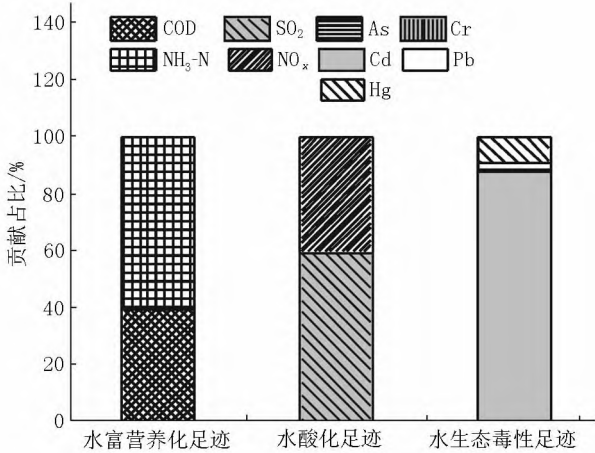


图 2 2017 年江西省工业污染物排放水劣化足迹影响评价关键污染物

表 3 2017 年江西省工业污染物排放水劣化足迹影响评价关键污染物的排放源

行业	水富营养化足迹/ ( $\text{kg PO}_4^{3-}\text{eq}$ )		水酸化足迹/ ( $\text{kg SO}_2\text{eq}$ )		水生态毒性足迹/ ( $\text{m}^3\text{H}_2\text{O eq}$ )				
	COD	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	As	Pb	Cd	Cr	Hg
1	$7.07 \times 10^4$	$1.20 \times 10^5$	$1.41 \times 10^5$	$1.76 \times 10^5$	$5.58 \times 10^8$	$2.88 \times 10^{10}$	$4.51 \times 10^{11}$	$1.32 \times 10^8$	$1.22 \times 10^{11}$
2	$4.57 \times 10^4$	$4.05 \times 10^5$	$9.88 \times 10^6$	$4.35 \times 10^6$	$4.00 \times 10^8$	$5.04 \times 10^9$	$1.42 \times 10^{11}$	$5.38 \times 10^7$	$8.00 \times 10^9$
5	$1.38 \times 10^5$	$2.14 \times 10^5$	$1.88 \times 10^7$	$5.98 \times 10^6$	$7.52 \times 10^7$	$2.81 \times 10^8$	$1.11 \times 10^{10}$	$3.96 \times 10^8$	$2.19 \times 10^9$
6	$1.46 \times 10^4$	$1.76 \times 10^4$	$3.28 \times 10^7$	$2.50 \times 10^7$	$2.39 \times 10^7$	$2.26 \times 10^8$	$1.12 \times 10^{10}$	$1.90 \times 10^7$	$1.30 \times 10^8$
14	$1.72 \times 10^5$	$7.95 \times 10^4$	$1.47 \times 10^6$	$7.27 \times 10^5$	$8.36 \times 10^1$	$1.52 \times 10^3$	$1.54 \times 10^4$	$2.02 \times 10^3$	/
27	$3.62 \times 10^5$	$2.56 \times 10^4$	$7.65 \times 10^6$	$1.98 \times 10^6$	/	/	/	/	/
30	$1.14 \times 10^5$	$9.10 \times 10^4$	$1.06 \times 10^6$	$4.96 \times 10^5$	/	/	/	/	$7.19 \times 10^8$
33	$3.74 \times 10^4$	$9.68 \times 10^3$	$2.16 \times 10^8$	$8.44 \times 10^7$	/	/	/	/	/

注 “/”表示该种污染物排放量忽略不计。

2.2 空间敏感性评估

对江西省工业源水劣化足迹进行空间敏感性评估可以明确某一工业行业或某一工业污染物对江西省各设区市水环境的影响程度,从而减小政府需要削减水劣化足迹的范围,进而精准降低管控工业污染物的难度. 本文选取了现有的数据(即 2017 年《环境统计年报》)对江西省各设区市水劣化足迹进行核算,工业污染物排放水富营养化足迹如图 3 所示. 由图 3 可知: 赣州市、宜春市和九江市工业源引起的水富营养化足迹最为显著,分别占江西省工业源水富营养化足迹的 22.43%、18.55% 和 17.28%. 鹰潭市工业源富营养化足迹贡献最低(1.49%). 此外,赣州市工业源富营养化足迹主要是由  $\text{NH}_3\text{-N}$  贡献的,而宜春市工业源富营养化足迹主要是由 COD 贡献的,九江市  $\text{NH}_3\text{-N}$  和 COD 的排放对水富营养化足迹的贡献相差不大.

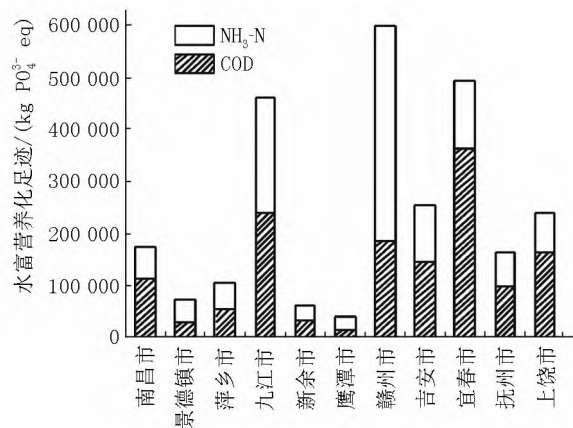


图 3 2017 年江西省各设区市水富营养化足迹

2017 年江西省各设区市工业污染物排放水酸化足迹如图 4 所示. 由图 4 可知: 宜春市工业源引起的水酸化足迹最为显著,占江西省工业源水酸化足迹的 29.00%. 赣州市、吉安市、上饶市、萍乡市和新余市对水酸化足迹均有较大贡献,贡献占比分别为 12.42%、10.35%、9.72%、9.69% 和 9.08%. 鹰潭市工业源引起水酸化足迹最低(1.91%). 另外,除九江市外其他各设区市造成的水酸化足迹主要原因均为  $\text{SO}_2$  的排放,该结果与前面分析的一致(见图 2).

2017 年江西省各设区市工业污染物排放水生态毒性足迹如图 5 所示. 由图 5 可知: 对水生态毒性足迹贡献最大的 3 个设区市为宜春市、赣州市和九江市,其贡献占比分别为 36.90%、20.38% 和 19.57%; 其次是上饶市和鹰潭市,其贡献占比分别为 10.94% 和 7.04%,其他设区市对全省水生态毒性足迹贡献较低(不足 3.00%). 宜春市、赣州市和

九江市造成的水生态毒性足迹主要原因均在于 Cd 的排放. 由前面分析也可知对水生态毒性足迹贡献最大的关键污染物是 Cd(见图 2). 此外,在由 Hg 引起的水生态毒性足迹中,宜春市的贡献最为显著. 值得注意的是,虽然 As 对水生态毒性的贡献总体最低,但在九江市工业源引起的水生态毒性足迹贡献中,As 的贡献占比却是仅次于 Cd 的.

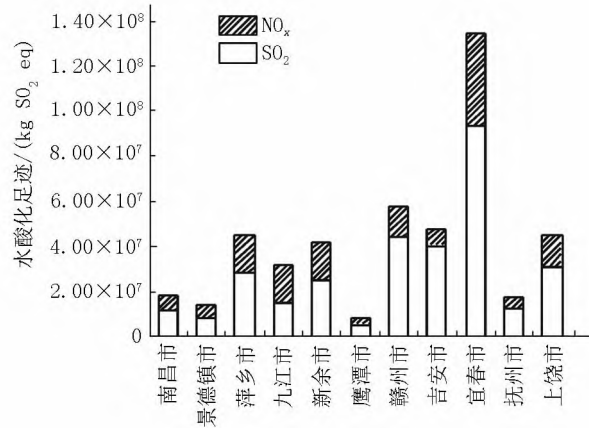


图 4 2017 年江西省各设区市水酸化足迹

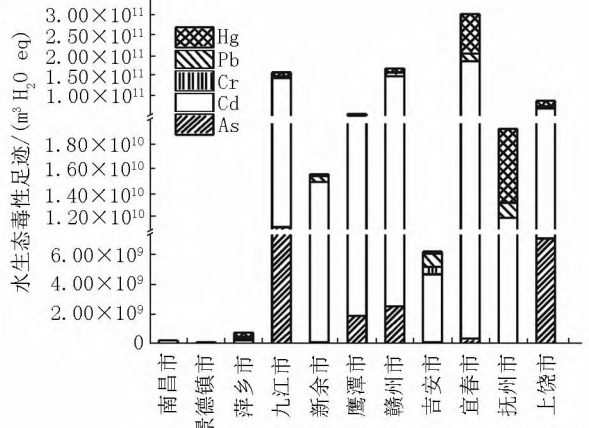


图 5 2017 年江西省各设区市水生态毒性足迹

表 4 对 2017 年江西省各设区市工业污染物排放水劣化足迹排名进行了汇总.

表 4 2017 年江西省各设区市工业水劣化足迹排名汇总

设区市	水富营养化 足迹排名	水酸化 足迹排名	水生态毒性 足迹排名
南昌市	6	8	10
景德镇市	9	10	11
萍乡市	8	5	9
九江市	3	7	3
新余市	10	6	7
鹰潭市	11	11	5
赣州市	1	2	2
吉安市	4	3	8
宜春市	2	1	1
抚州市	7	9	6
上饶市	5	4	4

总体而言,宜春市、赣州市受工业源水劣化足迹影响较为显著,九江市次之。其所受水劣化足迹影响有较大的削减潜力,可进一步通过提高所在辖区工业行业清洁生产水平来实现污染物减排。此外,进行产业结构的转型升级也有望降低水劣化足迹影响。

### 2.3 时间敏感性评估

时间敏感性评估可以判断江西省工业源水劣化足迹的变化趋势,从而帮助政府相关部门对上一阶段污染物精准管控工作有个初步的认知,也为后续改进污染物管控工作提供一定的参考信息。以工业源 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  为主要污染物,核算了江西省 2006—2017 年工业排放的水富营养化足迹,结果如图 6 所示。由图 6 可知:2006—2017 年水富营养化足迹总体呈先上升后下降的趋势。即 2006—2011 年虽略有波动但总体呈上升趋势,2006 年与 2011 年相比,水富营养化足迹上升了 21.53%,在 2011 年水富营养化足迹达到最高值( $6.57 \times 10^6 \text{ kg PO}_4^{3-} \text{ eq}$ );2011—2017 年总体呈下降趋势,2017 年与 2011 年相比,水富营养化足迹削减了 70.06%。值得注意的是,2006—2017 年由 COD 排放引起的水富营养化足迹波动较小,且总体呈下降趋势,这说明 2006—2017 年间的水富营养化足迹变化趋势主要是由  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量的变化引起的。同时,2006—2017 年的水富营养化足迹  $\text{NH}_3\text{-N}$  的贡献往往大于 COD,这说明国家在“十二五”规划中把  $\text{NH}_3\text{-N}$  列入污染物排放总量控制十分有必要,且江西省很好地落实了国家“十二五”规划,极大地减少了  $\text{NH}_3\text{-N}$  排放量。

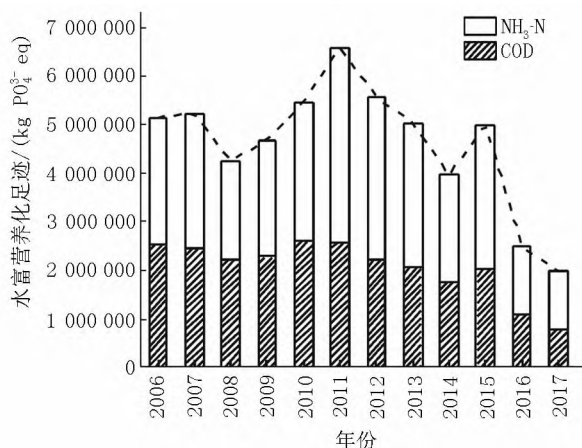


图6 江西省2006—2017年工业源水富营养化足迹

以工业源  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  为主要污染物,核算了江西省 2006—2017 年工业排放的水酸化足迹,结果如图 7 所示。由图 7 可知:水酸化足迹可分为 2 个阶段(2006—2010 年和 2011—2017 年),这 2 个阶段均呈下降趋势,但第 2 阶段初始值明显高于第 1 阶段,发生这种跳跃性变化主要是由于数据统计方式发生

改变<sup>[14]</sup>。从 2 个阶段的变化趋势可以看出水酸化足迹整体呈下降趋势。第 1 个阶段为 2006—2010 年,其水酸化足迹从  $7.04 \times 10^8 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$  减少到  $6.26 \times 10^8 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$ ,降低了 11.08%;第 2 个阶段为 2011—2017 年,其水酸化足迹从  $8.43 \times 10^8 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$  减少到  $3.37 \times 10^8 \text{ kg SO}_2 \text{ eq}$ ,显著降低了 59.99%。值得注意的是 2006—2017 年  $\text{SO}_2$  对水酸化足迹的贡献均显著高于  $\text{NO}_x$ ,同时  $\text{SO}_2$  引起的水酸化足迹降低量也显著高于  $\text{NO}_x$ ,这说明工业  $\text{SO}_2$  降低速率比  $\text{NO}_x$  的削减速率更快。

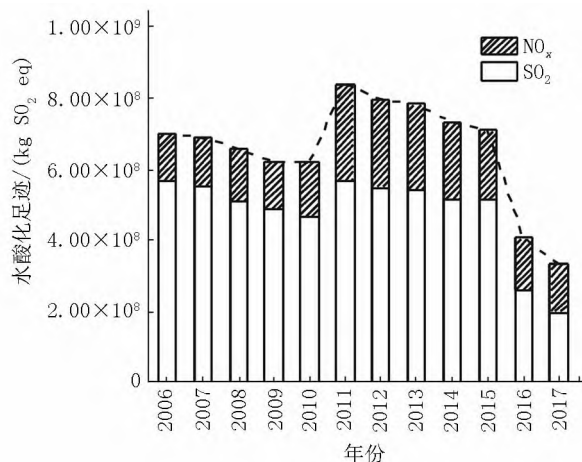


图7 江西省2006—2017年工业源水酸化足迹

以工业源 As、Pb、Cd、Cr、Hg 为主要污染物,核算了江西省 2006—2017 年工业排放的水生态毒性足迹,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出:2006—2010 年水生态毒性足迹总体呈上升趋势,由 2006 年的  $6.80 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O eq}$  上升到 2010 年的  $8.92 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O eq}$ ,上升了 31.18%;2010—2017 年总体呈下降趋势,下降到 2017 年的  $6.75 \times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O eq}$ ,降低了 24.33%。同时可以看出历年来对江西水生态毒性足迹贡献最显著的是 Cd,其他贡献依次为 Hg、Pb、Cr、As。

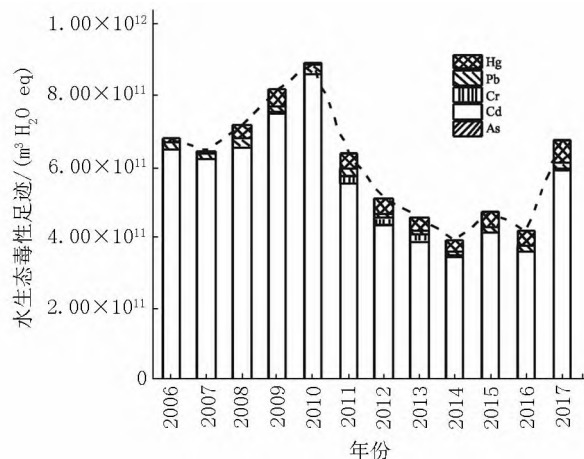


图8 江西省2006—2017年工业源水生态毒性足迹

### 3 结论和建议

基于水劣化足迹评价方法对江西省工业源水劣化足迹进行了核算与评价,其评价结果和建议如下:

1) 2017 年对江西省水富营养化状况影响最大的工业行业是有色金属冶炼和压延加工业,其次是造纸和纸制品业,再次是化学原料和化学制品制造业,工业污染物  $\text{NH}_3\text{-N}$  的影响略高于 COD; 对水酸化状况影响较大的行业是非金属矿物制品业与黑色金属冶炼和压延加工业,其中工业污染物  $\text{SO}_2$  的影响略大; 对水生态毒性状况影响最为突出的是有色金属矿采选业排放的 Cd。综合而言,有色金属冶炼和压延加工业、化学原料和化学制品制造业对水环境污染比较严重,是将来需要重点管控的行业。

2) 2017 年空间敏感性分析表明宜春市、赣州市和九江市受工业水劣化足迹影响较为突出。若江西省想进一步降低工业水劣化足迹的影响,则未来可提高上述关键行业关键污染物排放标准,或对上述关键设区市辖区内的产业结构进行转型升级,实现关键污染物排放量的减少。

3) 2006—2017 年江西省 3 种水劣化足迹均总体呈下降趋势,这表明江西省对工业污染物排放的减少工作成果显著。其中,水富营养化足迹与峰值相比降低了 70.06%; 水酸化足迹与峰值相比降低了 59.99%; 水生态毒性足迹与峰值相比降低了 24.33%。

### 4 参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 中国环境监测总站.
- [2] 胡绵好, 廖桂萱, 袁菊红, 等. 基于 DEA-CCA 模型的鄱阳湖生态经济区用水效率时空变化及影响因素分析 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2018, 42(4): 427-433.
- [3] Ma Xiaotian, Zhai Yijie, Zhang Ruirui, et al. Energy and carbon coupled water footprint analysis for straw pulp paper production [J]. Journal of Cleaner Production 2019, 233: 23-32.
- [4] Li Xiangzhi, Yang Yang, Xu Xu, et al. Air pollution from polycyclic aromatic hydrocarbons generated by human activities and their health effects in China [J]. Journal of Cleaner Production 2016, 112: 1360-1367.
- [5] Zhang Yanlu, Sun Mingxing, Hong Jinlan, et al. Environmental footprint of aluminum production in China [J]. Journal of Cleaner Production 2016, 133: 1242-1251.
- [6] Yan Yan, Jia Jia, Zhou Kang, et al. Study of regional water footprint of industrial sectors: the case of Chaoyang City, Liaoning Province, China [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2013, 20(6): 542-548.
- [7] 马道天. 我国水足迹量化模型构建与应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [8] 王圣云, 林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素: 水足迹与灰水足迹视角 [J]. 地理科学, 2021, 41(2): 290-301.
- [9] 王丽川, 侯保灯, 周毓彦, 等. 基于水足迹理论的北京市水资源利用评价 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 680-688.
- [10] Zhai Yijie, Shen Xiaoxu, Quan Taiyang, et al. Impact-oriented water footprint assessment of wheat production in China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 689: 90-90.
- [11] Hoekstra A Y. Virtual water trade: proceedings of the international expert meeting on virtual water trade. Value of water research report series No. 12 [R]. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002.
- [12] Hoekstra A Y. Human appropriation of natural capital: a comparison of ecological footprint and water footprint analysis [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1963-1974.
- [13] 王克, 田泽君, 王来力. 浙江省纺织工业水足迹核算与评价 [J]. 浙江理工大学学报, 2020, 43: 69-74.
- [14] 严岩, 贾学秀, 单鹏, 等. 基于水劣化足迹的城市发展的水环境效应评价: 以北京市为例 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(2): 779-785.
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 33859—2017 环境管理水足迹 原则、要求与指南 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 孙国栋, 文倚新, 刘春燕, 等. 江西省近 40 年地表水资源的诊断分析及趋势预测 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 1999, 23(2): 174-176.
- [17] 计勇, 白承荣, 张洁, 等. 鄱阳湖信江流域典型县域水资源承载力研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 656-660.
- [18] Heijungs RHP De, Guinée J B, Huppes G, et al. Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds (part 1) [M]. The Netherlands: Multicopy, Leiden, 1992: 43-46.
- [19] Roy Pierre-Olivier, Deschenes Louise, Margni Manuele.

Uncertainty and spatial variability in characterization factors for aquatic acidification at the global scale [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014,

19(4): 882-890.

[20] 江西省生态环境厅. 2006—2017 年环境统计年报 [R]. 南昌: 江西省生态环境厅.

## The Accounting and Evaluation of Industrial Source Water Degradation Footprint in Jiangxi Province

——Based on Data of Environmental Statistics Annual Report from 2006's to 2017's

JIANG Chi<sup>1</sup>, HUANG Zhen<sup>2</sup>

(1. Jiangxi Province Eco-environment Monitoring Center, Nanchang Jiangxi 330077, China;

2. Jiangxi Province Huagan Environmental Group Company Limited, Nanchang Jiangxi 330072, China)

**Abstract:** Based on the evaluation method of water degradation footprint, accounting and evaluation of water eutrophication footprint, water acidification footprint and water ecotoxicity footprint are analyzed on the characteristic pollutants discharged from different industrial industries in Jiangxi Province and in multiple time and space. The results show that the key industries that have a greater impact on the water eutrophication footprint of Jiangxi Province in 2017 are non-ferrous metal smelting and rolling processing industry, paper and paper product industry, chemical raw material and chemical product manufacturing industry, and the key pollutant is ammonia nitrogen ( $\text{NH}_3\text{-N}$ ). The key industries that have a greater impact on the water acidification footprint are the non-metallic mineral products industry and the ferrous metal smelting and rolling processing industry, and the key pollutant is  $\text{SO}_2$ . the most significant impact on the water ecological toxicity footprint is the non-ferrous metal mining and processing industry, and the key pollutant is Cd. In addition, the spatial dimension evaluation shows that Ganzhou City has the largest contribution to the water eutrophication footprint, and Yichun City has the most prominent impact on water acidification and water ecotoxicity footprint. Finally, the three types of water degradation footprints in Jiangxi Province show an overall downward trend from 2006 to 2017. The water eutrophication footprint is reduced by 70.06% compared with the peak value, the water acidification footprint is reduced by 59.99% compared with the peak value, and the water ecotoxicity footprint is reduced by 24.33% compared with the peak value.

**Key words:** water degradation footprint; water eutrophication; water acidification; water ecotoxicity; Jiangxi Province; industry

(责任编辑: 刘显亮)