

新疆灰水足迹评价

王立海, 汪周园, 钱 宝*

长江水利委员会水文局, 湖北 武汉
Email: 759118@qq.com, *jacer@163.com

收稿日期: 2021年9月9日; 录用日期: 2021年10月15日; 发布日期: 2021年10月24日

摘 要

为了量化工农业排污对新疆地区水资源的影响, 使用国际上通用的灰水足迹模型, 对新疆地区COD、总氮、总磷、氨氮及重金属等污染物的灰水足迹进行了评估。结果表明: 1) 新疆地区2012年~2017年的灰水足迹分别为1621、1621、1727、1554、383和349亿 m^3 。2) 2012年~2015年新疆地区的综合灰水足迹指数分别为1.80、1.70、2.38、1.67, 属于“很高”等级, 表明污染物会严重威胁到水生生态系统的健康稳定; 2016年~2017年的综合灰水足迹指数分别为0.35和0.34, 属于“中等”等级, 表明污染物对新疆水环境的影响虽然没有超出水体的自净能力, 但是其对于水生生态系统的潜在威胁不可忽视。3) 总氮是新疆水质性缺水的决定性指标; 而重金属类污染物对新疆地区水环境的影响较小。因此, 为了促进新疆地区经济社会与生态环境全面协调可持续发展, 应当加强氮污染治理, 削减进入水体的氮负荷。

关键词

新疆, 灰水足迹, 水资源管理, 水环境保护

The Grey Water Footprint Evaluation of Xinjiang Province

Lihai Wang, Zhouyuan Wang, Bao Qian*

Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan Hubei
Email: 759118@qq.com, *jacer@163.com

Received: Sep. 9th, 2021; accepted: Oct. 15th, 2021; published: Oct. 24th, 2021

Abstract

To quantify the influence of industrial and agricultural pollution discharge on water resources in Xinjiang region, the grey water footprint model is adopted in assessing pollutants such as COD, TN, TP,

作者简介: 王立海, 男, 高级工程师, 大学本科, 主要研究方向是水文水资源、水利信息化。

*通讯作者。

文章引用: 王立海, 汪周园, 钱宝. 新疆灰水足迹评价[J]. 水资源研究, 2021, 10(5): 525-532.
DOI: 10.12677/jwrr.2021.105057

NH₃-N and heavy metals. The results indicated: 1) From 2012 to 2017, the grey water footprint in Xinjiang was 162.1, 162.1, 172.7, 155.4, 38.3 and 34.9 billion m³, respectively. 2) From 2012 to 2015, the comprehensive grey water footprint in Xinjiang was 1.80, 1.70, 2.38 and 1.67, respectively, which belonged to the “very high” grade, indicating that the pollutants posed serious threat to health and stability of aquatic ecosystem; from 2016 to 2017, the comprehensive grey water footprint was 0.35 and 0.34, respectively, which belonged to the “medium” grade, indicating that pollutants had little influence on Xinjiang’s water environment, but its potential threat to aquatic ecosystem cannot be ignored. 3) TN was a decisive index to cause water quality-induced water shortage of Xinjiang; while heavy metals played a small role in aquatic environment. Therefore, to promote harmonious and sustainable development of economic society and ecological environment in Xinjiang, nitrogen pollution control should be strengthened and reduced the nitrogen dumped into water-body.

Keywords

Xinjiang, Grey Water Footprint, Water Resources Management, Water Environment Conservation

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

新疆维吾尔自治区深居内陆、远离海洋、气候干旱,是我国降水量最少的省份之一[1][2]。因此,水资源一直是制约新疆地区经济社会与生态环境全面协调可持续发展的重要因素[3]。

早在 2001 年,董新光等学者便根据新疆的水资源分布特征及利用状况,提出了新疆水资源短缺的五种类型:资源性缺水、工程性缺水、设施性缺水、管理性缺水和污染性缺水[4]。陈亚宁等人利用 77 个气象站近 50 年的水文气象资料,针对全球气候变化对塔里木河流域水资源的影响展开了研究[5]。结果表明:厄尔尼诺—南方涛动与塔里木河流域近 50 年的降水、径流之间缺少有明显的联系,塔河的水资源短缺和生态系统恶化主要是由人类活动造成的[5]。邓铭江等学者对天山北麓的水资源供需发展趋势进行了评估,并提出了相应的跨流域供水工程规划[6]。钟强针对新疆农业灌溉水有效利用系数不足的问题,开发了灌溉渠系水资源优化配置技术[7]。肖开提·阿不都热衣木针对新疆奎屯河流域的水资源高效利用,开发了相应的信息化管理系统[8]。

总体来看,目前新疆的资源性缺水问题已经得到了比较系统的研究;而且随着水利工程建设、节水设施的普及和水利信息化的发展,工程性缺水、设施性缺水、管理性缺水也得到了一定的缓解。然而值得注意的是,随着近年来农业和工矿业的快速发展,大量污染负荷被排放入河流和湖泊中,新疆的水质性缺水也愈发突出,对当地的水环境造成了极大压力,严重威胁到生态系统的健康稳定[9]。但是现有文献中,新疆的水质性缺水问题,仍缺乏系统性的评估。

为了准确量化新疆地区的水质性缺水,本研究将基于国际上通用的灰水足迹模型,对新疆地区化学需氧量、总氮、总磷、氨氮及重金属等污染物对水环境的影响进行评估,从而为新疆的水资源管理与水环境保护提供对策与建议。

2. 灰水足迹模型

灰水足迹是由荷兰学者 Hoekstra 教授提出的一种水质性缺水评价方法,它是指将污染负荷稀释至容许限制以下时所需要的虚拟水体积[10][11]。由于灰水足迹能够从水量的角度简洁而直观地污染物对水质的影响,因此它在世界各地的水资源管理与水环境保护中均得到了广泛的应用[10][11]。

设第 i 种污染物的排放负荷为 $x_i(t)$, 容许值为 c_i (mg/L), 本底值为 b_i (mg/L), 则污染物的灰水足迹 G_i (亿

m³)为[10] [11]:

$$G_i = \frac{x_i}{(c_i - b_i) \cdot 10^2}$$
 (1)

由于水体对不同污染物的稀释过程是独立的，因此区域综合灰水足迹 G 采用各污染物灰水足迹的最大值计算[10] [11]。

$$G = \max \{G_i\}$$
 (2)

Hoekstra 将第 i 种污染物的灰水足迹与区域水资源总量 W (亿 m³)的比值被定义为灰水足迹指数 P_i [10] [11]:

$$P_i = \frac{G_i}{W}$$
 (3)

相应的，区域综合灰水足迹指数 P 的计算方法为:

$$P = \max \{P_i\}$$
 (4)

早期研究中，通常以 $P_i > 1$ 作为污染负荷超标的判断条件。近年来，Yan 等学者基于复杂环境过程和不确定性分析，进一步提出了更详细的评价标准(如表 1 所示) [12] [13]。

Table 1. Grey water footprint index evaluation standard

表 1. 灰水足迹指数评价标准

等级	区间	环境意义
低	$P_i \leq 0.2$	污染物 i 对水环境的影响远远低于水体的自净能力，对水生生态系统的危害可以忽略不计
中	$0.2 < P_i < 0.8$	污染物 i 对水环境的影响虽然没有超出水体的自净能力，但是其对于水生生态系统的潜在威胁不可忽视
高	$0.8 \leq P_i \leq 1.2$	污染物 i 对水环境的影响具有超过水体自净能力的可能，对于水生生态系统具有较大威胁，需要发出预警
很高	$P_i > 1.2$	污染物 i 对水环境的影响远远超过水体的自净能力，会严重威胁到水生生态系统的健康稳定

3. 评价结果

本研究的数据引自国家统计局发布的统计年鉴[14]，新疆地区 2012 年~2017 年的主要污染物的排放负荷如表 2 所示。(注：由于 2018 年之后的排污负荷尚未公布，因此 2018 年~2020 年的灰水足迹暂不纳入评价。)

Table 2. Main pollutant load in the Xinjiang region

表 2. 新疆的主要污染物负荷

项目	单位	2012	2013	2014	2015	2016	2017
COD	万吨	67.92	67.24	67.02	66.03	23.54	19.87
氨氮	万吨	4.72	4.65	4.59	4.56	2.5	2.27
总氮	万吨	16.21	16.21	17.27	15.54	3.83	3.49
总磷	万吨	1.19	1.2	1.44	1.3	0.25	0.25
铅	千克	906.7	135	125.1	137.3	288.9	306.1
镉	千克	210.1	59.6	56.9	16.6	17.9	20.7
六价铬	千克	1690.3	1639	1009.3	526.4	60	15.7
砷	千克	1338.6	885.4	847.1	620.4	848.9	870.7

如表 2 所示，这 8 种污染物年排放负荷的变化趋势可以分为如下 3 类。

1) 持续下降型: COD、氨氮和六价铬等 3 种污染物的排放负荷在整个评价时段内(2012 年~2017 年)均呈现持续下降趋势。相比于 2012 年, COD、氨氮和六价铬 2017 年的排放负荷分别削减了 71%、52%、99%。

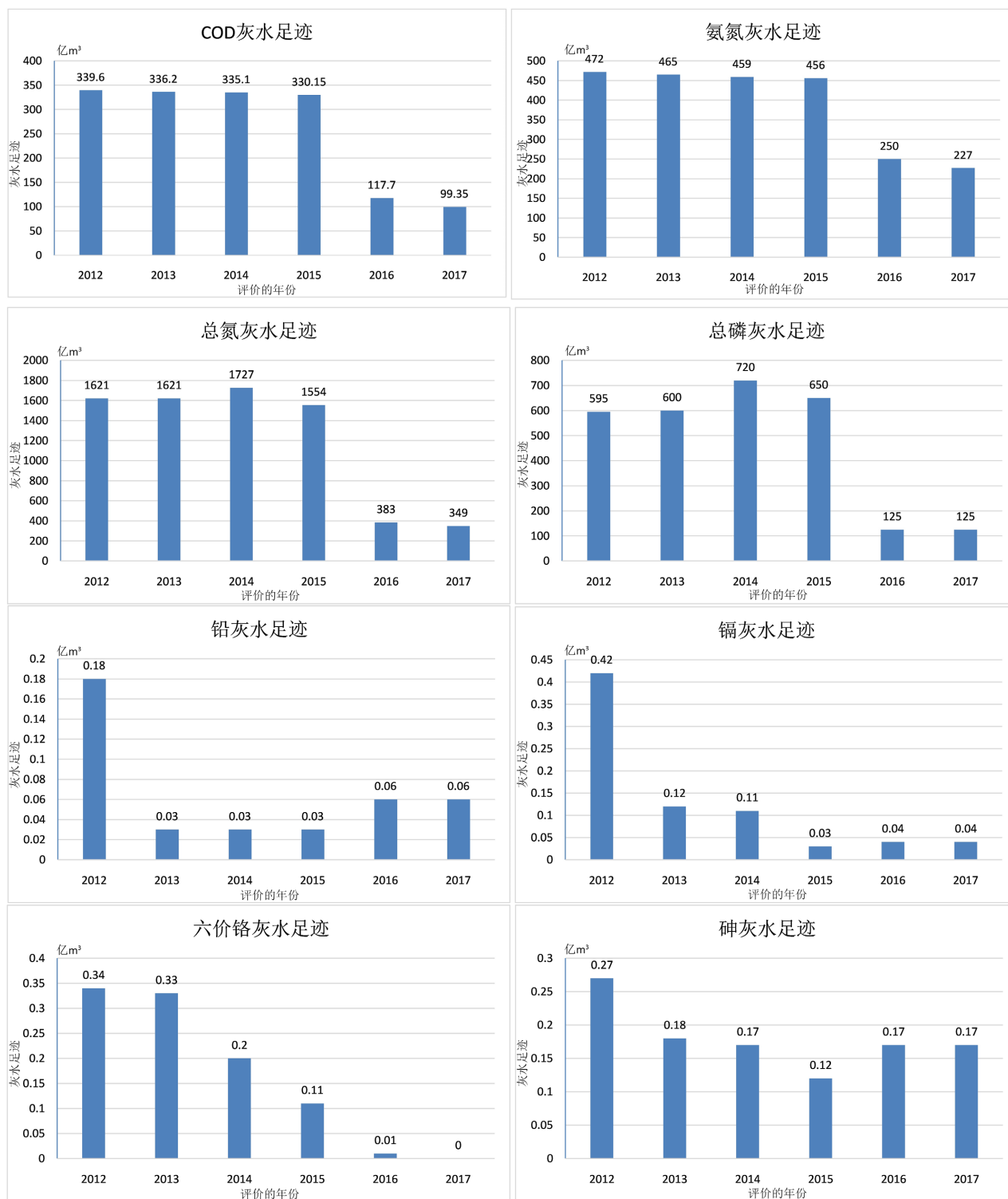


Figure 1. Grey water footprint of main pollutants in the Xinjiang region

图 1. 新疆地区主要污染物的灰水足迹

2) 先上升后下降型: 总氮、总磷等 2 种污染物的排放负荷在 2014 年之前呈上升趋势, 2014 年之后呈下降趋势。相比于 2014 年, 总氮、总磷 2017 年的排放负荷分别削减了 80%、83%。

3) 先下降后上升型: 铅、镉、砷等 3 种重金属污染物的排放负荷在 2015 年之前呈下降趋势, 但在 2015 年之后呈上升趋势。相比于 2014 年, 铅、镉、砷 2017 年的排放负荷分别增加了 123%、25%和 40%。

根据曾昭、刘俊国等学者的研究, 在我国的灰水足迹评价中, 与人为排放的污染负荷相比天然水体中的本底值几乎可以忽略不计, 而且评价标准可以近似取地表水环境质量标准中的 III 类水限值[15]。根据式(1)与式(2), 计算新疆地区主要污染物的灰水足迹和综合灰水足迹分别如图 1 和图 2 所示。

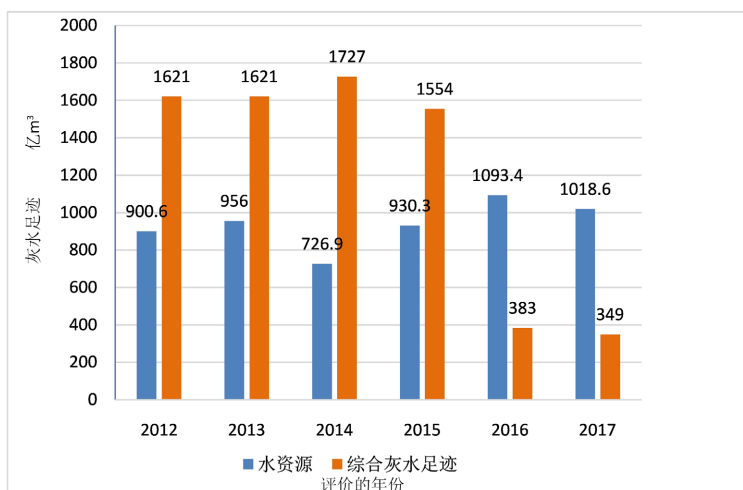


Figure 2. Comprehensive grey water footprint in the Xinjiang region
图 2. 新疆地区的综合灰水足迹

如图 1 和图 2 所示, 新疆地区 2012 年~2017 年的灰水足迹分别为 1621 亿 m^3 、1621 亿 m^3 、1727 亿 m^3 、1554 亿 m^3 、383 亿 m^3 、349 亿 m^3 ; 且各年度的决定性污染物(即灰水足迹最大的指标)均为总氮。

除总氮外, COD、氨氮、总磷的灰水足迹也均达到了百亿 m^3 级。其中总磷的灰水足迹年均值为 469 亿 m^3 , 约相当于总氮的 38%; 氨氮的灰水足迹年均值为 388 亿 m^3 , 约相当于总氮的 32%; COD 的灰水足迹年均值为 259 亿 m^3 , 约相当于总氮的 21%。

与耗氧污染物和营养盐类污染物相比, 重金属类污染物的灰水足迹极低。如图 2 所示, 铅、镉、六价铬、砷的灰水足迹年均值分别为 0.06 亿 m^3 、0.13 亿 m^3 、0.16 亿 m^3 、0.18 亿 m^3 , 不足总氮的 0.1%, 几乎处于可忽略的水平。

根据图 1 和图 2 中的灰水足迹和水资源总量, 结合式(3)~式(4), 计算新疆地区的灰水足迹指数如图 3 和图 4 所示。

如图 3 和图 4 所示, 新疆地区的综合灰水足迹指数由总氮决定。其中 2012 年~2015 年的综合灰水足迹指数均高于 1.2, 属于“很高”等级, 表明以总氮为主的污染物会严重威胁到水生生态系统的健康稳定; 2016 年~2017 年的综合灰水足迹指数分别为 0.35 和 0.34, 属于“中等”等级, 表明污染物对新疆水环境的影响虽然没有超出水体的自净能力, 但是其对于水生生态系统的潜在威胁不可忽视。

除总氮外, 2012 年~2015 年, COD、氨氮、总磷的灰水足迹指数超过了 0.2, 属于“中等”等级; 其中总磷 2014 年的灰水足迹指数甚至可以达到 0.99, 属于“高”等级。但是总体来看, 2015 年之后, COD、氨氮、总磷的灰水足迹指数均有显著下降, 其中 COD 和总磷的灰水足迹指数甚至均小于 0.2, 属于“低”等级。

与耗氧污染物和营养盐类污染物相比, 重金属类污染物的灰水足迹指数极低。如图 3 所示, 铅、镉、六价铬、砷的灰水足迹指数均不足 0.1, 属于“低”等级。这表明重金属对新疆地区对水环境的影响远远低于水体的

自净能力，对水生生态系统的危害可以忽略不计。

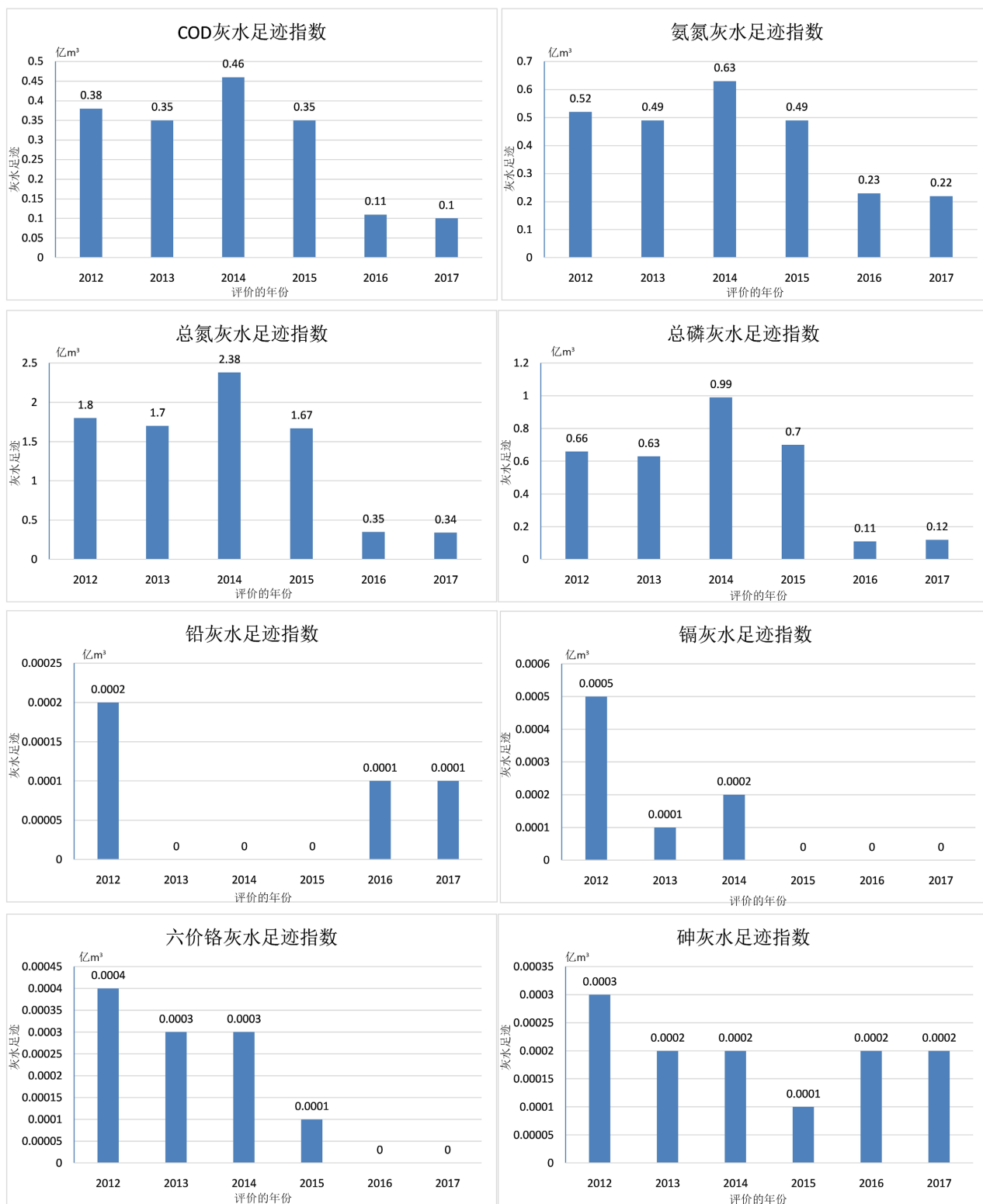


Figure 3. Grey water footprint index of main pollutants in the Xinjiang region

图 3. 新疆地区主要污染物的灰水足迹指数

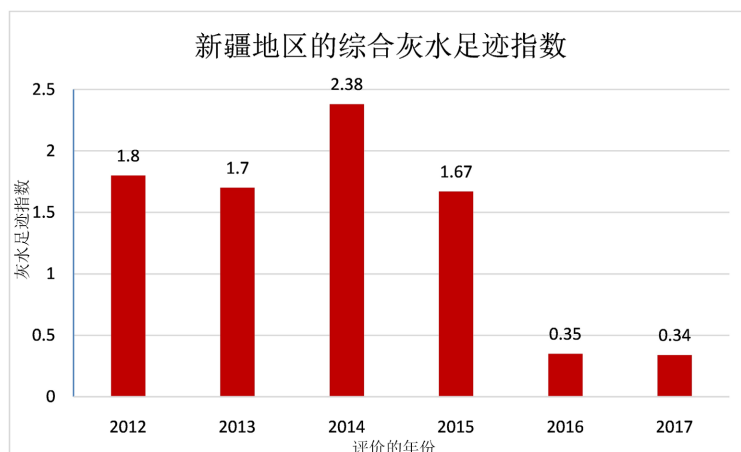


Figure 4. Comprehensive grey water footprint index in the Xinjiang region
图 4. 新疆地区的综合灰水足迹指数

值得注意的是,结合图 2 和图 4 可见,2016 年的灰水足迹和灰水足迹指数相比于 2015 年均有明显的突变。其中灰水足迹由 1554 亿 m^3 下降至 383 亿 m^3 ,降低了 75%;灰水足迹指数由 1.67 下降至 0.35,降低了一个等级。结合表 1 可知,这是由于污染物排放负荷的削减所致。我国污染负荷的削减往往与政府的水资源管理和生态环境保护政策密切相关。2015 年 4 月,国务院颁布了《水污染防治行动计划》(“水十条”)[16],其中明确提出要从“狠抓工业污染防治强化城镇生活污染治理,推进农业农村污染防治等方面全面控制污染物排放”,“2016 年底前,全部取缔不符合国家产业政策的小型造纸、制革、印染、染料、炼焦、炼硫、炼砷、炼油、电镀、农药等严重污染水环境的生产项目。”因此,由表 1 可见,在新疆的四种主要污染物中,相比于 2015 年,2016 年的 COD 排放负荷由 66.03 万吨削减至 23.54 万吨,降低了 64%;氨氮排放负荷由 4.56 万吨削减至 2.5 万吨,降低了 45%;总氮排放负荷由 15.54 万吨削减至 3.83 万吨,降低了 75%;总磷排放负荷由 1.3 万吨削减至 0.25 万吨,降低了 81%。相应的,相比于 2015 年,2016 年的灰水足迹和灰水足迹指数也有大幅下降。

4. 结论

新疆地区 2012 年~2017 年的灰水足迹分别为 1621 亿 m^3 、1621 亿 m^3 、1727 亿 m^3 、1554 亿 m^3 、383 亿 m^3 、349 亿 m^3 。其中 2012 年~2015 年的综合灰水足迹指数分别为 1.80、1.70、2.38、1.67,属于“很高”等级,表明污染物会严重威胁到水生生态系统的健康稳定;2016 年~2017 年的综合灰水足迹指数分别为 0.35 和 0.34,属于“中等”等级,表明污染物对新疆水环境的影响虽然没有超出水体的自净能力,但是其对于水生生态系统的潜在威胁不可忽视。

总氮是新疆水质性缺水的决定性指标;而重金属类污染物对新疆地区对水环境的影响远远低于水体的自净能力,对水生生态系统的危害可以忽略不计。因此,为了促进新疆地区经济社会与生态环境全面协调可持续发展,应当加强氮污染治理,削减进入水体的氮负荷。

基金项目

美丽中国生态文明建设科技工程专项资助(XDA23040103);湖南省水利科技项目资助(XSKJ2019081-30)。

参考文献

- [1] 刘佳骏,董锁成,李泽红.中国水资源承载力综合评价研究[J].自然资源学报,2011,26(2):258-269.
LIU Jiajun, DONG Suocheng and LI Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese)

- [2] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331-1341.
CHEN Yaning, XU Changchun, YANG Yuhui, *et al.* Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1331-1341. (in Chinese)
- [3] 周华荣, 潘伯荣, 海热提·涂尔逊. 新疆生态环境现状综合评价研究[J]. 干旱区地理, 2001, 24(1): 23-29.
ZHOU Huarong, PAN Borong and HAI Reti. A synthetical evaluation on the present situation of the ecological environment in Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2001, 24(1): 23-29. (in Chinese)
- [4] 董新光, 姜卉芳, 邓铭江. 新疆水资源短缺原因分析[J]. 新疆农业大学学报, 2001, 24(1): 12-17.
DONG Xinguang, JIANG Huifang and DENG Mingjiang. Analysis on reasons causing shortage of water resources in Xinjiang. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2001, 24(1): 12-17. (in Chinese)
- [5] 陈亚宁, 徐宗学. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(11): 1047-1053.
CHEN Yaning, XU Zongxun. Potential impact of global climate change on water resources in the Tarim River basin in Xinjiang. *Science in China: Earth Science*, 2004, 34(11): 1047-1053. (in Chinese)
- [6] 邓铭江, 章毅, 李湘权. 新疆天山北麓水资源供需发展趋势研究[J]. 干旱区地理, 2010, 33(3): 3-12.
DENG Mingjiang, ZHANG Yi and LI Xiangquan. Development trend of water supply and water demand in the north of the Tianshan Mountains Xinjiang. *Arid Land Geography*, 2010, 33(3): 3-12. (in Chinese)
- [7] 钟强. 新疆灌溉渠系水资源优化配置技术分析[J]. 水科学与工程技术, 2011(2): 24-26.
ZHONG Qiang. Technology analyses of water resources optimal allocation in Xinjiang irrigation canal system. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2011(2): 24-26. (in Chinese)
- [8] 肖开提·阿不都热衣木. 新疆奎屯河流域水资源管理信息系统的初步开发[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 101-104.
XIAO Kaiti. Development of water resources management information system for Kuitun River basin in Xinjiang. *Water Resources Protection*, 2010, 26(6): 101-104. (in Chinese)
- [9] 常玉婷, 范武刚, 安海燕. 新疆干旱区地表水环境质量变化趋势分析[J]. 干旱环境监测, 2021, 35(2): 75-81.
CHANG Yuting, FAN Wugang and AN Haiyan. Analysis on the changing trend of surface water environmental quality in arid area of Xinjiang. *Arid Environmental Monitoring*, 2021, 35(2): 75-81. (in Chinese)
- [10] MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y. The green, blue, and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8(1): 1577-1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>
- [11] MEKONNEN, M. M., HOEKSTRA, A. Y. Global gray water footprint and water pollution levels related to anthropogenic nitrogen loads to fresh water. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(21): 12860-12868.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03191>
- [12] 闫峰, 朱语欣, 李世曙, 等. 基于不确定分析的改进灰水足迹模型及应用[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 36-39.
YAN Feng, ZHU Yuxin, LI Shishu, *et al.* Improved grey water footprint model and its application based on uncertainty analysis. *Water Resources and Power*, 2020, 38(4): 36-39. (in Chinese)
- [13] YAN, F., KANG, Q., WANG, S., *et al.* Improved grey water footprint model of noncarcinogenic heavy metals in mine wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284(3): 125340. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125340>
- [14] 国家统计局. 中国统计年鉴[R]. 2018.
National Bureau of Statistics. *China statistical yearbook*. 2018. (in Chinese)
- [15] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169-1178.
ZENG Zhao, LIU Junguo. Historical trend of grey water footprint of Beijing. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7): 1169-1178. (in Chinese)
- [16] 中国环境报. 水污染防治行动计划[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2015(12): 26-37.
China Environmental News. Action plan for water pollution prevention and control. *Bulletin of the State Council of the People's Republic of China*, 2015(12): 26-37. (in Chinese)