

杜玲, 徐长春, 吴尧, 等. 河北省种植业水污染足迹初报[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 286–293.

DU Ling, XU Chang-chun, WU Yao, et al. Water degradation footprint of crop production in Hebei Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2): 286–293.

河北省种植业水污染足迹初报

杜玲¹, 徐长春², 吴尧¹, 王猛¹, 陈阜^{1*}

(1. 中国农业大学农学院/农业部农作制度重点实验室, 北京 100193; 2. 农业部科技发展中心, 北京 100122)

摘要:为进一步评估种植业化肥投入引发水污染对应的环境影响, 本文利用水足迹理论结合统计数据, 采用 Recipe 生命周期影响评价法对河北省 1995—2014 年 11 个地级市的种植业水污染足迹进行研究。结果表明, 2014 年河北省农作物单位面积施 N 量和施 P 量分别比 1995 年提高了 36.3%、52.5%, 1995—2014 年间秦皇岛的农作物单位面积年均施 N 量最高(335.4 kg·hm⁻²), 邯郸的农作物单位面积年均施 P 量最高(119.1 kg·hm⁻²); 比较 1995、2004、2014 三年各地市的施肥总量, 石家庄农作物 N 肥施用总量三年均列首位, 沧州 N 肥施用总量增幅最大; 邯郸农作物 P 肥施用总量三年均列首位, 承德 P 肥施用总量增幅最大; 近 20 年石家庄的农作物单位面积水污染足迹(wdf)均值最高(2.350 ML·H₂Oe·hm⁻²), 其次是秦皇岛和邯郸, 张家口最低, 但秦皇岛的 wdf 年际增长最显著; 比较各地市在 1995、2004 和 2014 年种植业区域水污染足迹(WDF), 各地市的 WDF 在三年里均呈增加趋势, 其中石家庄的 WDF 三年均值最高, 在 1995、2004、2014 年均处 I 级区, 邯郸的 WDF 均值位于其次, 并在 2004、2014 年升入 I 级区, 且 2014 年邯郸的 WDF 超过石家庄居全省首位, 秦皇岛的 WDF 增长比例最大, 2014 年的 WDF 比 1995 年增长了 77.4%, 而石家庄 2014 年 WDF 比 1995 年增长 26.7%, 在所有地市中其增长比例最小。本研究为河北省分类指导各地市的农业水资源优化及可持续利用提供依据。

关键词:水足迹; 生命周期影响评价; 水污染; 种植业; Recipe

中图分类号: S276.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)02-0286-08 **doi:** 10.11654/jaes.2017-0987

Water degradation footprint of crop production in Hebei Province

DU Ling¹, XU Chang-chun², WU Yao¹, WANG Meng¹, CHEN Fu^{1*}

(1. Key Laboratory of Farming System, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Science and Technology Development Center, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Beijing 100122, China)

Abstract: To evaluate the environmental impacts of the degradative water caused by fertilizer application in cropping systems, both historical data and the water footprint theory were adopted in the current study. Specifically, the Recipe life cycle assessment method was used to evaluate the water degradation footprint in cropping systems in the 11 cities of Hebei Province from 1995 to 2014. Our results showed that the average application rate of N and P fertilizers in crop production increased by 36.3% and 52.5%, respectively, across Hebei Province from 1995 to 2014. During this period, the annual N application per hectare was highest in Qinhuangdao (335.4 kg·hm⁻²), while the annual P application per hectare was highest in Handan (119.1 kg·hm⁻²). When focusing on fertilizer application in each city in the years of 1995, 2004, and 2014, N application was found to be greatest in Shijiazhuang and increased at the fastest rate in Cangzhou, while P application was greatest in Handan and increased at the fastest rate in Chengde. In the last 20 years, the annual mean water degradation footprint per unit (wdf) was found to be highest in Shijiazhuang (2.350 ML·H₂Oe·hm⁻²), followed by Qinhuangdao and Handan, and was lowest in Zhangjiakou; the wdf significantly increased in Qinhuangdao. The regional water degradation footprint (WDF) increased for all cities when compared for 1995, 2004, and 2014. The average WDF was highest in Shijiazhuang, which was in the first-level area for all years, fol-

收稿日期: 2017-07-14 录用日期: 2017-09-19

作者简介: 杜玲(1983—), 女, 安徽人, 博士研究生, 主要从事节水农业和水足迹研究。E-mail: duling@cau.edu.cn

* 通信作者: 陈阜 E-mail: chenfu@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300201)

Project supported: The National Key Research Projects(2016YFD0300201)

lowed by Handan, which was in the first-level area in 2004 and 2014; the WDF was highest in Handan in 2014. In addition, the increase ratio of WDF was largest in Qinhuangdao, which increased by 77.4% from 1995 to 2014, whereas the increase was smallest in Shijiazhuang, at only 26.7% from 1995 to 2014. In general, this study can provide some evidence for the optimization and sustainable application of agricultural water resources in each city in Hebei Province.

Keywords: water footprint; life cycle assessment; water degradation; crop production; Recipe

水资源短缺与水污染已经成为制约中国可持续发展的两大瓶颈问题^[1-2]。河北省作为我国重要的粮食生产区,1995—2014年这20年间全省粮食产量提高22.7%,而化肥施用量相应提高52.1%^[3],以2014年为例,河北省小麦单位面积化肥施用量达450 kg·hm⁻²,比全国平均水平高出11.1%,化肥的高投入使随之产生的水资源污染问题日益严重,因此,在农业绿色发展和供给侧结构性改革的背景下,研究河北不同地区农作物种植水污染问题,对河北的水资源可持续利用以及生态环境的协调发展有重要意义。

“水足迹”是衡量生产者或消费者直接和间接使用水资源量的指标^[4],可用来核算直接和间接的水资源消耗和污染,目前在水资源研究领域得到了较为广泛应用^[5-7]。Hoekstra等^[8]和徐长春等^[9]总结了基于虚拟水的水足迹计算方法,2014年国际标准化组织发布了ISO 14046水足迹计算国际标准,明确将水足迹指标分为水消耗和水污染两部分^[10]。Ridoutt等^[11]曾提出采用水资源压力指数计算消耗水当量,体现农作物种植的水资源消耗对环境的影响,采用Recipe生命周期评价法(Life Cycle Assessment, LCA)来计算水污染足迹,体现农作种植中化肥的使用带来的环境影响,可将二者所带来的环境影响进行比较。目前针对水污染的水足迹研究一般采用灰水足迹作为评价指标,多是采用临界稀释法来计算^[12-13],但存在的问题是研究结果仅能衡量水污染的体积而不能反映水污染对当地环境的影响程度。随着水足迹理论方法的不断完善,基于生命周期评价的水足迹计算方法得到越来越多的应用^[14-17],该研究方法可反映产品、过程或组织的水资源消耗与污染造成的潜在环境影响。

Recipe作为一种生命周期影响评价的方法^[18],列举了一个产品在整个生命周期中各类物质的投入造成各类影响的分类指标,在中端水平(Midpoint level)上列举了具体的18项影响指标,后又将这18项影响指标进行分类,在终端水平(Endpoint level)上,划分成三大影响指标,即人类健康、生态系统、资源成本,影响指标的体现方式是采用生态系统中物种的变化来表示。采用Recipe方法来计算农产品生命周期中

的水污染是水足迹研究的一个创新方法。本文以河北省为例,在分析河北各地市施肥状况的基础上,计算河北各地市1995—2014年种植业引起的单位面积水污染足迹,同时对各地市不同年代的区域水污染足迹进行比较分析,为下一步河北地区的种植业水资源优化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 区域概况

河北地处我国中纬度地带,属半干旱、半湿润气候带,暖温带大陆性季风气候,光热资源丰富,四季变化明显,雨热同季。冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。年平均气温11.5~12.5℃,积温4100~5300℃,无霜期176~205 d,年降水量500~800 mm,降雨季节性分布不均,主要集中在夏季。河北地区粮食作物以冬小麦、夏玉米为主,经济作物以棉花为主,是典型的棉粮产区。

1.2 研究方法

1.2.1 单位面积水污染足迹(water degradation footprint, wdf)

根据Recipe方法中的影响分类,农作物生长过程中施用的N、P肥料未被作物吸收利用而流失产生的影响主要包括水体富营养化、土壤毒性、淡水毒性、海水毒性等,每一类影响指标都有具体的影响系数,另外,农药的使用也会产生相应的环境影响,但鉴于数据的可获得性,以及前人的研究中农药造成的水污染远小于N、P肥流失造成的水污染,此处忽略不计^[19]。

单位面积水污染足迹的计算公式如下:

$$wdf = \frac{Recipe_{(N)} + Recipe_{(P)}}{Recipe_{(global)}} \quad (1)$$

式中:wdf为单位面积水污染足迹,ML·H₂Oe·hm⁻²;Recipe_(N)和Recipe_(P)分别为N、P产生环境影响值,ReCiPe,Recipe_(global)为1 L淡水的全球平均环境影响值,ReCiPe·(L H₂Oe)⁻¹。

根据Recipe 2015报告中提供的参数,经过标准化系数修正,并按照生态系统影响在整个影响中占40%的比例,可计算出在生命周期影响评价的终端水

平上, 1 kg P 对应的影响值为 $0.912 \text{ ReCiPe} \cdot \text{kg}^{-1}$, 另外, 根据 Seppälä 等^[20]和 Huang 等^[21]的研究, N 产生的水体富营养化影响是 P 的 0.137 倍, 则 1 kg N 对应的影响值为 $0.125 \text{ ReCiPe} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 $\text{Recipe}_{(\text{global})}$ 为 $1.86 \times 10^{-6} \text{ ReCiPe} \cdot (\text{L H}_2\text{Oe})^{-1}$, 因此公式(1)进而可描述为:

$$\text{wdf} = \frac{0.125 \times \text{TN} \times \lambda_N + 0.912 \times \text{TP} \times \lambda_P}{1.86 \times 10^{-6}} \quad (2)$$

式中: TN 为单位面积施用的纯 N 量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; TP 为单位面积施用的纯 P 量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; λ_N 和 λ_P 分别为 N 和 P 的流失率。

1.2.2 区域水污染足迹(Water Degradation Footprint, WDF)

区域水污染足迹的计算方法如下:

$$\text{WDF} = \text{wdf} \times S \quad (3)$$

式中: WDF 表示区域水污染足迹, $\text{Ml} \cdot \text{H}_2\text{Oe}$; S 表示区域的农作物播种面积, hm^2 。

1.3 数据来源

各地市历年的农作物施肥折纯量来源于《河北农村统计年鉴》^[9], 各地市 N、P 肥的流失率由《河北省农业污染源调查与评价》中的数据折算而成^[22], 见表 1。

2 结果与分析

2.1 各地市农作物单位面积施肥量

河北省各地市 1995—2014 年农作物单位面积施 N 量变化情况见图 1。1995 年河北省农作物单位面积施 N 量为 $178.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2014 年该值提高了 36.3%,

达到 $243.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其中, 秦皇岛的农作物单位面积施 N 量在 1995—2014 年年均值最高, 达 $335.4 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 石家庄和唐山的施 N 量紧随其后, 分别为 323.2 、 $300.9 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 邯郸、保定、廊坊的年均单位面积施 N 量相近, 均在 $230 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 左右, 邢台、承德、沧州、衡水的农作物年均施 N 量在 $160 \sim 200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间, 张家口的施 N 量最小, 仅 $79.7 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。另外, 秦皇岛的农作物单位面积施 N 量增长最快, 2014 年比 1995 年增长了 77.7%, 邯郸、衡水、张家口的增幅在 40%~44% 之间, 其他各地市增长幅度在 18%~36% 之间。

河北省各地市 1995—2014 年农作物单位面积施 P 量变化情况见图 2。1995 年河北省农作物单位面积施 P 量为 $55.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 2014 年该值提高了 52.5%, 达到 $84.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从图 2 可看出, 邯郸的农作物单位面积施 P 量一直最高, 年均施 P 量达 $119.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 张家口的年均施 P 量最小, 为 $27.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其他地市的农作物单位面积施 P 量大小排序为石家庄、秦皇岛、邢台、衡水、保定、唐山、沧州、廊坊、承德, 另外, 承德、张家口、秦皇岛在 2014 年的单位面积施 P 量均比 1995 年增长一倍多, 唐山的单位面积施 P 量也增长了 88.8%, 其他地市的农作物单位面积施 P 量也有一定的增长, 增长幅度最小的是石家庄, 为 16.1%。

2.2 各地市农作物种植施肥总量

比较河北省各地市在 1995、2004 和 2014 年农作物种植 N 施肥总量(见图 3), 由图可知, 石家庄、保

表 1 河北省各地市农作物种植肥料流失率

Table 1 Fertilizer loss index during crop cultivation in different cities of Hebei Province

项目	石家庄	秦皇岛	邯郸	唐山	保定	邢台	廊坊	衡水	承德	沧州	张家口
N 流失率	0.068	0.045	0.067	0.064	0.067	0.065	0.079	0.067	0.048	0.079	0.067
P 流失率	0.017	0.010	0.016	0.013	0.014	0.015	0.014	0.015	0.010	0.016	0.014

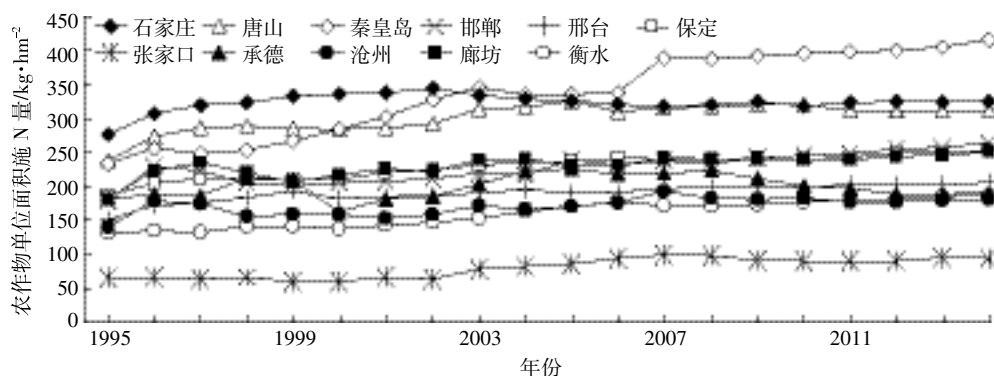


图 1 1995—2014 年河北省各地市农作物单位面积施 N 量变化

Figure 1 N fertilizer application rate per unit in different cities of Hebei Province from 1995 to 2014

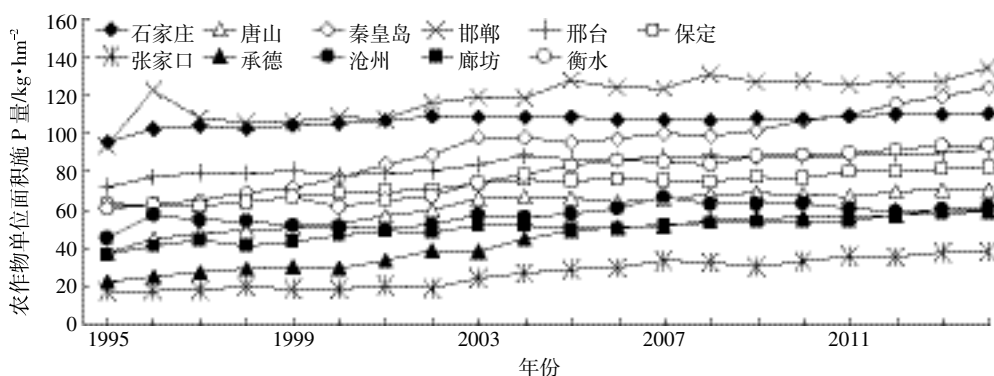


图2 1995—2014年河北省各地市农作物单位面积施P量变化

Figure 2 P fertilizer application rate per unit in different cities of Hebei Province from 1995 to 2014

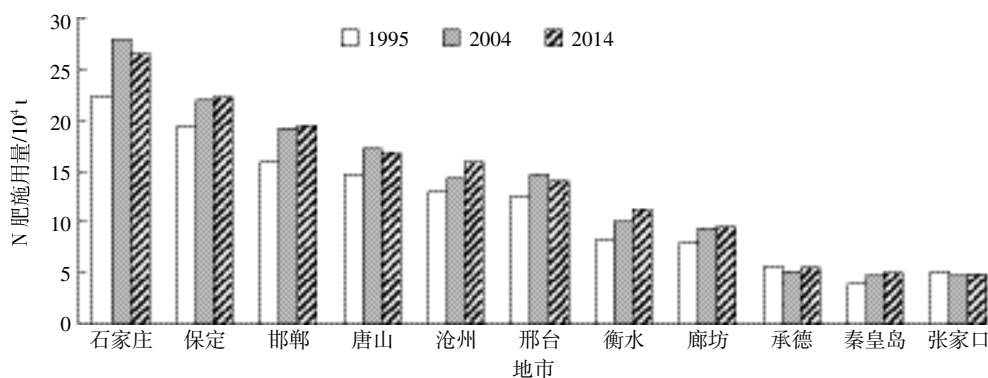


图3 1995、2004和2014年河北省各地市农作物种植施N肥总量

Figure 3 N fertilizer application rate in different cities of Hebei Province in 1995, 2004 and 2014

定、邯郸是3年中N肥施用总量均排前三的地市,承德、秦皇岛、张家口因农作物种植面积有限,N肥施用总量较少;从施用量变化趋势来看,保定、邯郸、沧州、衡水、廊坊和秦皇岛的N肥施用总量呈递增趋势,其中,沧州的N肥施用总量提高幅度最大,2014年比1995年提高了22.7%;石家庄、唐山、邢台的N肥施用量在2004年最高,承德和张家口的N肥施用量在2004年最低。

比较河北省各地市在1995、2004和2014年农作物种植P肥施用总量(图4)可知,邯郸、石家庄、邢台是3年中P肥施用总量均排前三的地市,邯郸3年P肥施用量均值达 9.9×10^4 t,承德、秦皇岛因农作物种植面积有限,P肥施用总量较少,廊坊的P肥施用总量与这两个地市相当。从施用量变化趋势来看,衡水、沧州、张家口、廊坊和承德5个地市的P肥施用总量呈递增趋势,其中,承德的P肥施用总量提升最大,3年里增长了1.8倍,其次是衡水,2014年的P肥施用量比1995年提升60.8%;邯郸、石家庄、邢台、唐山、秦皇岛的P肥施用量在2004年最高;保定的P肥施用量在1995年和2004年相当,均为 6.1×10^4 t,2014

年减少至 5.8×10^4 t。

2.3 各地市单位面积水污染足迹变化

从图5可看出,在2006年以前石家庄的农作物种植单位面积水污染足迹wdf一直处于最高,但在2006年以后,秦皇岛的wdf持续升高并超过石家庄,成为河北wdf最高的地市。比较各地市wdf的年际变化,发现秦皇岛的年际增长率最高,2014年的wdf比1995年提高91.7%,其次是张家口和衡水,20年间wdf分别提高73.2%和63.9%,而石家庄的wdf增长率最低,20年间提高了21.0%,其他地市的wdf增长率在30%~50%之间。各地市的wdf年际均值比较(表2),石家庄最高,为 $2.350 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe} \cdot \text{hm}^{-2}$,其次是秦皇岛和邯郸,张家口最低,石家庄的年均wdf是张家口的4倍。

2.4 各地市区域水污染足迹变化

河北省各地市1995、2004、2014这3年基于农作物种植的区域水污染足迹WDF如图6所示。按照水污染足迹的数值进行等级划分:I级区 $WDF > 1800 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe}$, II级区 $1800 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe} > WDF > 1401 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe}$, III级区 $1400 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe} > WDF > 901 \text{ MI} \cdot \text{H}_2\text{Oe}$, IV级区

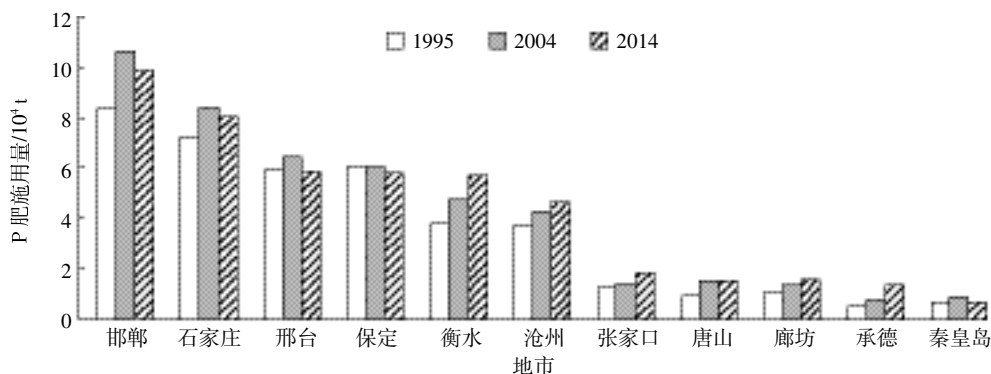


图4 1995、2004和2014年河北省各地市农作物种植施P肥总量

Figure 4 P fertilizer application rate in different cities of Hebei Province in 1995, 2004 and 2014

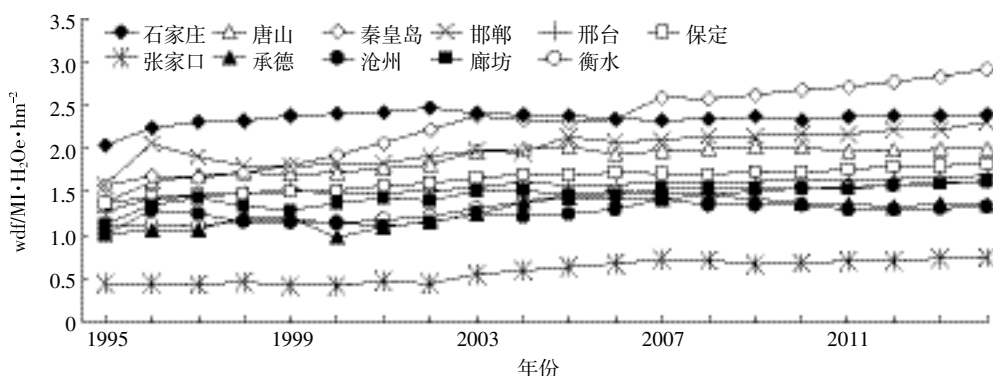


图5 1995—2014年河北省各地市单位面积水污染足迹变化

Figure 5 wdf in different cities of Hebei Province from 1995 to 2014

表2 河北省各地市农作物单位面积水污染足迹均值(MI·H₂Oe·hm⁻²)Table 2 Annual average wdf in different cities of Hebei Province(MI·H₂Oe·hm⁻²)

项目	石家庄	秦皇岛	邯郸	唐山	保定	邢台	廊坊	衡水	承德	沧州	张家口
wdf 均值	2.350	2.287	2.017	1.868	1.642	1.558	1.461	1.365	1.268	1.250	0.585
年际变化拟合斜率	0.006	0.072	0.028	0.026	0.022	0.016	0.018	0.031	0.021	0.012	0.020
R ²	0.188	0.966	0.770	0.731	0.936	0.845	0.773	0.938	0.624	0.516	0.863
P	0.055 9	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	<0.000 1	0.000 4	<0.000 1

900 MI·H₂Oe>WDF>601 MI·H₂Oe, V级区 600 MI·H₂Oe>WDF>300 MI·H₂Oe,由图6可见,1995年 仅石家庄进入I级区,保定和邯郸处于II级区,邢台、 沧州、唐山处于III级区,衡水和廊坊处于IV级区, V级区包括承德、秦皇岛和张家口;2004年,各地市的 WDF均升高,邯郸和保定升入I级区,邢台、唐山升 入II级区,衡水升入III级区,其他各地市的WDF虽 升高,但各地市所处等级没有变化;到了2014年,各 地市的水污染状况进一步加重,沧州的WDF升入II 级区,秦皇岛的WDF升入IV级区,其他各地市所处 等级未变化。

总体来看,各地市在这3年里的WDF均呈增长

趋势,其中,秦皇岛的WDF增长比例最大,2014年 比1995年增长了77.4%,其次是衡水,增长比例为 66.7%,而WDF3年均值最高的为石家庄,2014年 WDF比1995年增长26.7%,在所有地市中增长比例 最小。

3 讨论

本文采用Recipe生命周期环境评价法,为水污 染足迹的计算提供了具体方法。该方法有效量化了化 肥施用产生的环境影响,并实现了将水污染和水资源 消耗对应的水足迹指标在同一量纲上进行加和、比 较。目前的许多研究一般是从水消耗和水污染对环境

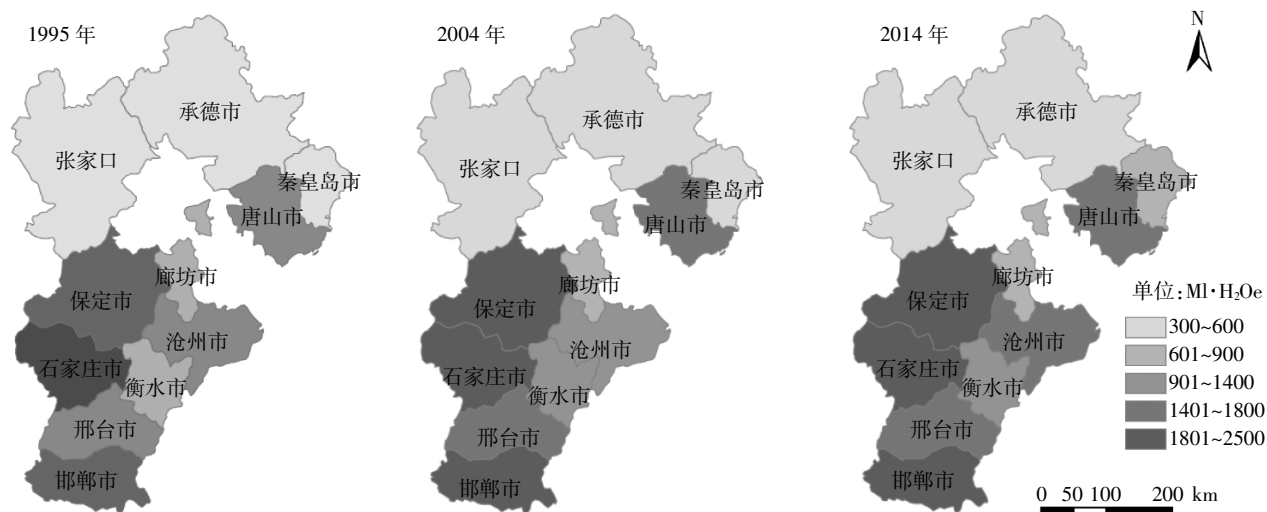


图6 1995、2004和2014年河北省各地市区域水污染足迹

Figure 6 WDF in different cities of Hebei Province in 1995, 2004 and 2014

影响两个角度分别来探讨水资源利用问题,如吴佩林^[23]在比较我国各省市的水资源压力分析中,把河北定义为生态压力型水资源紧缺区,徐长春^[24]使用生命周期评价的方法计算玉米在不同地区的水足迹,发现在东北平原生产1 kg玉米消耗的水资源对环境造成的影响远小于在华北平原生产1 kg玉米造成的影响,孙才志等^[25]在比较中国省际灰水足迹时,认为农业对总灰水足迹的贡献率最高,而河北作为农业大省其灰水足迹排在全国第三位。本研究的研究结果可与水消耗对环境的影响值直接进行加和,即可将水污染足迹与水消耗足迹进行统一,在评价某一作物在不同地区种植时利用水资源所带来的环境影响会更加全面、科学。目前国内学者多采用临界稀释法计算灰水足迹,用来反映水污染所造成的潜在“间接耗水量”^[26-29],并且在计算过程中主要以N肥作为污染物来计算种植业的水污染状况^[30-32]。一方面计算结果不能体现水污染对环境带来的影响,不能与水消耗对环境产生的影响进行比较,另一方面,仅以N肥作为计算指标,分析结果不能充分、全面地表达肥料对环境产生的影响。

依据本研究结果,各地市WDF在1995、2004、2014年的比较中均呈增加趋势,但石家庄在2004、2014年的WDF近似,分别为2 396.2、2 400.3 $\text{ML}\cdot\text{H}_2\text{Oe}$,而石家庄在这两年的作物种植面积相当,可知2004—2014这10年来石家庄种植业的水污染状况得到了一定的控制;另外,在1995年和2004年石家庄的WDF均居全省首位,2014年邯郸的WDF超过了石家庄,达到2 448 $\text{ML}\cdot\text{H}_2\text{Oe}$,而在2014年两个地

市的wdf相差无几,主要是因为2014年邯郸的作物种植面积大于石家庄,最终导致邯郸的WDF超过石家庄;对于非主要种植区的唐山,其WDF也达到了Ⅱ级,这主要是由于唐山地区的农作物种植面积虽然与沧州等地市相比较少,但其单位面积化肥施用量较高,wdf值也相对偏高,导致唐山在2004、2014年均进入了Ⅱ级区。河北省各地市区域水污染足迹增加,即农作物种植引发水污染的环境影响日趋严重,这一方面是由于各地市单位面积的水污染足迹增加,如秦皇岛,虽然播种面积年均变化不大,但因农作物种植单位面积水污染足迹增加显著,最终导致该地区WDF增加;另一方面,部分地市农作物种植面积的扩大,也会引起WDF的增加。石家庄和邯郸是河北省各地市中种植业水污染足迹最大的两个地市,该结果与牛子宁^[33]研究的河北农业污染源分析结果相近,石家庄和邯郸均是河北省农业污染物排放量比重较大的地区,另外,肥料流失率也是造成水污染严重的一个重要因素,石家庄和邯郸的肥料流失率在11个地市中均排在前列。

河北省各地市因农作物生产而产生的水污染问题日趋严重,一个地区农作物的种类和种植面积都会影响该地区作物生产的耗水量以及水资源污染量,合理的种植结构调整,能在一定程度上缓解区域水资源污染和匮乏的问题^[34]。河北省是国家重点产粮区,为保障国家粮食安全,确保粮食产量是大前提,为减少农业生产的污染水带来的环境影响,最有效的途径就是提高水分及肥料利用效率,改进农作物生产技术,调整优化种植模式,以减少水资源的消耗和污染。在

下一步工作中将针对具体作物的水资源可利用足迹 (Water ability footprint) 与水污染足迹进行统一核算分析, 并探究区域水污染足迹变化的驱动因子, 为农田清洁生产和种植业结构调整提出针对性建议。

4 结论

1995—2014 年的 20 年间, 河北省各地市种植业引起的水污染问题日趋严重, 从农作物单位面积的水污染足迹 wdf 来看, 环渤海地区的秦皇岛, 其 wdf 在 20 年间年际增长率最高, 而处于平原区的石家庄, 其 wdf 的 20 年均值最高, 邯郸也是平原区中 wdf 较大的地区; 从区域水污染足迹 WDF 来看, 石家庄的农作物种植引发的水污染最严重, 在 1995、2004、2014 年均处于 I 级区, 除了张家口和承德一直处于 V 级区、廊坊一直处于 IV 级区, 其他地市农作物种植水污染状况均愈发严重。

种植业引起的水污染问题愈发严重的根本原因是施肥量增加, 当地政府应当制定、实施全省农业面源污染综合整治方案, 建设高效清洁农田, 推进农家肥、畜禽粪便等有机肥料的综合利用, 优先种植需肥量低、环境效益突出的农作物, 并加强净化农田排水设施建设, 严禁农田退水直接进入地表水体。另外, 在制定整治方案、政策的同时, 还需加强政策执行的监督与管理, 确保政策切实有效执行。

参考文献:

- [1] 程国栋. 虚拟水——中国水资源安全战略的新思路[J]. 中国科学院院刊, 2003, 18(4):260-265.
CHENG Guo-dong. Virtual water: A strategic instrument to achieve water security[J]. *Journal of Chinese Academy of Sciences*, 2003, 18(4):260-265.
- [2] 侯彦林, 李红英, 周永娟, 等. 中国农田氮面源污染研究: II 污染评价指标体系的初步制定[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1277-1282.
HOU Yan-lin, LI Hong-ying, ZHOU Yong-juan, et al. Nitrogen non-point field pollution in China: II Establishment of index system for evaluation of pollution degree[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(4):1277-1282.
- [3] 河北省统计局. 河北农村统计年鉴[R]. 北京: 中国统计出版社, 1995—2014.
Hebei Statistics Bureau. Hebei rural statistics yearbook[R]. Beijing: Chinese Statistics Press, 1995—2014.
- [4] Chapagain A K, Hoekstra A Y. Water footprints of nations: Value of water research report series No.16[R]. Netherlands: UNESCO-IHE, 2004.
- [5] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1):186-203.
- [6] Chapagain A K, Orr S. An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources: A case study of Spanish tomatoes[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2):1219-1228.
- [7] Gerbens-Leenes W, Hoekstra A Y. The water footprint of sweeteners and bio-ethanol[J]. *Environment International*, 2012, 40:202-211.
- [8] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The water footprint assessment manual: Setting the global standard[R]. Netherlands: Water Footprint Network, 2011: 19-48.
- [9] 徐长春, 陈阜. “水足迹”及其对中国农业水资源管理的启示[J]. 世界农业, 2015, 439(11):38-44.
XU Chang-chun, CHEN Fu. Water footprint and its implications to China's agricultural water management[J]. *World Agriculture*, 2015, 439(11):38-44.
- [10] International Organization for Standardization(ISO). ISO 14046:2014. Environmental management: Water footprint principles, requirements and guidelines[S]. Geneva:ISO,2014.
- [11] Ridoutt B G, Pfister S. A new water footprint calculation method integrating consumptive and degradative water use into a single stand-alone indicator[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18:204-207.
- [12] 盖力强, 谢高地, 李士美, 等. 华北平原小麦、玉米作物生产水足迹的研究[J]. 资源科学, 2010, 32(11):2066-2071.
GAI Li-qiang, XIE Gao-di, LI Shi-mei, et al. A study on production water footprint of winter-wheat and maize in the North China Plain[J]. *Resources Science*, 2010, 32(11):2066-2071.
- [13] 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 Jun-guo. Historical trend of grey water footprint of Beijing, China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(7):1169-1178.
- [14] 徐长春, 黄晶, Ridoutt B G, 等. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(5):873-880.
XU Chang-chun, HUANG Jing, Ridoutt B G, et al. LCA-based product water footprinting and a case study[J]. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(5):873-880.
- [15] Finnveden G, Hauschild M Z, Ekvall T, et al. Recent developments in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 91(1):1-21.
- [16] Bayart J B, Bulle C, Deschênes L, et al. A framework for assessing off-stream freshwater use in LCA[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15:439-453.
- [17] Pfister S, Koehler A, Hellweg S. Assessing the environmental impacts of freshwater consumption in LCA[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(11):4098-4104.
- [18] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. Recipe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonized category indicators at the midpoint and the end point level[R]. Netherland: Min-

- istry of Housing Spatial Planning and Environment, 2013:3-6.
- [19] 王丹阳, 李景保, 叶亚亚, 等. 一种改进的灰水足迹计算方法[J]. 自然资源学报, 2015, 30(12):2120-2130.
WANG Dan-yang, LI Jing-bao, YE Ya-ya, et al. An improved calculation method of grey water footprint[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(12):2120-2130.
- [20] Seppälä J, Knuuttila S, Silvo K. Eutrophication of aquatic ecosystems: A new method for calculating the potential contributions of nitrogen and phosphorus[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2004, 9(2):90-100.
- [21] Huang J, Ridoutt B G, Zhang H L, et al. Water footprint of cereals and vegetables for the Beijing market[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 18(1):40-48.
- [22] 安沫平. 河北省农业污染源调查与评价[M]. 石家庄:河北科学技术出版社, 2012:19-22.
AN Mo-ping. Investigation and evaluation of agricultural pollution sources in Hebei Province[M]. Shijiazhuang: Science and Technology Press of Hebei, 2012:19-22.
- [23] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(10):143-149.
WU Pei-lin. A quantificational and comparative analysis on the regional water resource pressure and water scarcity in China[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2005, 33(10):143-149.
- [24] 徐长春. 农产品水足迹评价——以玉米为例[C]//2013 中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷). 北京:中国环境科学学会, 2013:4.
XU Chang-chun. Water footprinting on agrifood products: Application to maize[C]// 2013 Academic annual meeting of China Environmental Science Society (Vol 4) Beijing:China Environmental Science Society: 2013:4.
- [25] 孙才志, 韩琴, 郑德凤. 中国省际灰水足迹测度及荷载系数的空间关联分析[J]. 生态学报, 2016, 36(1):86-97.
SUN Cai-zhi, HAN Qin, ZHENG De-feng. The spatial correlation of the provincial grey water footprint and its loading coefficient in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1):86-97.
- [26] 黄晶. 基于水足迹的北京市农业水资源可持续利用研究[D]. 北京:中国农业大学, 2013.
HUANG Jing. The sustainable use of agricultural water in Beijing based on water footprint[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013.
- [27] Berger M, Finkbeiner M. Methodological challenges in volumetric and impact-oriented water footprints[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2013, 17(1):79-89.
- [28] Chen L, Suh S, Pfister S. Does south-to-north water transfer reduce the environmental impact of water consumption in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(4):647-654.
- [29] Zonderland-Thomassen M A, Ledgard S F. Water footprinting: A comparison of methods using New Zealand dairy farming as a case study[J]. *Agricultural Systems*, 2012, 110(7):30-40.
- [30] 虞伟, 张晖, 胡浩. 农业生产与水资源承载力评价[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(7):978-986.
YU Yi, ZHANG Hui, HU Hao. Agricultural production and evaluation in terms of water resources carrying capacity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(7):978-986.
- [31] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 等. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1):63-73.
CAO Lian-hai, WU Pu-te, ZHAO Xi-ning, et al. Evaluation of grey water footprint of grain production in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1):63-73.
- [32] 张郁, 张峥, 苏明涛. 基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7):28-32.
ZHANG Yu, ZHANG Zheng, SU Ming-tao. Research on grey water footprint based on chemical fertilizer use in the grain production in Heilongjiang reclamation area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(7):28-32.
- [33] 牛子宁. 河北省污染物排放的区域比较研究[D]. 石家庄:河北师范大学, 2014.
NIU Zi-ning. A comparative study of the regional pollutant emissions in Hebei[D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2014.
- [34] Fasakhodi A A, Nouri S H, Amini M. Water resources sustainability and optimal cropping pattern in farming systems: A multi-objective fractional goal programming approach[J]. *Water Resources Management*, 2010, 24(12):4639-4657.