

DOI: 10.5846/stxb201405211051

张宇, 李云开, 欧阳志云, 刘健国. 华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征. 生态学报, 2015, 35(20): - .

Zhang Y, Li Y K, Ouyang Z Y, Liu J G. The grey water footprint of the winter wheat-summer maize crop rotation system of the North China Plain. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(20): - .

华北平原冬小麦-夏玉米生产灰水足迹及其县域尺度变化特征

张 宇¹, 李云开^{1,*}, 欧阳志云², 刘健国³

1 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 Center for Sytem Integration and Sustainability. Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

摘要:华北平原是种植冬小麦和夏玉米的主要区域,农民为达高产而过量使用化肥对该区造成了严重的面源污染。“有河皆干,有水皆污”已经成为华北平原水资源与水环境现状的概语。灰水足迹理论与方法的提出为定量评价农业生产对水环境的影响提供了一条新的思路。因此,本文基于精细的县域尺度农业基础数据,运用灰水足迹评价方法,分析了华北平原 1986—2010 年的冬小麦-夏玉米灰水足迹及其时空变异特征。结果表明:华北平原冬小麦和夏玉米产品灰水足迹分别为 0.55—2.97 m³/kg 和 0.50—2.02 m³/kg,均为美国、德国等地区的 2—10 倍;河北衡水、保定等地区灰水足迹较低,渤海湾等地区灰水足迹较高;冬小麦和夏玉米 25 年总灰水体积为 2.67—5.84×10¹⁰ m³,平均值为 3.90×10¹⁰ m³,总体表现为随时间变化呈波动上升趋势。建议在华北平原要注意严格控制施肥量、提高肥效,积极推广测土配方施肥、缓释肥等养分资源管理技术,积极发展利用沼液、有机肥等化肥替代技术;要控制肥料地表流失和地下淋失,大力发展冬小麦-夏玉米轮作条件下的机械化喷灌、滴灌、微喷带等灌溉系统条件下的水肥一体化技术,全面实施秸秆、地膜等覆盖技术减少农田土壤流失以及深松等耕作技术实现土壤水库的增容扩蓄。

关键词:灰水足迹; 华北平原; 冬小麦; 夏玉米; 氮肥

The grey water footprint of the winter wheat-summer maize crop rotation system of the North China Plain

ZHANG Yu¹, LI Yunkai^{1,*}, OUYANG Zhiyun², LIU Jianguo³

1 Department of college of water resources & civil engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Center for System Integration and Sustainability. Michigan State University, East Lansing, MI 48823, USA

Abstract: Much of the North China Plain (NCP) is dedicated to cultivation of winter wheat and summer maize. In order to achieve high crop yields, nitrogen fertilizer has been used in excess, constituting the major cause of water pollution in the area. The saying that “all rivers are dry and polluted” has come to characterize the NCP’s water resource environment. The grey water footprint of a product ($WF_{proc, grey}$) is a novel method for quantitatively estimating water resource pollution due to agricultural production. Using agricultural data accurate at the county scale, we evaluated the $WF_{proc, grey}$ of crops grown in the NCP from 1986 to 2010 and analyzed spatial and temporal variability. The $WF_{proc, grey}$ of winter wheat was found to be 0.55—2.97 m³/kg and that for summer maize was 0.50—2.02 m³/kg; these values are significantly higher (2—10 times)

基金项目:国家自然科学基金创新群体(51321001); 国家生态十年变化遥感评估重大专项(STSN-13-04-01); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401078)

收稿日期:2014-05-21; 修订日期:2014-11-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liyunkai@126.com

than those for similar crops grown in the rest of the world, such as the U.S. and Germany. On comparing regions within the NCP, we found relatively low $WF_{proc, grey}$ values for crops grown in Hengshui, Baoding, and some regions of Hebei province, while it was high for crops grown in Bohai Bay. The total grey water volume of winter wheat and summer maize production over 25 years was estimated in the range of $2.67\text{--}5.84 \times 10^{10} \text{ m}^3$, with an average of $3.90 \times 10^{10} \text{ m}^3$; despite yearly fluctuations, a sustained upward trend was apparent. In light of these results, the need becomes apparent for a reduction in the amount of fertilizer used in agriculture, improvements in the efficiency of applied fertilizer, the development of new methods (such as formula fertilization by soil testing and controlled-release fertilizers), and the replacement of traditional fertilizer with organic fertilizer and biogas slurry. Water resource pollution can be further reduced by preventing fertilizer losses from surface runoff and leaching into groundwater, adopting water-saving irrigation techniques (e.g., drip irrigation and micro irrigation with integrated water and fertilizer technology), reducing water and soil loss via straw mulching and film mulching, and increasing water storage and organic matter accumulation in subsoil.

Key Words: grey water footprint; North China Plain; winter wheat; summer maize; nitrogenous fertilizer

华北平原是我国粮棉油作物的主要生产基地,冬小麦和夏玉米轮作是该区主要粮食种植制度。近年来随着农业生产水平的提高,农民对农田的投入迅速增加。农业生产过程对环境所造成的污染也日益严重。其中水污染问题尤为突出,2009年《河北省环境状况公报》报道了关于河北省地表水的污染情况。35.6%的河流断面氨氮浓度为劣V类,28%的断面化学需氧量处于劣V类状态。水系中主要污染物为氨氮、化学需氧量、生化需氧量、总磷、高锰酸钾指数、石油类和挥发酚等。赵同科等人对环渤海7个省(市)地下水污染情况进行了调查,发现地下水中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量均值均为 11.9mg/L ,约34.1%的地下水超过WHO制定的饮用水标准^[1]。其中,农业生产中过量施肥是造成地表水和地下水严重污染的主要原因之一^[2]。“有河皆干,有水皆污”已经成为华北平原水资源现状的概语,作为水资源供需矛盾十分突出的地区,由于水资源的过量开发,华北已经出现了地下水漏斗、平原区河道干涸、湖泊湿地萎缩、地表和地下水污染等生态环境恶化问题。因此,有必要对农业生产对水环境污染进行评价并找出合理的解决方式。传统的水污染评价方法主要有综合污染指数法、模糊数学方法、人工神经网络分析方法和热力学方法等^[3-6],这些方法主要是评价受污染水体的污染程度,对于水资源数量与质量相互影响的关系研究不多。而灰水足迹概念的提出为定量评价水量-水质关系提供了崭新的思路。

水足迹思想来源于1992年加拿大经济学家William Rees提出的“生态足迹”理论^[7]。荷兰水资源专家Hoekstra在虚拟水研究的基础上,于2002年提出了水足迹(water footprints)的概念。2008年,Hoekstra和Chapagain首次提出灰水足迹概念,用于反映生产、生活造成的水污染状况。2010年末,灰水足迹的计算方法得到统一:灰水足迹是与污染有关的指标,定义为以自然本底浓度和现有的环境水质标准为基准,将一定的污染物负荷吸收同化所需的淡水的体积^[8]。有许多国外学者对关于农业生产或流域平原区的水足迹(包括灰水足迹)进行了研究^[9-11],但这些研究中并没有单独研究灰水足迹并分析量化其与水污染之间的关系。国内学者如刘俊国^[12]、张郁^[13]、曹连海^[14]等人对区域性的灰水足迹进行了研究。但缺乏从长时间尺度变化的角度进行研究,同时没有从实际角度考虑不同地区因施肥率不同而产生灰水足迹的空间变异,因而空间分辨率也不高。目前并未有学者基于县域统计数据对华北平原灰水足迹做过精细研究,本文基于华北平原1986—2010年县域尺度的氮肥施用及冬小麦夏玉米种植面积和产量等基础数据,从长时间尺度和高空间分辨率的角度估算了因施肥而引起的灰水足迹,计算并分析了华北平原灰水足迹的时空变异规律,对研究华北平原农业粮食生产产生的水污染现状具有重要意义,同时也为治污提供依据和理论对策。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

华北平原位于我国东部,处于燕山山脉以南,太行山山脉以东,地势平坦广阔,海拔不超过100m,自北、

西、南三个方向向渤海湾倾斜。地理坐标为东经 112°30′—119°30′,北纬 34°46′—40°25′,全区包括北京、天津、河北省全部平原及河南省、山东省的黄河以北平原,共计 21 市 207 县(市),总面积约 136200 km²。区域地理位置分布如图 1 所示。全区耕地面积有 3419.2 万 hm²,占全国耕地面积的 18.3%。粮食总产量达 10937 万 t,占全国的 22%。粮食播种面积约占全部作物播种面积的 80%,其中冬小麦和夏玉米的种植面积较广,分别占全区粮食播种面积的 50%和 46%左右。

1.2 灰水足迹估算方法

本文采用水足迹评价手册^[8]中的计算方法,作物或树木生长过程中的灰水足迹($WF_{proc, grey}$, m³/t)计算公式为:

$$WF_{proc, grey} = \frac{(\alpha \times AR) / (c_{max} - c_{nat})}{Y} (\text{体积} / \text{质量}) \quad (1)$$

式中:AR 为每公顷土地的化肥施用量(kg/hm²); α 为淋溶率(即进入水体的污染量占总化学物质施用量的比例); c_{max} 为最大容许浓度(kg/m³); c_{nat} 为污染物的自然本底浓度(kg/m³);Y 为作物产量(t/hm²)。

本文参考了赵荣芳等人的研究结果^[15],认为华北平原平均溶淋率为 25%,该值是综合对 24 个地点的研究,7 篇文献的总结得到的平均值。假设自然水体当中氮的浓度为 0,即 c_{nat} 为 0^[8]。一般采用 EPA 的标准,认为每升饮用水中不能超过 10mg 的氮^[16],即 c_{max} 为 0.01。

关于 AR 的计算,由于收集到的施肥数据是县域尺度所有作物总的施肥量,缺乏冬小麦夏玉米分开的施肥率的数据,本文参照王兴仁、张福锁、张卫峰等人编著的《中国农化服务肥料与施肥手册》,通过施肥比例分配的方法将每个县施用的总氮肥分开,得到冬小麦夏玉米各自的施肥率县域数据。根据手册中描述,将华北平原主要施肥作物分为冬小麦,夏玉米,水果,蔬菜和其他作物五类。具体分配方法如下:

$$F_{Ni} = F_{N总} \times \frac{s_i f_i}{\sum_{i=1}^n s_i f_i} \quad (2)$$

$$AR_i = \frac{F_{Ni}}{S_i} \quad (3)$$

式中, $F_{N总}$ 为县域所有作物施肥量之和, F_{Ni} 为各作物施肥量, s_i 为各作物种植面积之比, f_i 为各作物施肥率之比,($i=1,2,3,4,5$;1 代表夏玉米,2 代表冬小麦,3 代表水果,4 代表蔬菜,5 代表其他);AR 为施肥率,S 为各

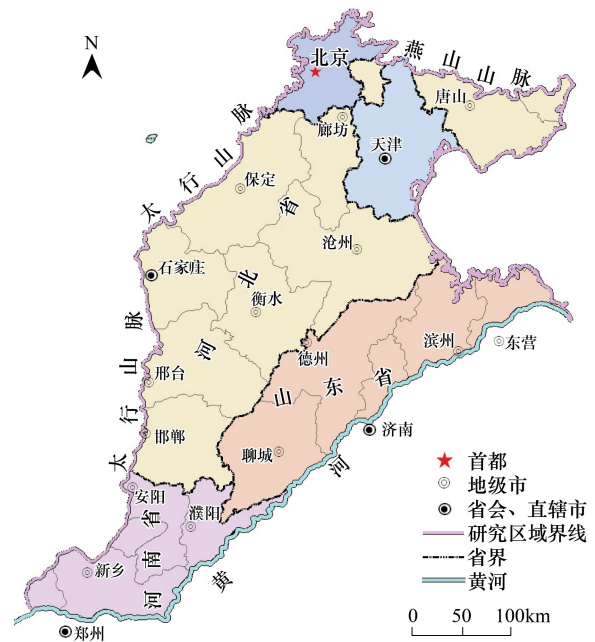


图 1 华北平原区域图

Fig.1 The study area NCP

表 1 华北平原行政区面积统计表

Table 1 Statistics of administrative area of NCP

平原亚区 Plain subregion	城市 City	省级行政区 Province	面积/km ² Area
北京平原 Beijing plain	北京	北京市	6149
天津平原 Tianjin plain	天津	天津市	10457
河北平原 Hebei plain	石家庄	河北省	6738
	唐山	河北省	7480
	秦皇岛	河北省	1280
	保定	河北省	10386
	廊坊	河北省	6300
	沧州	河北省	14056
	衡水	河北省	8850
	邢台	河北省	8691
豫北平原 Yubei plain	邯郸	河北省	7311
	安阳	河南省	4351
	濮阳	河南省	4213
	鹤壁	河南省	1322
鲁北平原 Lubei plain	焦作	河南省	1124
	新乡	河南省	6683
	德州	山东省	10296
	聊城	山东省	8595
	济南	山东省	2433
	滨州	山东省	6233
	东营	山东省	3241
总计 Total			136189

作物种植面积。

1.3 数据来源

本文计算了 1986—2010 年共 25 年的冬小麦、夏玉米生产灰水足迹。其中用到的农业基础数据包括冬小麦、夏玉米、水果、蔬菜、其他农作物种植面积,冬小麦、夏玉米总产量,所有粮食作物总氮肥施用量。这些县域数据来自中国农业科学院农业信息研究所,该所是以农业信息学科研究和提供农业科技文献与信息为主要任务的国家级非营利性科研机构,数据来源真实可靠。

以县为单位的宏观农业统计数据由各县市逐级上报,最后上报到农业部后,将会使用专门的数据分析软件进行初步检验,检验后的数据保证了时间和空间上的发展变化趋势,数据之间具有严密的逻辑性。在本研究中,为保证研究结果的更加合理可靠,作者对研究涉及到的农业宏观统计数据再次进行了认真的检查,对存在的个别问题,通过与已公开发表的文献、统计年鉴数据的对比分析进行改正。用到的方法主要有:

(1)异常值观察法。在某一数据列中,数值的大小明显异常的做出标记,然后与公开出版的数据进行核对,排除数据录入错误,再对数据进行适当修正。

(2)包含原则。比如,总人口肯定大于农业人口,要是农业人口大于了总人口,那么该项数据肯定是错误了。在进行数据检验过程中没有这样的错误。

(3)空值处理。有些地区没有数据或者数据严重不全,这种情况下,把该县域单元设置为零值。

2 结果与分析

2.1 冬小麦夏玉米施氮率空间分布

由图 2 可以看出,华北平原施氮量集中在 200—400kg/hm²,冬小麦和夏玉米的空间分布较为相似,但总体冬小麦的施氮量大于夏玉米。无论对冬小麦还是夏玉米,可以看出河北低平原地区施氮量较小,豫北平原施氮量较大。经过 GIS 区域统计计算得出区域平均值,夏玉米:豫北平原(252.06 kg/hm²)>天津平原(245.41 kg/hm²)>鲁北平原(229.57kg/hm²)>河北平原(198.97kg/hm²)>北京平原(177.66kg/hm²)。冬小麦:豫北平原(275.56 kg/hm²)>鲁北平原(235.98kg/hm²)>天津平原(213.17kg/hm²)>河北平原(211.31kg/hm²)>北京平原(197.06kg/hm²)。夏玉米的最小值出现在武强(86.21kg/hm²),最大值出现在宁河(438.44kg/hm²);冬小麦的最小值出现在武强(93.56kg/hm²),最大值出现在获嘉(446.33kg/hm²)。天津宁河,河北乐亭县,山东利津,河南新乡等地区施氮量较大,平均超过 300kg/hm²。结果显示大部分农民在冬小麦夏玉米轮作体系中施氮量超过 500kgN/hm²,有的甚至超过 700kgN/hm²,相比之下,美国的堪萨斯州、密西西比州,加拿大的魁北克省的玉米施氮率最大值仅为 300 kgN/hm²、250 kgN/hm²和 280 kgN/hm²。华北平原施氮量远远超过冬小麦/夏玉米平均产量所需要的总氮吸收为 311kg/hm²,而两者的回收利用率分别仅为 28%和 16%,显著低于我国玉米的 26.1%和美国伊利诺斯州的 49%—69%^[17]。本文计算结果与张玲敏等人在关于华北平原地区施氮量的调查结果一致^[18]。

2.2 冬小麦夏玉米灰水足迹空间分布

从图 3(a)可以看出夏玉米灰水足迹为 0.50—2.02m³/kg,范围跨度较大,但 82.31%的区域主要集中在 0.7—1.4 m³/kg,说明除较高、较低值外,大部分地区的灰水足迹较为相近。经过 GIS 区域统计计算得出区域平均值,夏玉米:天津平原(1.30 m³/kg)>豫北平原(1.18 m³/kg)>河北平原(1.12m³/kg)>鲁北平原(1.11m³/kg)>北京平原(0.96m³/kg)。临近渤海地区、河北邯郸、邢台、石家庄、河南新乡等地区的部分县市较高,最高值高达 2.02 m³/kg(利津)。从图 3(b)可以看出,冬小麦:豫北平原(1.28 m³/kg)>鲁北平原(1.26 m³/kg)>河北平原(1.21 m³/kg)>天津平原(1.16 m³/kg)>北京平原(1.04 m³/kg)。总体而言环渤海周边地区较高,83.15%的区域灰水足迹在 0.8—1.6m³/kg,河北石家庄、山东德州部分地区较低,冬小麦多年平均灰水足迹为 0.55—2.97m³/kg,最高值出现在宁河,最低值出现在河北阜城。本文估算出华北平原冬小麦产品灰水足迹为 0.55—2.97m³/kg,明显高于美国的 0.23m³/kg、德国的 0.185 m³/kg,甚至还高于灰水足迹很大的埃及的

0.412 m³/kg,也高于全球的平均值 0.208 m³/kg;夏玉米产品的灰水足迹为 0.50—2.02m³/kg,明显高于全球均值0.194 m³/kg。这主要是由于华北平原属于集约化冬小麦/夏玉米轮作种植区,施肥量大引起的。

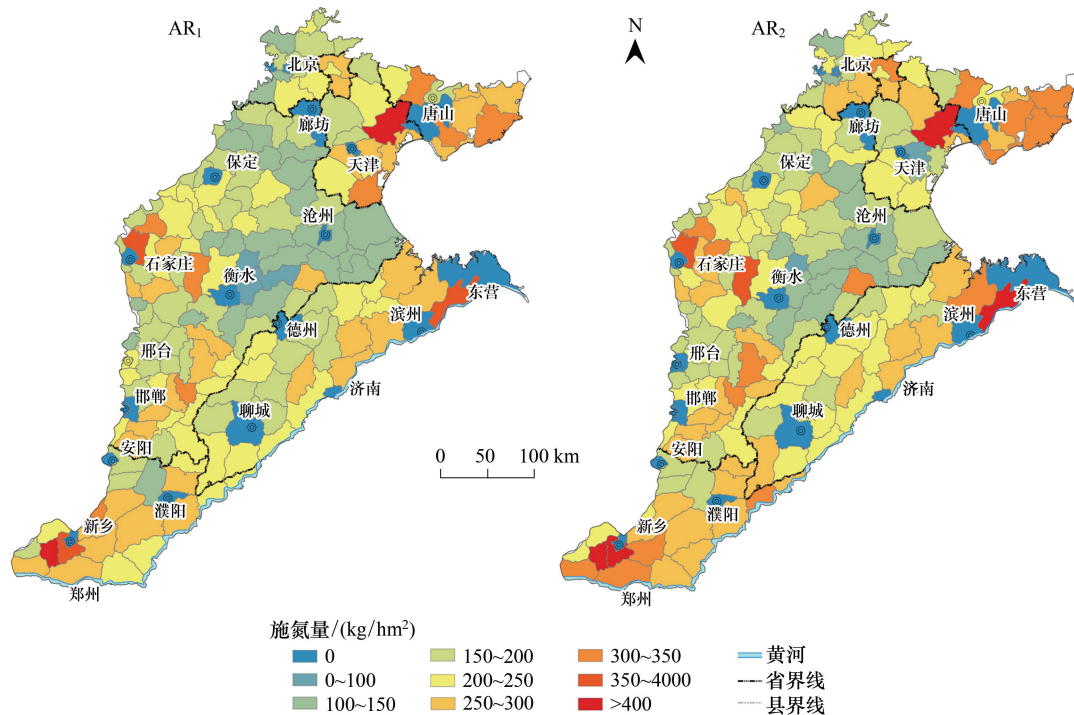


图 2 华北平原冬小麦夏玉米施氮率空间分布

Fig.2 Nitrogen rate of winter wheat and summer maize in NCP

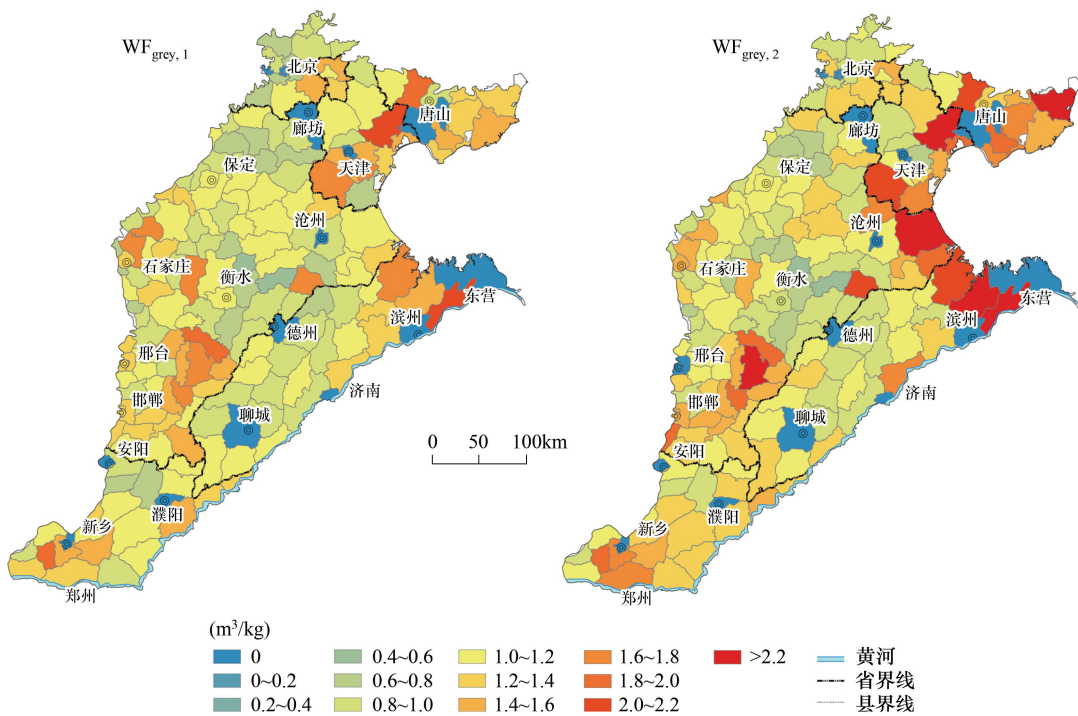


图 3 华北平原冬小麦夏玉米灰水足迹空间分布

Fig.3 Grey footprint of winter wheat and summer maize in NCP

2.3 冬小麦夏玉米灰水足迹多年变化

华北平原冬小麦夏玉米总灰水体积为 $2.67\text{—}5.84 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 25 年平均值约为 $3.90 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 总体表现为呈波动中持续的上升趋势 ($y = 7.03 \times 10^8 x + 2.98 \times 10^{10}$, $R^2 = 0.49$, $\alpha = 0.05$ 时, $F = 21.88$, 显著), 5 年平均值从 1986—1990 年的 $3.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 增加到 2006—2010 年的 $4.86 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 最大、最小值分别为出现在 2009 年和 1989 年。冬小麦的灰水总体高于夏玉米的灰水, 总体都成波动的上升趋势。夏玉米所占比例呈线性上升趋势, 冬小麦比例呈下降趋势, 反映了华北平原在粮食作物肥料投入上的变化。笔者认为, 1998 年的小峰值反应了当年长江流域洪水对华北平原地区的影响。1998 年以前的上升趋势, 主要是由于改革开放前期、人口急剧增加、粮食需求增长等因素引起的。而北粮南运格局的出现也对灰水的增加产生了影响。历史上, 中国粮食一直是南粮北运的格局, 但近十年这一态势发生了逆转。一方面是由于北方生产供给增强, 另一方面是由于南方经济增长拉动消费水平提高, 人口向南方流动造成南方市场需求增加, 粮食需求的增加导致了肥料投入加大。

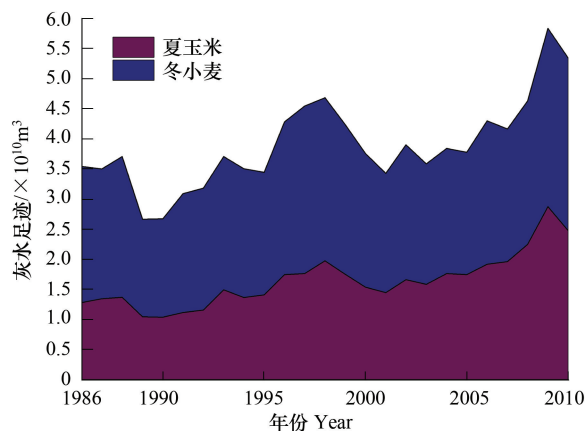


图4 华北平原冬小麦夏玉米灰水体积多年变化

Fig.4 Total grey water volume temporal variability in NCP

3 讨论

3.1 污染源的选取

从本文施氮率的计算结果可以看出, 华北平原地区农田氮肥投入量远远超出其他地区。在华北平原冬小麦夏玉米种植过程中, 施肥、喷洒农药等都会对种植区及周边的环境的水质产生污染。选取氮肥作为灰水足迹计算的目标, 首先是因为华北平原农田氮肥施用量大, 造成的污染最为严重。其次, 因为通常土壤中的磷能和其他矿物质反应生成不容易溶解的化合物, 造成水污染较少; 钾离子可以被土壤胶体离子吸引以而不容易被过滤; 氮很容易在土壤中流动污染地下水 and 地表水, 并且在华北平原地区, 氮、磷、钾三种肥料中氮肥占有极大比例。因此在计算肥料引起的灰水足迹时可以忽略磷肥、钾肥, 仅考虑氮污染。几乎所有农药的使用都会引起地下水或地表水的污染, 之所以没有将农药作为计算目标, 一是由于华北平原农田施用农药种类繁多、最大允许浓度也差异较大并且难以收集施用量的数据, 因而很难在灰水足迹计算中考虑农药对水质的影响。二是因为稀释氮污染的水体和稀释农药污染的水体会有重叠部分, 这在一定强度上降低了忽略农药引起的灰水足迹计算风险。

3.2 减少华北平原灰水足迹的方法

从灰水足迹的概念可以看出, 减少灰水足迹的途径主要有两个。一是减少污染源对水体污染, 二是增加粮食产量。增加粮食产量的途径已有成熟的体系研究, 且华北平原为粮食高产地区, 本文在此不作过多讨论。经过 GIS 区域统计计算得出区域灰水足迹平均值, 夏玉米: 天津平原 > 豫北平原 > 河北平原 > 鲁北平原 > 北京平原; 冬小麦: 豫北平原 > 鲁北平原 > 河北平原 > 天津平原 > 北京平原。这主要和施氮率有关, 豫北平原灰水足迹较高的问题更应得到重视, 其次为河北平原和鲁北平原。减少水体污染应该减少污染源 (氮肥) 和污染物进入水体的途径, 以下将针对华北平原的具体情况进行探讨。

(1) 控制施肥量, 提高肥效

在华北平原地区, 地下水硝酸盐超标的原因主要与农田施肥量有关^[1,19], 大部分农民在冬小麦夏玉米轮作体系中施氮量超过 500 kg N/hm^2 , 有的甚至超过 700 kg N/hm^2 。农业生产中对水资源污染最严重的过程是施肥环节, 减少污染源首先要控制施肥量、提高肥效。许多研究表明施肥量与肥料的利用率呈明显的负相关关

系^[20-23],因此控制施肥量和提高肥效是相辅相成的。华北平原地区农户氮、磷、钾肥的施用比例大约为 5:3:1,其中氮磷肥的投入已远超过同期作物养分消耗量,钾肥施用量偏低。采用秸秆、畜禽粪便还田以及部分沼液、有机肥等代替化肥,可以减少化肥的用量,缓解华北平原土壤有机质偏低而限制作物产量的状况。其次,要在保证粮食产量的前提下提高肥料的利用率。依据养分资源综合管理技术^[23],在华北平原地区采用平衡施肥、测土配方施肥、专用配方施肥和施用缓释肥等技术^[21-23],增施适量钾肥,可以明显提高肥效。

(2)减少肥料地表流失和地下淋失,实行水肥一体化,适时、按需补充作物养分资源

通常情况下华北平原降雨很少产生径流,农田硝态氮随径流损失相对较少,而淋溶损失则较为常见。华北平原降雨集中在 6—9 月份,此时为夏玉米种植时节,容易形成径流损失。在夏玉米种植之前实现冬小麦的秸秆还田可以增大雨水入渗,扩大土壤水库库容,减少地表径流带来的肥料流失。在 10 月至次年 6 月份,华北平原冬小麦生长主要依靠灌溉水,此时主要为地下淋失。灌溉时需要控制适宜的灌水量^[24],因为过量的灌溉水会使土壤中的硝态氮随水流渗入地下水。采用翻耕法、深松耕等蓄水聚肥改土耕作方式可以增容扩蓄的,尽量将肥水留在根区,减少下渗。在适当的时期施肥,也可以帮助提高肥料的利用率^[25],但是传统的施肥方式在施加底肥后不能达到适时、按需补充养分。因此,在华北平原冬小麦-夏玉米轮作系统中推广精量灌溉方式,采用高效节水灌溉系统,配合水肥一体化技术,结合改进的地面灌溉、喷灌、微灌等施加肥料^[26,27],既可以减少地面流失,又可以将肥水保留在作物根区,提高肥效,减少肥料的地下淋失。

4 结论

(1)华北平原冬小麦夏玉米总灰水体积为 $2.67\text{—}5.84\times 10^{10}\text{m}^3$,25 年平均值约为 $3.90\times 10^{10}\text{m}^3$,总体表现为呈波动中持续的上升趋势($y=7.03\times 10^8x+2.98\times 10^{10}$, $R^2=0.49$, $\alpha=0.05$ 时, $F=21.88$,显著)。冬小麦的灰水总体高于夏玉米的灰水,两者总体均呈波动的上升趋势。

(2)华北平原冬小麦、夏玉米多年平均产品灰水足迹为 $0.55\text{—}2.97\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $0.50\text{—}2.02\text{m}^3/\text{kg}$,冬小麦夏玉米灰水足迹明显高于美国、德国等地区的灰水足迹,约为美国和德国的 2—10 倍。

(3)从施肥角度可以看出冬小麦和夏玉米氮肥施用空间分布较为相似,河北的衡水和沧州等地区施氮率和灰水足迹都较低,渤海湾地区灰水足迹明显较高。

参考文献 (References):

- [1] 赵同科,张成军,杜连凤,刘宝存,安志装.环渤海七省(市)地下水硝酸盐含量调查.农业环境科学学报,2007,26(2):779-783.
- [2] 张兆吉,费宇红,郭春,艳钱永,李亚松.华北平原区域地下水污染评价.吉林大学学报:地球科学版,2012,42(5):1457-1461.
- [3] 付国伟,程声通.水污染控制系统规划.北京:清华大学出版社,1985.
- [4] 张永波,时红,王玉和.地下水环境保护与污染控制.北京:中国环境科学出版社,2003.
- [5] Yang M N, Li D F, Yang J B, Xiong W. FANN-Based surface water quality evaluation model and its application in the shaoguan area. Geo-spatial Information Science, 10(4):303-310.
- [6] 王冬生,李世华,周杏鹏.基于 PSO-RBF 神经网络模型的原水水质评价方法及应用.东南大学学报:自然科学版,2011,41(5):1020-1023.
- [7] Wakemagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island, BC, Canada: New Society Publishers, 1996.
- [8] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London, UK: Earthscan, 2011.
- [9] Vanham D. An assessment of the virtual water balance for agricultural products in EU river basins. Water Resources and Industry, 2013, 1-2: 49-59.
- [10] Dumont A, Salmoral G, Ramón Llamas M. The water footprint of a river basin with a special focus on groundwater: The case of Guadalquivir basin (Spain). Water Resources and Industry, 2013, 1-2: 60-76.
- [11] Bultink F, Hoekstra A Y, Booij M J. The water footprint of Indonesian provinces related to the consumption of crop products. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(1):119-128.

- [12] Zeng Z, Liu J, Koenenman P H, Zarate E, Hoekstra A Y. Assessing water footprint at river basin level; a case study for the Heihe River Basin in northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8):2771-2781.
- [13] 张郁, 张铮, 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. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(7):29-32.
- [14] 曹连海, 吴普特, 赵西宁, 王玉宝. 内蒙古河套灌区粮食生产灰水足迹评价. *农业工程学报*, 2014, 30(1):63-72.
- [15] 赵荣芳, 陈新平, 张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡. *土壤学报*, 2009, 46(4):685-697.
- [16] EPA. List of Drinking Water Contaminants; Ground Water and Drinking Water. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 2005.
- [17] Stevens W B, Hoefl R G, Mulvaney R L. Fate of nitrogen-15 in a long-term Nitrogen rate study. II. Nitrogen uptake efficiency. *Agronomy Journal*, 2005, 97(4):1046-1053.
- [18] 张玲敏. 河北省施肥现状的评价[D]. 保定: 河北农业大学, 2002.
- [19] 张维理, 田哲旭, 张宁, 李晓齐. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查. *植物营养与肥料学报*, 1995, 1(2):80-87.
- [20] 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 张福锁. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3):264-270.
- [21] 张福锁, 江荣风, 陈新平. 测土配方施肥技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
- [22] 张福锁, 陈新平, 高祥照. 协调作物高产与环境保护的养分资源综合管理技术研究与应用. 北京: 中国农业大学出版社, 2008.
- [23] 张福锁, 马文奇, 陈新平. 养分资源综合管理理论与技术概论. 北京: 中国农业大学出版社. 2006.
- [24] Li H, Wang L G, Qiu J J, Li C S, Gao M F, Gao C Y. Calibration of DNDC model for nitrate leaching from an intensively cultivated region of Northern China. *Geoderma*, 2014, 223-225:108-118.
- [25] Quiñones A, Martínez-Alcántara B, Legaz F. Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 122(3):399-409.
- [26] Liu H J, Kang Y H. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1/2):3-19.
- [27] Man J G, Yu J S, White P J, Gu S B, Zhang Y L, Guo Q F, Shi Y, Wang D. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat. *Field Crops Research*, 2014, 161:26-37.