基于阈值模型的河南省化肥施用生态经济合理性及减量潜力

刘钦普[1*] 濮励杰[2] 孙景荣[1]

([1]南京晓庄学院生态学重点学科组, 南京 211171; [2]南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘 要 利用1980—2017年相关数据,通过构建数学模型,计算河南省及其地市氮磷钾化肥施用的环境安全阈值,评价化肥施用的生态经济合理性,为其化肥减量增效、防治面源污染、促进农业可持续发展提供参考。结果表明:1980—2017年,河南省化肥施用环境安全阈值从104 kg·hm^{-2}增加到266 kg·hm^{-2},化肥施用合理指数从1980年的0.72上升到1988年的1.00后降低到2017年的0.16,化肥施用生态经济合理性经历了施肥不足不合理到施肥合理,又到施肥过量不合理和很不合理的变化过程;2017年,河南省18个地级市中只有鹤壁的化肥施用较为合理,化肥施用量没有超出环境安全阈值的30%,为生态经济合理性二级水平;另除开封和信阳外,其他15个地市的化肥施用都超出了环境安全阈值的50%,化肥施用不合理,为生态经济合理性四级水平;全省磷肥施用生态经济合理性最差,氮肥次之,钾肥较轻;按照化肥施用环境安全阈值施肥,全省可节约化肥约310×10^7 kg,其中氮磷钾单质肥料分别为128.4×10^7、115.7×10^7、65.9×10^7 kg。总之,河南省化肥施用不合理,区域差异明显,化肥减量潜力很大,实现化肥施用负增长、粮食安全-生态友好双赢发展任务艰巨。

关键词 环境安全阈值; 化肥施用强度; 化肥施用强度指数; 化肥施用合理指数; 化肥减量潜力

Eco-economic rationality of fertilization and the potential of fertilizer reduction in Henan Province based on threshold model.

LIU Qin-pu[1*], PU Li-jie[2], SUN Jing-rong[1] ([1]*Ecology Research Group of Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing* 211171, *China*; [2]*School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*).

Abstract: Based on mathematical models and data of 1980-2017, environmental thresholds of fertilization in Henan Province and its prefectural-level cities were calculated to evaluate the eco-economic rationality of fertilization for reducing fertilizer use and improving the sustainable agricultural development. The results showed that environmental threshold of fertilization in Henan increased from 104 kg·hm^{-2} in 1980 to 266 kg·hm^{-2} in 2017 and fertilization eco-economic rationality index changed from 0.72 in 1980 to 1.00 in 1988 to 0.16 in 2017 with alterations of fertilization rationality from relatively rational to rational to severely irrational. Hebi was only one city among the 18 prefectural-level cities in Henan which belonged to the relatively rational for fertilizer use with the amount being less than 30% of fertilization environmental safety threshold in 2017. 15 cities belonged to the severely irrational for fertilizer use with the amount more than 50% of the thresholds in Henan, except for Kaifeng and Xinyang. For the use of single fertilizer in Henan, phosphorus was severely irrational, nitrogen was irrational, and potassium was slightly irrational. According to the thresholds, 3.1 million tons of fertilizers could be reduced, including 1.28, 1.15, and 0.66 million tons of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers, respectively. There is a great potential for Henan to reduce the overused fertilizers and a huge task to assure

国家自然科学基金重点项目(41230751)、国家自然科学基金面上项目(41871083)、江苏省生态学重点学科建设项目(2017-2019)和教育部人文社会科学研究青年项目(15YJC790092)资助。
收稿日期: 2019-07-10 接受日期: 2019-10-14
*通讯作者 E-mail: liuqinpu@163.com

the win-win development of grain security and friendly environment.

Key words: environmental safety threshold; fertilization intensity; fertilization intensity index; fertilization rationality index; fertilizer reduction potential.

自改革开放以来,中国粮食产量不断提高,化肥的施用量也明显增加。粮食产量从 1980 年的 32055.50×10^7 kg 增加至 2017 年的 66160.72×10^7 kg,增加了 2 倍,化肥施用量(折纯量)从 1269.40×10^7 kg 增加到 5859.41×10^7 kg,增加了 4.6 倍。目前我国已经成为世界上最大的氮肥生产国和消费国(张弦等,2018)。河南省作为中国第二产粮大省,几十年来粮食产量约占全国的 7%~10%,化肥施用量约占全国的 6%~12%。化肥施用总量从 1980 年的 72.40×10^7 kg 增加到 2017 年的 706.70×10^7 kg,其中氮(N)、磷(P_2O_5)、钾(K_2O)和复合肥分别为 219.98×10^7、108.08×10^7、58.34×10^7、320.30×10^7 kg,化肥用量居全国各省份之首。化肥的大量施用给我国生态环境带来了不利影响(薛冰等,2019),河南更是面临严重的农业面源污染风险(刘钦普,2014)。2018 年河南省农业厅下发的《河南省 2018—2020 年化肥施用量零增长行动方案》提出了五大化肥减量行动(赵檬,2018),2019 年 1 月《中共中央 国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见》中也明确要求“加大农业面源污染治理力度,开展农业节肥节药行动,实现化肥农药使用量负增长”(新华社,2019)。因此,深入研究河南省化肥合理施用问题,对河南化肥减量增效、治理面源污染以及促进全国化肥使用负增长具有重要意义。

长期以来,众多学者对河南省农作物特别是主粮小麦玉米的化肥合理施用量做了大量研究。例如根据国家测土配方施肥项目在河南省开展的“3414”田间试验表明,河南小麦、玉米经济最佳施氮量分别为 155.1 和 172.8 kg·hm^{-2}(赵亚南等,2018),而豫北、豫南、豫中、豫东及豫西地区平均小麦适宜施氮量分别为 134、156、148、169 和 161 kg·hm^{-2}(武金果,2013)。在新乡封丘地区冬小麦较适宜的推荐氮肥施用量为 200 kg·hm^{-2}(靳海洋等,2016),而在平原新区综合考虑小麦群体结构、冠层截获光合有效辐射和产量,氮、磷、钾分别以 225、225、150 kg·hm^{-2}配施最为合理(岳俊芹等,2016)。黄鑫等(2018)研究表明,若综合考虑小麦产量、铁锌含量、生物有效性以及环境可持续性,河南潮土区以氮肥 270 kg·hm^{-2}、磷肥 60 kg·hm^{-2}配合为最佳施肥方案,而郭战玲等(2015)则认为综合考虑小麦高产与环境友好双赢的氮、磷施用量分别为 162.2~250、90~180 kg·hm^{-2}。对磷和钾肥施用的研究表明,洛阳小麦最佳经济效益的施磷量为 128~139 kg·hm^{-2}(黄明等,2018),郑州市玉米和小麦季以及驻马店市玉米季钾的最佳适宜用量为 150 kg·hm^{-2}(张翔等,2009)。在商丘市和安阳内黄县两地小麦经济最佳施钾量分别为 75.7 和 63.9 kg·hm^{-2}(董合林等,2015)。以上研究,在一定程度上为河南各地化肥合理施用起到了一定的指导作用,但大多是基于局地的田间试验,并多侧重于从经济的角度考虑最佳化肥施用量。本文通过构建数学模型,从粮食和环境双安全考虑,宏观上确定河南各地市氮磷钾化肥施用的生态经济适宜量,即环境安全阈值,从时空角度评价化肥施用的生态经济合理性,为河南各地化肥减量增效、促进农业可持续发展提供学术参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 化肥施用环境安全阈值模型

农业上最普遍施用的常量肥料是氮磷钾化肥,大田作物对氮磷钾的需要比例一般为 1∶0.5∶0.5(王激清等,2006)。化肥施用环境安全阈值是指为获得某一季作物目标产量而不危害环境的氮磷钾等化肥的单位播种面积最大生态经济施用量。笔者参考巨晓棠(2015)作物理论推荐施氮量的计算方法,提出了计算氮磷钾化肥施用环境安全阈值的数学模型如下(刘钦普,2017):

$$FET=\frac{2\rho}{n}\cdot A\cdot\sum_{i=1}^{n}Y_i \quad (\text{一般地},n=3) \tag{1}$$

$$FET_N=0.5FET \tag{2}$$

$$FET_P=FET_K=0.5FET_N \tag{3}$$

$$\rho=(1-e)(1+t) \tag{4}$$

式中:FET 为氮磷钾总肥施用的环境安全阈值(kg·hm^{-2});FET_N、FET_P、FET_K分别为氮肥、磷肥和钾肥施用的环境安全阈值,A 为作物需氮系数,即千克产量的作物需氮量(kg)。河南省主要的农作物为小麦和玉米,两者的播种面积占整个粮食作物播

种面积的 80%以上,它们的需氮系数分别为 0.029 和 0.023(赵亚南等,2018),这里取其平均值 0.026 为作物需氮系数。Y_i为某地区近 3 年作物年产量;ρ 为调节系数,表示化肥施用环境安全阈值与最佳经济施肥量的关系,e 为化肥施用环境安全阈值相对于最佳经济施肥量的下浮比例,t 为作物目标产量相对于当前作物产量的上浮比例,e 和 t 一般取小数。多项研究表明,兼顾生态与经济的作物施肥量比最佳经济施肥量至少低 20%(崔玉亭等,2000;章明清,2006;骆世明,2018)。人们通常将当前产量再上浮 10%作为目标产量(张月平等,2011;刘钦普,2017),但是近 10 年来,河南省粮食产量最高增产不足 5%,因此,将河南当前产量上浮 5%~7%作为目标产量,故 ρ 这里取 0.85。

1.2 化肥施用生态经济合理性评价

为了评价化肥施用在生态经济上是否合理,笔者提出了化肥施用合理指数的概念及其计算模型。化肥施用合理指数是指在考虑生态环境安全的前提下,为获得某一季作物目标产量化肥施用的生态经济合理性。其计算模型为:

$$FRI = e^{-5(FII-1)^2} \quad (5)$$

式中,*FRI* 为氮、磷、钾单质或总肥的化肥施用合理指数;e 为自然常数。*FII* 为化肥施用强度指数,是氮、磷、钾单质或总肥化肥施用强度与其环境安全阈值的比值,即:

$$FII = \frac{FI}{FET} \quad (6)$$

式中,*FI* 表示氮、磷、钾单质或总肥的化肥施用强度,是一年内作物单位播种面积氮、磷、钾或总肥的实际施用数量(kg · hm^{-2})。

FII 表明了化肥施用强度对环境的影响程度,其值越接近 1,化肥施用强度愈接近环境安全阈值,化肥施用愈合理;*FII* 愈大于 1,施肥量越大,对环境影响越大,*FII* 愈小于 1,施肥量越小,越难以保证作物高产。*FII* 过大或过小都属于施肥不合理,都影响到化肥施用合理指数 *FRI* 往小的方向上变化,即 *FRI* 用同一数值可以表示化肥施用不足或施用过度的不合理问题。*FRI* 的值在 0 和 1 之间,当 *FRI* 值越趋于 1,表明施肥越合理,生态经济合理性越强;*FRI* 值越趋于 0,施肥越不合理,合理性越差。

1.3 化肥施用生态经济合理性等级及类型

多项研究表明,氮磷钾化肥施用适宜量都有一个变化范围,大约在其平均数的上下各浮动10%~20%。例如北方平原区氮肥投入阈值为 270~337.5 kg · hm^{-2},能保证春玉米高产,并且对环境不会造成污染(连彩云等,2016);南方赤红壤区稻田施磷量(P_2O_5)为 63~81 kg · hm^{-2}时,土壤磷流失的风险相对较低(区惠平等,2016),苏南太湖流域兼顾生产、生态和经济三效益比较合理的水稻适宜施氮量为 221.5~261.4 kg · hm^{-2}时,相应的经济、生态适宜产量为 7379.6~7548.6 kg · hm^{-2}(崔玉亭等,2000)。因此,假设化肥施用量在环境安全阈值(统计平均值)的上下各 15%的区间为生态经济合理施肥量,按照上下各变化 15%~20%的梯度,分别划分出化肥施用量距离环境安全阈值平均数上下变动 15%(*FRI* = 1~0.9)、15%~30%(*FRI* = 0.6~0.9)、30~50%(*FRI* = 0.3~0.6)、>50%(*FRI*<0.3)的合理施肥、较合理施肥、不合理施肥和很不合理施肥 4 个化肥施用生态经济合理性等级和类型(表 1)。

表 1 化肥施用合理指数(*FRI*)等级及生态经济合理性类型
Table 1 Grades of fertilization rational indexes (*FRI*) and sorts of eco-economic rationality

合理性等级	*FRI*	合理性类型	分类依据
1	0.9~1.0	合理施肥	施肥量在环境安全阈值的±15%范围内
2	0.6~0.9	较合理施肥	施肥量在环境安全阈值的±15~30%范围内
3	0.3~0.6	不合理施肥	施肥量在环境安全阈值的±30~50%范围内
4	<0.3	很不合理施肥	施肥量在环境安全阈值的±50%以外

1.4 数据来源

本研究中使用的河南省氮磷钾化肥施用量、粮食产量、作物播种面积等基础数据主要来源于历年《河南统计年鉴》(河南统计局,2019),并参考中华人民共和国国家统计局(2019)网站的国家数据计算出河南复合肥的施用量。根据市场调查情况,并参考有关文献(宋大平等,2011;孟远夺等,2015;张卫峰等,2017)和联合国粮农组织对我国复合肥中氮磷钾化肥的计算方法(FAOSTAT,2019),复合肥中的氮磷钾含量统一按 1∶1∶1 处理。

2 结果与分析

2.1 河南省化肥施用生态经济合理性时间变化

2.1.1 1980—2017 年化肥施用强度及环境安全阈值变化 根据公式(1)—(4),计算出河南省 1980—2017 年化肥施用强度和环境安全阈值(图 1)。图 1 表明,几十年来,河南省化肥施用强度一直呈增长趋势。从1980年的约67 kg · hm^{-2}增加到

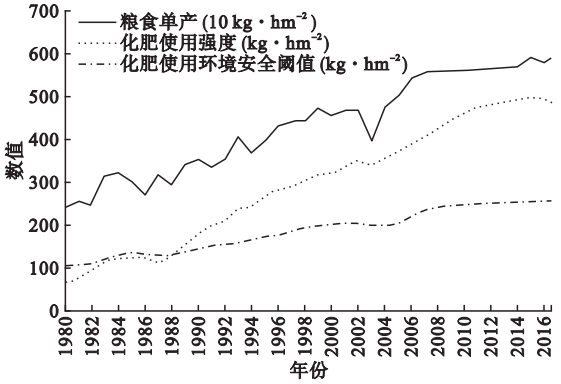


图 1 河南省 1980—2017 年化肥施用强度、环境安全阈值及粮食产量的变化

Fig.1 Changes of fertilization intensities, environmental safety thresholds and grain yields in Henan in 1980-2017

2017 年的约 482 kg·hm^{-2},增加了 7 倍,同期粮食产量从 2425 kg·hm^{-2}增加到 2017 年的 5977 kg·hm^{-2},提高了 2.5 倍。粮食生产和化肥施用两者之间有着密切的关系,相关系数高达 0.98,属于极高度相关。可见,化肥施用对河南省的粮食生产做出了巨大的贡献。河南省化肥施用环境安全阈值与施肥强度呈剪刀差形式变化。河南化肥施用环境安全阈值从 1980 的 104 kg·hm^{-2}增加到 2017 年的 266 kg·hm^{-2}。1988 年之前,化肥施用强度低于环境安全阈值,其后化肥施用强度超过了环境安全阈值,并且两者的差距越来越大。两者差距的原因是多方面的,但主要与农户长期以来普遍采用的"高投入高产出"生产模式,过量投入化肥有关。环境安全阈值的变化与粮食产量的提高有关。随着产量的提高,作物需肥量也相应提高,故环境安全阈值也发生了相应的变化。由于粮食产量提高较慢,使得环境安全阈值增加也慢,而化肥施用量增加较快,这就逐渐拉开了两者的距离。因此,多年来河南化肥施用量远远超过了作物的实际需求,化肥流失和环境污染的风险越来越大。但从 2015 年以后,河南粮食产量继续增加,而化肥施用强度有所减少,与环境安全阈值的差距趋于收敛。这是与河南响应国家农业部 2015 年提出《到 2020 年化肥使用量零增长行动方案》(农业部种植业管理司,2015)后采取的一系列减肥增效的政策措施有关。需要说明的是,2013 年之前,用模型计算出的河南省化肥施用环境安全阈值小于 250 kg·hm^{-2},正好符合原国家环境保护部 2010 年关于生态乡镇建设规定的化肥施用强度小于 250 kg·hm^{-2}的要求。

2.1.2 1980—2017 河南省化肥施用生态经济合理性变化 根据公式(5)、(6),计算出河南省化肥施用强度指数和合理指数(图 2)。图 2 可见,河南省的化肥施用强度指数呈现不断升高的态势,强度指数由 1980 年的 0.64 增加到 2017 年的 1.84,增加了近 3 倍,说明化肥施用对环境的压力越来越大。化肥施用合理指数由 1980 年的 0.72 上升到 1988 年的 1.00,而后又降低到 2017 年的 0.16,因此,河南省化肥施用的生态经济合理性经历了"较合理-合理-不合理-很不合理"的变化过程。化肥施用合理指数在 1988 年以前与化肥施用强度指数的变化一致,是由施肥不足到施肥合理的变化,1988 年以后两者朝相反的方向呈对称变化,即施肥越多则越不合理的变化。在 1988 年以后化肥施用合理性不断降低的变化中,2005 年后出现明显拐点,化肥施用合理性明显增加到 2008 年。这与 2005 年我国为防治化肥过度施用普遍开展的测土施肥项目有关。2008 年以后,化肥过度施用出现反弹,施肥合理性又开始降低,到了 2015 年国家提出化肥施用零增长行动方案后,化肥施用合理性又开始上升。这说明政府对农业化肥施用的干预和引导作用十分明显。

2.2 河南省化肥施用生态经济合理性空间变化

河南是一个山地丘陵平原盆地具备的省份,其山地丘陵面积 7.4×10^4 km^2,占全省总面积的44.3%;平原和盆地面积 9.3×10^4 km^2,占总面积的55.7%。2017 年耕地面积 8112.3×10^3 hm^2,作物播种面积 14732.5×10^3 hm^2,复种指数为 1.82。18 个地市的自然环境和社会经济发展程度差异很大,化肥施用和粮食产量表现出明显的地域差异。根据各地市2015、2016、2017年3年的粮食产量平均值,利用

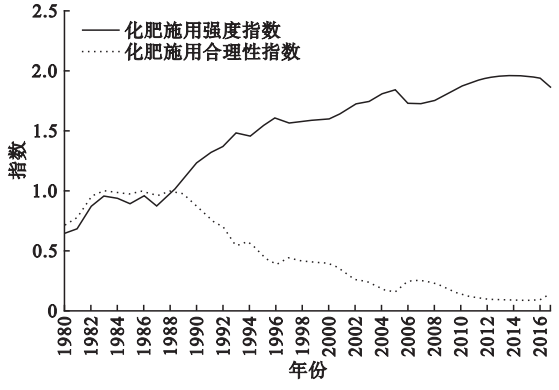


图 2 河南省 1980—2017 年化肥施用强度指数及合理指数变化

Fig.2 Changes of fertilization intensity indexes and rational indexes in Henan in 1980-2017

表 2 河南省 2017 年各地级市氮、磷、钾及总化肥施用环境安全阈值(FET_N、FET_P、FET_K、FET,kg · hm^{-2})、强度指数(FII_N, FII_P, FII_K, FII)及合理指数(FRI_N, FRI_P, FRI_K, FRI)

Table 2 N, P, K and the total fertilization environmental safety thresholds (FET_N, FET_P, FET_K, FET, kg · hm^{-2}), intensity index (FII_N, FII_P, FII_K, FII) and rational index (FRI_N, FRI_P, FRI_K, FRI) of prefectural-level cities of Henan in 2017

地市	FET_N/FII_N	FET_P, FET_K/FII_P/FII_K	FET/FII	N:P:K	FRI_N	FRI_P	FRI_K	FRI
郑州	106/2.0	53/2.8/2.1	211/2.2	1∶0.7∶0.5	0.01	0.00	0.00	0.00
开封	128/1.4	64/1.7/1.2	257/1.4	1∶0.6∶0.4	0.37	0.08	0.83	0.37
洛阳	100/1.5	50/2.1/1.8	200/1.7	1∶0.7∶0.4	0.25	0.00	0.04	0.07
平顶山	109/2.8	55/3.6/3.1	218/3.1	1∶0.7∶0.6	0.00	0.00	0.00	0.00
安阳	141/2.0	71/2.2/1.8	283/2.0	1∶0.6∶0.4	0.01	0.00	0.06	0.01
鹤壁	156/1.4	78/1.5/1.0	313/1.3	1∶0.5∶0.4	0.47	0.29	1.00	0.61
新乡	145/2.2	72/2.5/1.9	289/2.2	1∶0.6∶0.4	0.00	0.00	0.02	0.00
焦作	163/1.7	82/2.1/1.5	326/1.7	1∶0.6∶0.4	0.07	0.00	0.29	0.06
濮阳	150/1.7	75/2.0/1.3	301/1.7	1∶0.6∶0.4	0.07	0.00	0.58	0.08
许昌	143/1.5	72/2.1/1.7	287/1.7	1∶0.7∶0.6	0.32	0.00	0.08	0.10
漯河	147/1.5	74/2.0/1.8	295/1.7	1∶0.7∶0.6	0.36	0.01	0.06	0.12
三门峡	90/1.6	45/2.0/2.1	179/1.8	1∶0.6∶0.7	0.18	0.00	0.00	0.03
南阳	119/1.6	60/2.2/1.7	238/1.8	1∶0.7∶0.6	0.19	0.00	0.07	0.06
商丘	148/1.7	74/2.8/2.2	295/2.1	1∶0.8∶0.6	0.06	0.00	0.00	0.00
信阳	151/1.7	76/1.7/0.8	303/1.5	1∶0.5∶0.2	0.09	0.09	0.89	0.30
周口	145/1.4	72/1.9/1.4	289/1.5	1∶0.7∶0.5	0.38	0.02	0.51	0.24
驻马店	135/1.2	67/2.0/1.8	270/1.6	1∶0.8∶0.7	0.75	0.01	0.06	0.20
济源	117/1.7	59/2.6/1.9	235/2.0	1∶0.7∶0.5	0.05	0.00	0.03	0.01
平均	133/1.7	67/2.2/1.7	266/1.8	1∶0.6∶0.5	0.20	0.03	0.25	0.13

公式(1)~(6),计算出 2017 年各地级市的化肥施用环境安全阈值、强度指数和合理指数,分析各地市化肥施用生态经济合理性的空间变化(表 2)。

由表 2 可见,2017 年河南省 18 个地市的化肥施用强度指数都大于 1,合理指数大多小于 0.3,生态经济合理性为很不合理。只有鹤壁的化肥施用较合理,化肥施用量没有超出环境安全阈值的 30%,为生态经济合理性二级水平(图 3)。这因为一是鹤壁的粮食产量比较高,化肥施用环境安全阈值大,二是鹤壁的化肥施肥量比较低,施肥效率在全省是最高的。这得益于鹤壁作物秸秆还田率高和有机肥产业蓬勃发展(毕桃付等,2018)。另外,除开封和信阳外,其他各地市的化肥施用都超出了环境安全阈值的 50%,属于化肥施用很不合理,为生态经济合理性四级水平。从全省的氮磷钾比例结构来看,磷肥施用偏高,特别是驻马店和商丘磷钾比例过高,但信阳钾肥施用明显不足。就单质化肥施用生态经济合理性来说,仅驻马店氮肥施用合理指数大于 0.6,属于施氮较合理,另外有 5 个地市为不合理,12 个市为很不合理(图 4);磷肥的过量施用更为严重,全省都为很不合理;钾肥不合理施用的情况较轻,鹤壁为合理施用,属于生态经济合理性一级水平,开封、信阳为较合理施用,属于合理性二级水平,濮阳、周口为不合理施用,为合理性三级水平,其余为很不合理施用的生态经济合理性四级水平(图 5)。

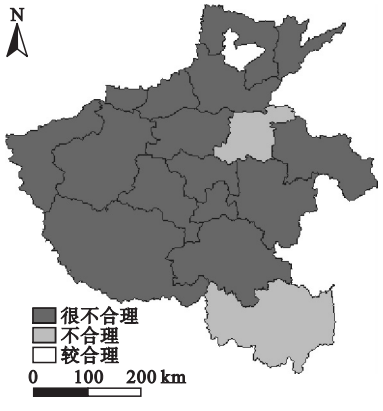


图 3 河南省 2017 年总化肥施用生态经济合理性

Fig. 3 Fertilization eco-economic rationality of Henan in 2017

2.3 河南省化肥施用减量潜力

根据实际的化肥施用强度和由模型计算出的环境安全阈值的差值,就可以估算出化肥减量的潜力。总体来讲,河南省的化肥过度施用是很严重的,具有很大的减量潜力。以 2017 年为例,河南省化肥施用强度为482 kg · hm^{-2},作物种植面积为14726×

表 3 河南省 2017 年各地市作物种植面积(×10³ hm²)和氮、磷、钾及总化肥施用强度(FI_N, FI_p, FI_k, FI, kg·hm⁻²)及减量潜力(×10⁷ kg)

Table 3 The crop areas (×1000 hm²) and N, P, K and total fertilization intensities (FI_N, FI_p, FI_k, FI, kg·hm⁻²) and reduction potentials (×10⁷ kg) of prefectural-level cities of Henan in 2017

地市	种植面积	FI_N	FI_P	FI_K	FI	减氮潜力	减磷潜力	减钾潜力	总减肥潜力
郑州	445	210	148	109	467	4.6	4.2	2.5	11.4
开封	849	186	110	76	372	4.9	3.9	1.0	9.8
洛阳	684	153	103	90	345	3.6	3.6	2.7	9.9
平顶山	562	301	198	170	668	10.8	8.0	6.5	25.3
安阳	803	279	154	124	557	11.0	6.7	4.3	22.0
鹤壁	195	217	117	77	411	1.2	0.8	0.0	1.9
新乡	867	315	184	135	634	14.8	9.7	5.4	29.9
焦作	344	282	167	122	571	4.1	2.9	1.4	8.4
濮阳	536	261	153	100	514	6.0	4.2	1.3	11.5
许昌	521	212	148	122	482	3.6	4.0	2.6	10.2
漯河	361	214	145	129	488	2.4	2.6	2.0	7.0
三门峡	296	143	91	93	327	1.6	1.4	1.4	4.4
南阳	2018	188	128	104	420	13.9	13.9	8.9	36.6
商丘	1456	258	206	163	627	16.1	19.3	13.0	48.3
信阳	1137	258	129	64	451	12.1	6.0	−1.3	16.8
周口	1835	208	137	99	444	11.7	11.9	4.9	28.5
驻马店	1769	167	136	118	422	5.8	12.2	9.0	27.0
济源	52	207	151	109	468	0.5	0.5	0.3	1.2
平均		226	145	112	482	总量:128	总量:116	总量:66	总量:310

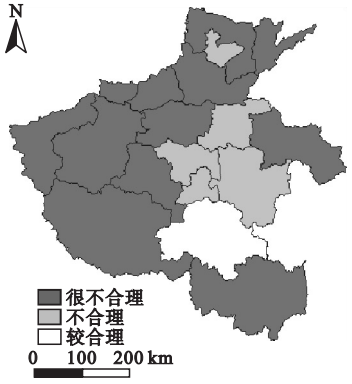


图 4 河南省 2017 年氮肥施用生态经济合理性

Fig.4 N fertilization eco-economic rationality of Henan in 2017

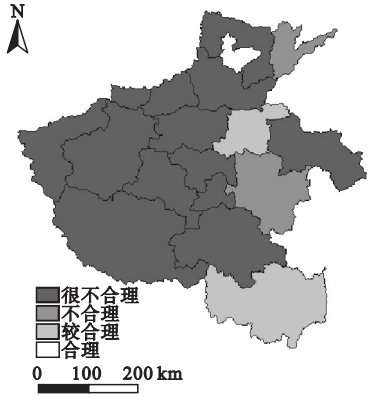


图 5 河南省 2017 年钾肥施用生态经济合理性

Fig.5 K fertilization eco-economic rationality of Henan in 2017

10^3 hm²,共消费化肥约 710×10^7 kg,如果严格按照化肥施用环境安全阈值施肥,全省可节约氮磷钾化肥约 310×10^7 kg,化肥施用量可减少 44%,其中氮肥的减量潜力最大,占总减肥量 40%以上,磷肥减量潜力几乎是钾肥的 2 倍(表 3)。各地市化肥减量潜力差异很大,最小的是济源市 1.2×10^7 kg,最大的是商丘 48.3×10^7 kg,南阳、商丘、周口、驻马店由于其作物种植面积大以及新乡和平顶山由于施肥强度高而使减量潜力来源不同(毛俊等,2018)。

3 讨 论

化肥的合理施用是一个历久弥新的话题,是实施化肥减量、保障农业可持续发展的关键因素。减量过多难以保证粮食高产稳产,减量不足难以解决化肥面源污染问题。因此,确定合理的生态经济施用量极为重要。原国家环境保护总局(2007)和原国家环境保护部(2010)在推动生态省市县和乡镇建设中,规定了化肥施用强度不得超过 250 kg·hm⁻²的评价指标,本文计算的河南省 2007—2017 年 10 多年来的化肥施用环境安全阈值平均为 249 kg·hm⁻²与之非常接近,单就 2010 年河南省的化肥施用环境安全阈值 247 kg·hm⁻²与之相比,两者也基本一致。另据 2005—2010 年国家测土配方施肥项目在河南省开展的“3414”田间试验,河南省小麦、玉米的经济最佳施氮量平均为 164 kg·hm⁻²(赵

亚南等,2018),若将其降低 20%,其氮肥环境安全阈值是 131 kg · hm^{-2},本文用模型方法计算出的氮肥施用环境安全阈值 133 kg · hm^{-2} 与之也非常接近。这充分说明了笔者提出的化肥施用环境安全阈值模型有一定的科学性和实用性。

化肥施用环境安全阈值模型是基于区域粮食目标产量进行设计,综合地反映了不同地区的土壤气候条件、社会经济条件和农田管理水平对化肥施用环境安全的影响,是一个随时空变化的动态数据,为我国不同地区生态农业建设制定化肥施用强度生态标准提供了可靠的参考依据。从模型来看,化肥施用环境安全阈值与粮食产量有正相关关系,似乎是粮食产量越高,环境安全阈值越高。这从目前的粮食生产条件来说是合理的。但随着生产条件的变化和施肥技术的提高,特别是有机肥的合理使用,会有效地降低化肥的消费量,这就需要根据当地自然经济条件,适当调整化肥施用环境安全阈值模型中的系数 ρ,确定适合不同地域的化肥施用环境安全阈值。尽管不同作物、不同土壤上化肥施用生态经济适宜量千差万别,但利用模型方法计算区域范围的化肥施用环境安全阈值具有更加广泛的实用性和宏观指导价值。由于粮食产量是所在区域农业生产条件的综合体现,所以基于产量的化肥施用环境阈值模型也可用于更小范围甚至地块的化肥施用生态经济合理性评价。

本文将化肥施用环境安全阈值(统计平均值)上下浮动 15%作为化肥施用生态经济合理范围,评价结果较好地反映了河南的实际情况。对其他地区来讲,可根据各地的自然条件作适当调整。因为不同气候区化肥利用率不同,化肥过量对生态的影响和施肥不足对粮食产量的影响各不相同。一般来说,在以干旱和半干旱气候为主的地区,化肥利用率较低,化肥流失较为缓慢,化肥施用合理范围在环境安全阈值上下浮动幅度可以适当扩大,以湿润和半湿润气候为主的地区,雨量大,土壤水分含量高,化肥容易吸收也容易流失,浮动幅度可以适当缩小。同时调整符合区域特征的化肥施用合理指数的范围,使施肥生态经济合理性评价结果更为准确些。

笔者提出的化肥施用合理指数模型是化肥施用强度、环境安全阈值和粮食生产能力的综合反映。该模型把化肥施用过度和施用不足的不合理现象统一用一个指标表示,较好地处理了化肥施用合理与不合理的关系。但是,合理指数本身不能明确指出施肥不合理是属于施肥不足不合理还是施肥过量不合理,而需要结合模型中化肥施用强度指数是大于 1 或小于 1 才能说明,如何解决这一问题有待于今后进一步研究。由于资料原因,本文重点就化肥施用生态经济合理性进行了分析,随着有机肥的推广使用,势必会降低化肥的用量,未来将结合有机肥的施用情况,进一步评估河南化肥施用的生态经济合理性。

4 结论与建议

通过数学模型方法确定河南省化肥施用的环境安全阈值,分析河南省 1980—2017 年化肥施用生态经济合理性时空变化情况及节肥减量潜力,得出如下结论:

从 1980 年到 2017 年,河南省化肥施用生态经济合理性经历了从施肥不足不合理到合理又到过量不合理的变化过程。化肥施用强度由 67 kg · hm^{-2} 增加到约 482 kg · hm^{-2},化肥施用环境安全阈值由 104 kg · hm^{-2} 增加到 266 kg · hm^{-2},化肥施用合理指数由 0.72 上升到 1988 年的 1.00,而后又降低到 0.16。河南省绝大多数地市化肥施用生态经济很不合理。2017 年 18 个地级市中鹤壁的化肥施用生态经济合理性为较合理,开封和信阳为不合理,其他 15 个地市均为很不合理。其中,磷肥施用不合理性最严重,氮肥次之,钾肥较轻。

目前河南省化肥施用强度为 482 kg · hm^{-2},按照化肥施用环境安全阈值施肥,全省可节约化肥约 310×10^7 kg,其中节约氮磷钾单质肥料分别为 128.4×10^7、115.7×10^7、65.9×10^7 kg。各地化肥减量潜力差异很大,南阳、商丘、周口、驻马店由于其种植面积大以及新乡和平顶山由于施肥强度高而节肥减量任务更大。

河南省化肥施用严重过量,为实施减量行动提出以下几项建议:

(1)加快制定区域化肥施用适宜量标准和减量技术方案。各地市应将测土配方施肥田间测验和化肥施用环境安全阈值模型相结合,确定合理的施肥指标和技术措施,因地制宜,分类指导。通过调整施肥数量、施肥比例、肥料品种和种植结构等综合措施减肥增效。豫东、豫北平原区施肥严重超量,化肥减量增效应以玉米、蔬菜减量施肥为主,大力推广玉米种肥机械异位同播等技术;豫中南平原区肥料施用稍为过量,磷钾施用比例偏高,可调整施肥结构,提

高肥料效力;豫南地区多为水稻土,施肥过量与不足并存,部分地区磷钾肥施用比例偏低,特别是钾肥施用不足,节肥增效应以氮肥为主,通过发展绿肥,促进豆科作物固氮肥田,增施有机肥和钾肥用量;豫西山地丘陵区经济林面积大、超量施肥严重,减量增效应以果树为主,主推有机肥替代、水肥一体化等技术。豫东南平原区,以调整肥料品种结构为突破,少施酸性肥,多施碱性肥,实现减肥增效和改善土壤环境。

(2)化肥减量行动可分阶段进行。可从最高产量施肥量、最佳经济施肥量和生态经济施肥量等逐步减少,根据这些施肥量的减量效果,采取不同的减肥策略。可采取由点到面的减量技术推广方式,以省、市土壤肥料技术部门的施肥指导意见为基础,结合本地实际,分区域、分作物、分品种集成提炼化肥减量增效技术模式,打造示范片。以基层农业技术推广服务机构为纽带,吸纳专业合作社、种植大户、农资企业等主体,在示范片集中力量,相互协调融合,形成化肥减量增效的最优推广途径。施肥技术要点、应用模式、推广途径等在示范片定型后,向同类型区域全面推广。

(3)加强对广大施肥农户和肥料企业的技术指导和信息技术服务。通过对农户认土、识肥和选种的技术培训和指导,提高农户科学施肥的积极性和自觉性。利用互联网技术,加快研发各项标准的信息化系统建设,定期发布主要农作物施肥配方,引导农户按方施肥、肥料企业按方生产配方肥。构建测土配方施肥微信公众号等科学施肥信息化、数字化和智能化服务等平台,广泛、快速传播测土配方施肥技术,及时更新完善县域测土配方施肥专家咨询系统,方便基层网点按方为农户配肥供肥,全面提升农业肥料和农田肥力等的标准信息及相关知识的获取、处理、传播、交流与合理利用水平。帮助农户将正确的肥料、正确的用量,在正确的时间施用到正确的部位,保证农业的可持续发展。

参考文献

毕桃付, 郭太忠, 郭宏伟. 2018. 鹤壁市农作物秸秆资源化利用的实践探索. 农业科技通讯, (7): 232-234.

崔玉亭, 程 序, 韩纯儒, 等. 2000. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究. 生态学报, **20**(4): 659-662.

董合林, 李鹏程, 刘敬然, 等. 2015. 钾肥用量对麦棉两熟制作物产量和钾肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, **21**(5): 1159-1168.

郭战玲, 寇长林, 杨占平, 等. 2015. 潮土区小麦高产与环境友好的磷肥施用量研究. 河南农业科学, **44**(2): 52-55.

郭战玲, 寇长林, 张香凝, 等. 2015. 潮土区小麦高产与环境友好的施氮量研究. 河南农业科学, **44**(11): 45-49.

河南统计局. 2019. 河南统计年鉴[EB/OL]. (2019-02-01)[2019-02-01] http://www.ha.stats.gov.cn/sitesources/hntj/page_pc/tjfw/tjcbw/tjnj/list1.html.

环境保护部. 2010. 关于印发《国家级生态乡镇申报及管理规定(试行)》的通知[EB/OL]. (2010-06-23)[2019-02-01]. http://www.jhepb.gov.cn/html/news/20150818/15303.shtml

环境保护总局. 2007. 关于印发《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》的通知[EB/OL]. (2007-12-26)[2019-02-01]. http://www.gdep.gov.cn/zcfg/bmguizhang/201309/t20130903_154923.html.

黄 明, 吴金芝, 李友军, 等. 2018. 施磷量对低磷灌区冬小麦产量、经济效益和农学效率的影响. 麦类作物学报, **38**(2): 183-190.

黄 鑫, 李耀光, 孙 婉, 等. 2018. 不同粒色小麦籽粒铁锌含量和生物有效性及其对氮磷肥的响应. 作物学报, **44**(10): 1506-1516.

靳海洋, 谢迎新, 刘 园, 等. 2016. 冬小麦上短控释期尿素的适宜施用量与施用方法研究. 植物营养与肥料学报, **22**(2): 542-549.

巨晓棠. 2015. 理论施氮量的改进及验证:兼论确定作物氮肥推荐量的方法. 土壤学报, **52**(2): 1-13.

连彩云, 马忠明. 2016. 北方平原区春玉米化学氮肥投入阈值. 西北农业学报, **25**(1): 9-15.

刘钦普. 2017. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化. 农业工程学报, **33**(6): 214-221.

刘钦普. 2014. 河南省化肥施用强度地理分布及其环境风险评价. 河南农业科学, **43**(6): 66-70.

骆世明. 2018. 中国生态农业制度的构建. 中国生态农业学报, **26**(5): 759-770.

毛 俊, 邵瑞鑫, 郭家萌, 等. 2018. 河南省夏玉米生产水足迹区域差异. 生态学杂志, **37**(8): 2317-2323.

孟远夺, 许发辉, 杨 帆, 等. 2015. 我国种植业化肥施用现状与减量潜力分析. 磷肥与复肥, **30**(9): 1-4.

农业部种植业管理司. 2015. 农业部关于印发《到2020年化肥使用量零增长行动方案》和《到2020年农药使用量零增长行动方案》的通知[EB/OL]. (2015-03-18)[2019-02-01]. http://jiuban.moa.gov.cn/zwllm/tzgg/tz/201503/t20150318_4444765.htm.

区惠平, 周柳强, 黄美福, 等. 2016. 不同施磷量下稻田土壤磷素平衡及其潜在环境风险评估. 植物营养与肥料学报, **22**(1): 40-47.

宋大平, 陈 巍, 高彦征. 2011. 淮河流域氮肥农药施用的合理性及其环境影响. 农业环境科学学报, **30**(6): 1144-1151.

王激清, 马文奇. 2006. 五大因素影响化肥氮磷钾消费比例合理化. 中国农资, (6): 14-15.

武金果. 2013. 河南省不同区域小麦氮肥应用效果及适宜施氮量研究. 河南科学, **31**(11): 1891-1896.

新华社. 中共中央 国务院关于坚持农业农村优先发展做好“三农”工作的若干意见[EB/OL]. (2019-02-19)[2019-02-30]. http://www.gov.cn/zhengce/2019-02/19/content_5366917.htm.

薛 冰, 董书恒, 黄裕普, 等. 2019. 1980—2016 年辽宁省主要粮食作物生产水足迹时空演变特征. 生态学杂志, **38**(9): 2813-2820.

岳俊芹, 张德奇, 李向东, 等. 2016. 氮钾配施下施磷对冬小麦群体发育特性、冠层光截获及产量的影响. 中国农业科学, **49**(5): 840-851.

章明清. 2006. 土壤-植物系统养分运移与生态经济施肥量研究 (博士学位论文). 广州: 华南农业大学.

张卫峰, 易俊杰, 张福锁. 2017. 中国肥料发展研究报告 2016. 北京: 中国农业大学出版社: 50-70.

张 弦, 朱玉华, 高 阔, 等. 2018. 世界化肥产业格局及竞争力研究. 世界农业, (8): 146-152.

张 翔, 毛家伟, 王守刚, 等. 2009. 河南主要土类玉米小麦轮作制下施用钾肥效应研究. 中国土壤与肥料, (1): 20-22.

张月平, 张炳宁, 王长松, 等. 2011. 基于耕地生产潜力评价确定作物目标产量. 农业工程学报, **27**(10): 328-333.

赵 檬. 河南出台 2018—2020 年化肥使用量零增长行动方案[EB/OL]. (2018-04-04)[2019-02-01]. https://www.henan.gov.cn/2018/04-04/263434.html.

赵亚南, 徐 霞, 黄玉芳, 等. 2018. 河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力. 中国农业科学, **51**(14): 2747-2757.

中华人民共和国国家统计局. 2019. 国家数据[EB/OL]. (2019-02-01)[2019-02-01]. http://data.stats.gov.cn/.

FAOSTAT. Date [EB/OL]. (2019-02-01) [2019-02-01]. http://www.fao.org/faostat/zh/#data/

作者简介 刘钦普, 男, 1957 年生, 教授, 博士, 主要从事农业生态经济研究。E-mail: liuqinpu@163.com

责任编辑 李凤芹