

于伟咏, 漆雁斌, 何悦, 等. 水稻灌溉用水效率和要素禀赋对化肥面源污染的影响——基于分位数回归的分析 [J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(7): 1274–1287.

YU Wei-yong, QI Yan-bin, HE Yue, et al. The effect of rice irrigation efficiency and related factors on fertilizer non-point source pollution based on quantile regression[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1274–1284.

水稻灌溉用水效率和要素禀赋对化肥面源污染的影响 ——基于分位数回归的分析

于伟咏¹, 漆雁斌¹, 何悦^{1,2}, 邓鑫³

(1.四川农业大学经济学院, 成都 611130; 2.长江师范学院财经学院, 重庆 涪陵 408000; 3.四川农业大学管理学院, 成都 611130)

摘要:通过测度长江上游4省(市)797份样本户水稻灌溉用水效率和化肥面源污染量,基于分位数回归方法,深入分析灌溉用水效率、生产方式和农户要素禀赋对化肥面源污染的影响。研究表明,总体上灌溉总效率均值为0.14,纯技术效率均值为0.27,规模效率均值为0.55,水稻灌溉用水效率改进空间较大,规模化程度高的平原地区用水效率更高;灌溉用水效率与化肥施用量间存在显著替代效应,两者呈振幅增强的波动式发展;节水灌溉能够降低化肥面源污染,同时具有保肥效果;水旱轮作模式、耕作方式、秸秆还田方式对化肥面源污染存在影响,但未全部通过显著性检验;耕地细碎化、农业补贴和商品化率会增加化肥面源污染;年龄、受教育程度减轻化肥面源污染的临界点较高,政治参与程度对化肥面源污染影响不显著。

关键词:化肥面源污染;灌溉用水效率;生产方式;要素禀赋;分位数回归

中图分类号:X592 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)07-1274-11 doi:10.11654/jaes.2017-0586

The effect of rice irrigation efficiency and related factors on fertilizer non-point source pollution based on quantile regression

YU Wei-yong¹, QI Yan-bin¹, HE Yue^{1,2}, DENG Xin³

(1.College of Economics, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Institute of Finance and Economics, Yangtze Normal University, Chongqing Fuling 408000, China; 3.College of Management, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: This article measures rice irrigation water-use efficiency and fertilizer non-point source pollution of 797 households across four provinces (municipalities) in the upper reaches of Yangtze river. It analyzed the effect of rice irrigation water-use efficiency, mode of production, and effects of other factors on fertilizer non-point source pollution based on quantile regression. The results show that the average irrigation efficiency of rice is 0.14, the average scale efficiency is 0.55, the average technical efficiency is 0.27, and the rice irrigation water efficiency improvement space is larger. A substitution effect between irrigation water-use efficiency and the amount of fertilizer applied exists, which enhances the amplitude of fluctuation. Water-saving irrigation methods can reduce fertilizer non-point source pollution and preserve fertilizers. Floods and droughts (FDD) rotation mode, farming methods, and straw counters-field ways have an effect on fertilizer non-point source pollution, although not all these effects were significant. Cultivated land and finely, agricultural subsidies and commercialization rate can increase non-point source fertilizer pollution. The critical point that age and education level reduced fertilizer non-point

收稿日期: 2017-04-20

作者简介: 于伟咏(1988—),男,博士研究生,四川雅安人,主要研究方向为农业资源环境。E-mail: ywy212@163.com

*通信作者: 漆雁斌 E-mail: qybin@sina.com

基金项目: 国家社会科学基金项目(14XGL003); 四川省农村发展研究中心青年项目(CR1624, CR1719)

Project supported: The National Social Science Foundation of China (14XGL003); The Young Fund of the Sichuan Rural Development Research Center (CR1624, CR1719)

source pollution is higher, but political participation has no significant effect.

Keywords: fertilizer non-point source pollution; irrigation water efficiency; production mode; factor endowments; quantile regression

农业向人类提供食物、纤维和原材料的同时,也产生环境污染等有害物品^[1]。其中化肥的过量施用和高流失率,通过农田地表径流、壤中流、农田排水和地下水渗漏进入水体而形成地表和地下水环境污染,从而形成由化肥造成的农业面源污染(简称化肥农业面源污染)^[2]。我国化肥有效利用率相对发达国家偏低,有研究表明目前氮肥利用率仅为 30%~35%,磷肥和钾肥分别为 10%~20%和 35%~50%,平均低于发达国家 15%~20%^[3]。过量施肥现象严重,特别是水稻高产地区同时也是高污染地区^[5]。据测算 1990—2008 年间我国因化肥施用导致的 TN 排放从 313.27 万 t 增加到 408.88 万 t,TP 排放从 16.66 万 t 增加到 25.03 万 t^[6]。因此,防控化肥面源污染成为紧迫的现实问题,同时具有潜在经济价值,如整个江苏省治理农业面源污染可实现 25.06 亿元收益^[7],但其公共属性决定治理需要由政府负责。

化肥面源污染发生一是由于负外部性、“公地悲剧”、治理成本高等特征导致的“市场失灵”和政府的“规制失灵”^[8],制度环境产生了非预期效果^[9];二是从农户生产行为出发,生存和发展压力,农业经营行为短视化,环保意识淡薄,缺乏公共服务支持等原因,集中导致化肥过量不合理施用^[10]。长期过度的化学投入,导致土地持续生产力下降,为保证产量,农业发展进入“化学陷阱”。化肥面源污染治理需要多方面系统控制,措施之一节水灌溉在减少农田氮磷流失方面具有一定优势,与传统灌溉相比较,节水灌溉能够节水 25%以上,渗漏量(水稻)减少 31.7%,氮肥利用率增加 3%~5%^[11]。水资源有效利用能够缓解农业面源污染,但目前我国水资源利用粗放、浪费严重,在农业灌溉过程中水的有效利用率仅为 30%~40%。除了节水灌溉,文献整理得到影响化肥面源污染的因素很多,从农户视角可分为内部因素和外部环境因素。内部因素包括土地经营规模、家庭劳动力、家庭收入、农户受教育程度、环保意识、政治参与程度等^[12-15];外部环境因素包括地区经济发展水平、农业政策、种植结构、城乡二元经济社会结构等^[16-18]。目前存在的治理障碍主要是由于农业生产者、环境规制部门及其他利益相关者,均存在污染治理的政治、预算和技术上的障碍^[19]。本文通过测度长江上游 4 省(市)797 份样本户水稻灌溉用水效率和化肥面源污染量,基于分位数回归方

法,深入探讨灌溉用水效率、生产方式和农户要素禀赋对化肥面源污染的影响,以期对提高农业灌溉用水效率,缓解化肥面源污染提供依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来自于 2014 年对长江上游地区四川、重庆、云南、贵州四省(市)水稻种植户的调查,共整理得到有效问卷 797 份,覆盖 19 个县(区)。各地区调研分布情况见表 1。鉴于数据的可得性和调研方便性,问卷调研主要集中在四川,其中四川、贵州、云南和重庆问卷比例分别为 76.66%、9.16%、8.06%、6.02%,四川省问卷主要分布在成都平原,由于成都平原灌溉水资源丰富充沛,对于灌溉设施使用率较高。为反映调查结果的客观真实性,作了以下验证,调查结果统计户均水稻种植面积为 1813 m²,与农业部农村经济研究中心“我国粮食安全发展战略研究”课题组 2011 年在农业部种植业管理司支持下开展的西南地区 505 个种粮调查结果中户均 1867 m² 基本一致。

1.2 研究方法

农业灌溉用水作为农业生产的基本要素投入,必

表 1 调研样本分布情况
Table 1 Distribution of research sample

省份 Province	地区 Region	份数 Additional copies	比例 Proportion
四川省 Sichuan	成都	210	26.35
	德阳	73	9.16
	绵阳	71	8.91
	资阳	68	8.53
	遂宁	74	9.28
	南充	41	5.14
	广元	35	4.39
	巴中	39	4.89
贵州省 Guizhou	黔西南州	38	4.77
	安顺	35	4.39
云南省 Yunnan	玉溪	15	1.88
	曲靖	14	1.76
	红河州	8	1.00
	个旧	18	2.26
	楚雄	10	1.26
重庆市 Chongqing	巴南	28	3.51
	涪陵	20	2.51

须和其他生产要素科学配合,从而带来农业经济效益产出。农业灌溉用水效率是指,每消耗单位水资源所产生的粮食产品。具体到水资源作为投入要素的角度看,农业灌溉用水效率即为实现最优产出下的最少农业灌溉用水投入量与实际用水量的比值^[20]。测度水资源使用效率常用的方法有以计量经济学为基础的参数投入法和以线性规划为基础的非参数方法。相比参数投入法,非参数投入方法考察被评估区域与生产前沿面的相对差距,测度结果为某要素的相对效率,该方法不必人为设定指标的权重。本文采用非参数估计方法的数据包络分析方法(DEA)。

1.2.1 DEA 模型

目前学术界效率测度方法主要包括以数据包络分析法(DEA)为主的非参数方法和以随机前沿分析法(SFA)为主的参数方法。与 SFA 等参数法相比,DEA 方法具有自如处理多投入多产出指标的复杂问题,无需对生产函数的形式作出假设,从而避免了由于函数设定误差所带来的问题。因水稻灌溉用水效率受到气候条件、水利设施、个体行为等多方面因素影响,生产函数无法确定,故选择 DEA 分析方法。DEA 方法可分为基于投入或产出两种不同方法,基于投入的 DEA 方法目的是为了测算生产单元相对给定产出水平下最小可能投入的效率,而基于产出的 DEA 方法则是为了度量实际产出与给定投入水平的最大可能产出差距。只有在规模收益不变的情况下,两种方法的效率测算结果才会相等。本文侧重考察作为农业投入要素的灌溉用水效率,故采用规模报酬可假设下基于投入导向的 DEA 模型,具体形式如下:

$$(D)=\text{Min}[\delta-\varepsilon(e^Ts^--e^Ts^+)]$$

$$s.t \begin{cases} \sum_{j=0}^n \lambda_j x_{ij} + s^- = \delta x_{i0} \\ \sum_{j=0}^n \lambda_j y_{ir} + s^+ = \delta y_{i0} \\ \sum_{j=0}^n \lambda_j = 1 \end{cases}$$

$$\lambda \geq 0, s^- \geq 0, s^+ \geq 0$$

$$i=1, \dots, n; j=1, \dots, m; r=1, \dots, s \quad (1)$$

式中: n 为决策单元个数($n=297$); m 为输入变量个数($m=4$), s 为输出变量; x 为投入要素,包括土地、劳动力、技术和资本; y 为产出收益; δ 为决策单元 DMU₀ 的有效值。若 $\delta=1$ 或 $s^+=s^-=0$, 则决策单元 DEA 有效;若 $\delta=1$ 且 $s^+ \neq 0$ 或 $s^- \neq 0$, 则决策单元为弱 DEA 有效; $0 \leq \delta < 1$, 则决策单元非 DEA 有效。即若 DEA 模型测度结

果为 1, 则说明灌溉效率为 DEA 有效, 反之则非有效。

1.2.2 计量回归模型

本文研究水稻灌溉用水效率、农户生产方式和要素禀赋对化肥面源污染的影响, 考虑其他主要控制变量, 基本回归模型设定如下:

$$y_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \sum \text{control}_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: y_i 分别为化肥面源污染总氮排放量(TN)和总磷排放量(TP), x_i 为水稻灌溉用水效率, 通过 DEA 方法测度而得, $\sum \text{control}_i$ 代表所有的控制变量之和。具体的估计策略上, 本文首先采用 OLS 回归方法对(2)式模型进行估计。然而, OLS 回归方法只能得到水稻灌溉效率对化肥面源污染的期望值的影响, 无法分析各个因素对面源污染的分布规律的影响。Koenker 和 Bassett 于 1978 年提出的分位数回归方法(Quantile Regression, QR)可解决这个问题。从理论上讲, OLS 回归是拟合因变量的条件均值与自变量之间的线性关系, 而分位数回归是通过估计因变量在 0~1 之间的不同分位数值, 对特定分布的数据进行估计。该方法能精确解释对于被解释变量的变化范围以及条件分布形状的影响, 能全面描述被解释变量条件分布的所有情形, 还可以分析各分位数条件下解释变量对被解释变量的作用机制。为考察不同分位数上水稻灌溉用水效率对化肥面源污染的影响因素, 本文采用的分位数回归模型形式如下:

$$y_q(x_i) = x_i' \beta_q \quad (3)$$

式中: β_q 为 q 分位数回归系数, 其估计量 β_q 可以由以下最小化问题来定义:

$$\min \beta_q \sum_{i: y_i \geq x_i' \beta_q} q |y_i - x_i' \beta_q| + \sum_{i: y_i < x_i' \beta_q} (1-q) |y_i - x_i' \beta_q| \quad (4)$$

1.2.3 化肥面源污染测度方法

经过文献查阅和借鉴, 化肥面源污染量用总氮(TN)、总磷(TP)排放量来表示, 其测度依据赖斯芸、杜鹏飞、陈吉宁^[21]研究方法, 每个省市的氮、磷利用系数均借鉴其测度系数, 化肥单元产污强度计算公式为:

$$\begin{cases} \text{氮肥产污强度}(t/t) = 1 \times \text{氮流失系数} \\ \text{磷肥产污强度}(t/t) = 1 \times \text{磷流失系数} \times 43.66\% \\ \text{复合肥产氮强度}(t/t) = 1 \times \text{复合肥氮含量} \times \text{氮流失系数} \\ \text{复合肥产磷强度}(t/t) = 1 \times \text{复合肥磷含量} \times \text{磷流失系数} \times 43.66\% \end{cases} \quad (5)$$

其中四川、重庆氮流失系数为 0.10, 云南、贵州氮流失系数为 0.20, 4 省(市)磷流失系数均为 0.04, 复合肥氮含量 65%, 磷含量 26%。产污总量即为产污强度与化肥使用量的乘积, 表示在降水或灌溉过程中,

未被利用并通过地表径流和农田渗漏形成地表和地下水环境污染的面源污染量。

2 结果与分析

2.1 水稻灌溉用水效率测度与分析

水稻灌溉用水效率受到气候、地形、水利条件及灌溉行为等因素影响,其中土地是农业生产的基础和载体,水、劳动力、资本等投入要素需要依附在土地上才能实现农业生产。土地可被看作是农业生产投入的固定投入要素,水等被农作物直接消耗的经济资源则是农业生产的可变投入要素,两者作用密不可分。基于数据可获得性和相关文献,选择产出和投入变量。参考许朗等对农业用水灌溉效率的研究^[2],为研究水稻生长季的灌溉用水效率,故选择产出变量为水稻产量。投入指标包括:①家庭水稻耕种面积。水稻种植面积为样本户家庭经营水稻耕地面积,单位为 m²,反映了潜在产出量和需水量。②水稻种植总投工。水稻种植总投工包括水稻生长过程中整地、育秧、移栽、施肥等环节总投工时,单位为日,大部分调研点水稻生产仍属于劳动密集型作业,单位投工会影响产出。③水稻种植化肥施用量。化肥施用量为水稻生长环节所施用的化学肥料总用量,单位为 kg,水稻高产需借助化肥等生物技术,某些生物技术甚至可减弱水稻需水程度。④灌溉用水费用。灌溉用水费用为水稻生长环节灌溉用水总花费,补贴部分不计入,单位为元,农户会参考灌溉成本而调整灌溉行为和投入。

运用 DEAP2.0 软件得到水稻种植户灌溉总效率、纯技术效率和规模效率,效率值分布情况见表 2。种植户水稻灌溉总效率平均值为 0.14,纯技术效率平均值为 0.27,规模效率平均值为 0.55。总效率水平主要集中在 0.2 以下,说明整体上水稻灌溉用水效率较低。仅有 13 户(总效率值为 1)水稻种植处于农业生

产可能集的前沿包络面上,说明在水稻灌溉方面实现了水资源的最有效利用,相对有效生产点,其他 98.37%的农户均处于生产的相对无效状态,水资源利用改进空间潜力很大。以总效率平均值 0.137 8 为例,意味着农户在资源禀赋不变情况下,若生产技术和经营水平充分发挥平均 667 m²可节省 86.22%的灌溉费用。而技术效率略高于总效率,规模效率明显高于前两者,是总效率的 4 倍左右。水稻灌溉用水纯技术效率中有 28 户处于有效生产点上,无效点主要集中在 0.4 以下,说明不同地区、农户拥有的水资源、土地、劳动力等资源禀赋存在差异,但灌溉技术普遍较落后、粗放,水资源浪费严重。以平均值 0.27 为例,表示农户水稻灌溉若技术完全运用,将不会造成用水浪费 72.55%,最大值与最小值技术效率差值接近于 1,存在较大的差异化和两级化,灌溉设施和技术发挥效应弱化。规模效率相对较高,效率值主要集中在 0.50 上下,由于平原地区因土地流转政策推动形成了规模种植,特别是平原地区和水资源丰富地区,这些地区灌溉设施和机械化水平更高,进一步提升了农业生产的规模效应,这一良性循环积极促使农户为提高收益而改善农田灌溉条件,进一步提升水稻灌溉用水规模效率。

基于不同灌溉方式的灌溉用水效率分布结果见表 3。灌溉方式基于灌溉工程进行分类,分为引水灌溉、提水灌溉、井水灌溉和蓄水灌溉。可知,从灌溉方式选择来看,目前水稻水旱轮作种植户主要采用引水灌溉(占比 64.62%),其次是提水灌溉(占比 32.25%),而井水灌溉和蓄水灌溉用户最少。从灌溉效率平均值来看,四种灌溉方式效率值均较低,且差异不大。其中蓄水灌溉效率最高,平均效率值 0.195 7,其后依次是引水灌溉(0.194 3)、提水灌溉(0.193 2)、井水灌溉(0.180 8)。以引水灌溉为例,其平均效率值为 0.194 3,

表 2 样本农户灌溉效率值分布
Table 2 Sample farmers' irrigation efficiency value

效率值 Efficiency value	总效率 Overall efficiency			纯技术效率 Pure technical efficiency			规模效率 Scale efficiency		
	样本数 Number of samples	比例 Proportion	累计 Cumulative	样本数 Number of samples	比例 Proportion	累计 Cumulative	样本数 Number of samples	比例 Proportion	累计 Cumulative
0~0.2	718	90.09	90.09	370	46.42	46.42	51	6.40	6.40
0.2~0.4	49	6.15	96.24	304	38.14	84.56	208	26.10	32.50
0.4~0.6	8	1.00	97.24	46	5.77	90.33	259	32.50	65.00
0.6~0.8	5	0.63	97.87	35	4.39	94.72	130	16.31	81.31
0.8~0.9	4	0.50	98.37	14	1.76	96.48	110	13.80	95.11
1.0	13	1.63	100.00	28	3.51	100.00	39	4.89	100.00
Mean		0.137 8			0.274 5			0.549 8	

表3 基于灌溉方式的效率值分布

Table 3 Irrigation efficiency value based on irrigation methods

效率值 Efficiency value	引水灌溉 Water diversion irrigation	提水灌溉 Carry water for irrigation	井水灌溉 Well water irrigation	蓄水灌溉 Water storage irrigation
0~0.2	366	178	8	9
0.2~0.4	97	48	1	5
0.4~0.6	37	16	0	1
0.6~0.8	6	7	1	0
0.8~0.9	5	2	0	0
1.0	4	6	0	0
Total	515	257	10	15
Mean	0.194 3	0.193 2	0.180 8	0.195 7

则当农户在资源禀赋不变的情况下,若生产技术和经营水平充分发挥则平均每 667 m² 可节约 80.57% 的灌溉费用,同样提水灌溉、井水灌溉和蓄水灌溉在相同条件下平均每 667 m² 用水费用可分别减少 80.68%、81.92% 和 80.43%。从效率值分布结构看,四种方式各自效率值分布主要集中在 0.2 以下。引水、提水、井水和蓄水灌溉效率值位于 0.2 以下的比例分别为 71.07%、69.26%、80.00% 和 60.00%,可见效率值普遍偏低,存在较大的改进空间。从水资源最有效利用情况看,只有引水灌溉和提水灌溉存在效率值在农业生产可能集的前沿包络面上,且占比分别仅为 0.78%、2.33%。

2.2 影响因素的指标选择与描述性统计

根据公式(5)测度化肥面源污染量,结果见表4所示。化肥面源污染总氮量(TN)平均为 7.90 kg,总磷量(TP)平均为 0.52 kg,水稻种植施肥主要以氮肥和复合肥为主,样本结果显示两者占比 93.22%,由化肥产污强度系数可知,主要以氮排放为主,因篇幅限制,故本文化肥面源污染以总氮量为主,即为被解释变量。

本文主要解释变量为水稻灌溉用水效率、生产方式和农户要素禀赋。生产方式具体指标包括灌溉方式、水旱轮作模式、耕作方式和秸秆还田方式。农户要素禀赋包括土地禀赋、劳动力禀赋、资本禀赋、社会资本禀赋和技术禀赋。其中土地禀赋包括水田面积、水田块数、地形特征,劳动力禀赋用家庭劳动力数量表示,资本禀赋具体指标包括农业收入占比、农业补贴额、商品化率,社会资本禀赋具体指标包括户主年龄、受教育程度、是否是党员,技术禀赋用“是否接受过农业技术培训”表示。各指标描述性统计见表4。灌溉方式和水旱轮作模式序号根据求得的平均效率值进行

排列,两者均值分别为 2.67、2.61。不同灌溉技术措施反映出田间不同的水分管理,尤其是在水稻分蘖后期至成熟期,对田间土壤水分控制上的差异,条件和控制包括土壤中水、肥、气、热状况的改变,从而影响到需水量大小。依据工程对灌溉方式划分,不同灌溉技术条件下的变化趋势:深水灌溉大于浅水灌溉,浅水灌溉大于湿润或浅湿灌溉,控制灌溉的需水量最小。不同灌溉方式在储水、输水过程中存在水流失情况,浇灌过程会发生田间渗漏,进而造成水资源灌溉效率存在差异。水旱轮作模式反映了水稻与其他作物品种轮作选择,而不同轮作作物对土壤的改善效果、轮作作物对水分需求量、种植经验、市场等因素共同决定了轮作模式的选择,对于提升灌溉效率、改善灌溉条件、促进农业生产结构转型具有重要参考价值。

2.3 实证结果分析

运用 Stata14.0 软件对 797 个样本户使用自助法(自助法重复 400 次)进行分位数回归(见表5)。受篇幅所限,表5只列出了化肥面源污染的第 25、50、75、90 个分位点回归结果。同时为进一步解释自变量对化肥面源污染影响的完整情况,图1列出了化肥面源污染分位数回归的系数变化情况。从回归结果可以看出,灌溉用水效率、农户生产方式和要素禀赋在不同分位数的影响系数有明显变化,具体体现在以下几个方面:

(1) 灌溉用水效率与化肥施用量存在替代效应,两者呈振幅增强的波动式发展。灌溉用水总效率对化肥面源污染在不同分位点上呈 10% 显著性负相关。因 TN 是化肥施用量的正向线性函数,故灌溉用水效率与化肥施用量存在替代效应,或互补效应,即随着灌溉用水效率的提升,化肥施用量减少。也验证了余金凤的研究,指出节水灌溉可以提高氮肥利用率 3%~5%^[11]。由于淹水灌溉和干湿交替灌溉均较早作有效地协调各时期水稻地上部、地下部生长,促进各时期氮素吸收利用,提高稻谷产量^[23]。节水灌溉具有保肥作用,因土壤水分减少,抑制了根系水分吸收,降低腾发量,减少无效叶面腾发;节水灌溉因大部分时间田面无水层,蓄雨能力较强,肥力流失则会减少。总效率对灌溉用水效率的影响系数即为弹性系数,弹性系数呈增大-减小-增大趋势,且极大值点逐步扩大,形成替代效应正累积。

(2) 节水灌溉方式能够减少化肥面源污染。灌溉方式在 0.25 和 0.50 分位点呈显著负相关,在 0.75 和 0.90 分位点上未通过显著性检验,相关关系呈“倒 U

表 4 变量指标的统计描述
Table 4 Variable indicators statistical description

总指标 Total index	二级指标 Second index	定义/单位 Define/Unit	均值 Mean	标准差 Standard deviation	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value
化肥面源污染 Fertilizer non-point source pollution	总氮量	kg	7.90	3.40	0	97.20
	总磷量	kg	0.52	1.57	0	8.73
灌溉用水效率 Irrigation water efficiency	总效率	1	0.14	0.14	0.01	1
生产方式 Production mode	灌溉方式	1=井水灌溉;2=提水灌溉;3=引水灌溉; 4=蓄水灌溉	2.67	0.53	1	4
	水旱轮作方式	1=水稻-小麦;2=水稻-蔬菜;3=水稻-油 菜;4=水稻-药材	2.61	0.93	1	4
	耕地方式	1=旋耕;2=翻耕;3=少免耕	1.49	0.66	1	3
	秸秆还田方式	1=焚烧还田;2=直接还田;3=堆沤还田	1.94	0.84	1	3
土地要素禀赋 Land factor endowment	水田面积	m ²	1813	1740	0	40 002
	水田块数	块	4.25	2.73	0	17
	地形特征	1=平原区;2=丘陵山地区	1.38	0.49	1	2
劳动力要素禀赋 Labor factor endowment	家庭劳动力数	人	3.27	1.33	0	9
资本要素禀赋 Capital factor endowment	农业收入占比	农业收入/总收入(%)	0.32	0.61	0	0.90
	农业补贴额	元/年	204.06	190.39	0	2800
	商品化率	稻谷销售量/收获量(%)	0.27	0.53	0	1.00
社会资本要素禀赋 Social capital factor endowment	年龄	年	56.01	10.30	18	83
	受教育程度	1=小学以下;2=小学;3=初中;4=高中/ 中专;5=大学/大专;6=大学以上	2.22	0.80	1	5
	政治参与程度	1=是村干部;2=非村干部	1.93	0.24	1	2
技术要素禀赋 Technique factor endowment	技术培训	1=有;2=无	1.62	2.38	1	2

型”。由井水灌溉转为蓄水灌溉,灌溉效率增加了 3.10%,实现了一定程度的节水效果。由于蓄水灌溉减少储水和输水过程的流失,尤其是在水资源短缺地区,采取井水灌溉和蓄水灌溉农户可根据作物生长情况及时安排灌溉,灌溉管理实行非充分灌溉,有利于养分吸收和作物生长。由于水分状况的改变和土壤通气条件的改善,促进了还原物质的氧化,加速了有机质的分解和迟效养分的活化,使非充分灌溉稻田土壤的肥力得到充分发挥,加上渗漏大幅度减少,又相应地减少了养分流失。实验发现与淹水灌溉相比,控制灌溉水稻节水 45.9%,水分利用效率提高 6.3%~79.8%,氮肥利用率增加 5.2%~38.4%^[24],因节水灌溉能够明显抑制农田排水径流量和渗漏量^[25]。节水灌溉能显著降低稻田渗漏量,同时改善土壤的通气状况,水稻在一定时期内处于水分胁迫状态,限制了土壤中有害物质的产生,高效控制了氮、磷和 COD 流失关键时期的排水,减轻了农业面源污染程度。

(3)水旱轮作模式、耕作方式、秸秆还田方式对化肥面源污染存在影响,但未全部通过显著性检验。水

旱轮作模式对化肥面源污染的影响系数为负,说明轮作结构不同导致面源污染效应差异。薛利红等基于对太湖流域连续 3 年田间数据比较,发现稻-紫云英能减少径流总氮损失 35%~40%,稻-蚕豆轮作能减少径流氮排放 25%~30%^[26];洱海流域田间试验发现水稻-蚕豆比水稻大蒜轮作模式减少氮素流失风险 38%^[27]。秸秆还田形成绿肥,可提高土壤肥力,降低稻季施肥量,减少稻季氮肥流失引起的环境风险^[28]。目前堆沤还田对减少化肥面源污染效果最大,其次是直接还田,最小是焚烧还田。肖新成等^[14]和吴义根等^[29]也指出种植结构直接影响农业面源污染排放效率和总量。耕作方式对化肥面源污染的弹性系数为负,秸秆还田方式在 0.75 分位点以下为正,且在 0.25 分位点上 5%显著,0.90 分位点上为负。实际实验中发现在翻耕 20 cm 的基础上进行秸秆还田或增施绿肥、畜禽粪肥则可以大幅提高水稻产量和氮、磷、钾养分吸收量^[30]。

(4)耕地细碎化会增加化肥面源污染,一定规模下随面积增加化肥面源污染相应增加。水田面积在各分位点上与化肥面源污染呈 1%显著性正相关,水田

表5 实证回归结果
Table 5 The empirical regression results

指标 Index	OLS	分位点 Quantile 0.25	分位点 Quantile 0.50	分位点 Quantile 0.75	分位点 Quantile 0.90
总效率 CRS	-5.59**(-2.14)	-2.38*(-0.82)	-3.63*(-1.92)	-2.23*(-0.82)	-5.87*(-1.55)
灌溉方式 Irrigation model	-2.38***(-3.14)	-1.47**(-2.39)	-2.37***(-2.96)	-1.12(-1.10)	-1.29(-0.90)
水旱轮作方式 FDD rotation	-0.27(-0.61)	-0.32(-1.01)	0.02(0.07)	-0.40(-0.75)	-0.77(-0.78)
耕地方式 Cultivated way	-0.34(-0.54)	-0.07(-0.17)	-0.05(-0.12)	-1.07(-1.55)	-1.98(-1.74)
秸秆还田方式 Straw returned	0.21(0.44)	0.59** (2.05)	0.51(1.40)	0.35(0.81)	-0.07(-0.10)
水田面积 Field area	3.76*** (23.77)	3.26*** (14.66)	4.71*** (6.02)	7.23*** (8.97)	9.34*** (8.16)
水田块数 Field blocks	0.58*** (3.78)	0.16*(1.47)	0.14(0.57)	0.02(0.06)	0.32(0.70)
地形特征 Regional feature	-0.66(-0.80)	0.86(1.50)	-0.86(-1.31)	-2.01**(-1.97)	-1.24(-0.74)
家庭劳动力数 Labors	-0.17(-0.57)	-0.32*(-1.65)	-0.14(-0.59)	0.10(0.27)	0.10(0.17)
农业收入占比 Ratio of agricultural income	-0.46(-0.72)	-2.19**(-2.02)	-0.15(-0.13)	-0.30(-0.35)	-0.45(0.38)
农业补贴额 Agricultural subsidy	0.004** (1.97)	0.005*** (3.72)	0.002(1.25)	-0.001(-0.26)	-0.002(-0.32)
商品化率 Commercialization rate	2.07*** (2.78)	0.19(0.23)	0.34(0.20)	2.18(0.91)	2.96(0.96)
年龄 Age	-0.01(-0.13)	-0.003(-0.11)	0.004(0.13)	0.01(0.15)	-0.02(-0.26)
受教育年限 Education	-0.06(-0.11)	-0.12(-0.40)	0.12(0.32)	0.22(0.40)	-0.07(-0.08)
政治参与程度 Political participation	-1.03(-0.64)	-0.49(-0.51)	-0.16(-0.12)	-0.48(-0.22)	-1.09(-0.36)
技术培训 Technical training	2.70*** (2.62)	2.25*** (3.00)	2.09** (2.35)	2.33(1.47)	1.73(0.64)
常数项 Constant	13.12** (2.26)	4.35 (1.15)	7.15 (1.39)	6.21(0.97)	17.35* (1.66)

注:*, **, *** 分别表示 10%、5%和 1%的显著性水平下显著,括号内为稳健性标准误差。

Note:*, **, *** indicate significance level at 10%, 5% and 1%, robust standard error in brackets.

块数在 0.25 分位点上通过显著性检验。在经营面积较大时,农户会因劳动力不足而选择通过增施化肥、农药等物质生产资料来提升农业生产效益。细碎化程度越高,单位化肥投入强度越大。有研究指出适度规模能够降低化肥投入强度,进而控制因化肥过量投入所带来的面源污染压力^[31]。还应充分考虑地权稳定性,若通过土地流转扩大规模,则不一定能够有效减少面源污染问题。龙云指出农地流转的地权稳定性效应、地权流动性效应和农地利用政策效应会导致转入地农户的农地利用方式和短期投资发生改变,会使转入地总体面源污染水平更高^[32]。结果还发现丘陵山区相对平原地区化肥面源污染更大,平原地区地下水充沛,田间渗漏相对更少,而丘陵山区因坡度造成水分渗漏严重,保肥能力较弱,农户选择通过增施化肥来保证产量。

(5)农业补贴和商品化率会增加化肥面源污染。农业补贴在 0.50 分位点以下与面源污染呈正相关,0.75 以上呈负相关,说明农业补贴与化肥面源污染存在“倒 U 型”关系。已有研究表明农资补贴对农业化肥面源污染存在正向激发效应^[33],葛继红的研究也证实了国家财政支农政策导致了化肥要素市场扭曲的存在^[34]。化肥要素市场扭曲导致化肥边际产出与实际价格的偏离,同时相对低廉的化肥要素价格形成了对

劳动力的替代,便助涨了农户对化肥的过量施用。商品化率越高,农户为提高单位产出和收益,增加化肥投入强度,进而导致化肥面源污染增加。

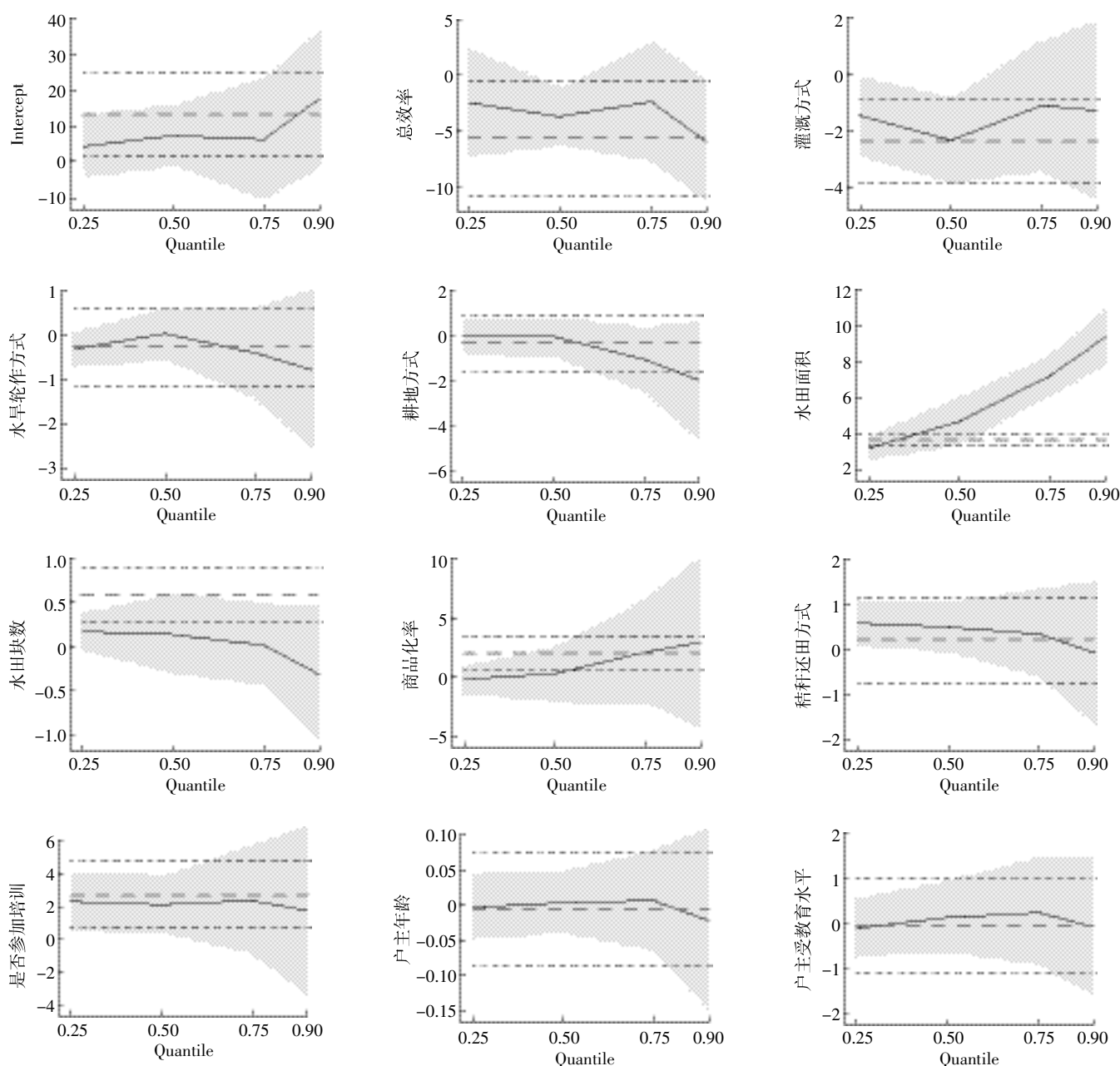
(6)年龄和受教育程度减弱化肥面源污染的临界点较高,政治参与程度对化肥面源污染影响不显著。年龄和受教育程度都在 0.25 和 0.90 分位点上与化肥面源污染负相关,在 0.50 和 0.75 分位点上正相关,但都未通过一致性检验。图 1 可知,化肥面源污染随年龄和受教育程度增加初期长时间呈缓慢提高趋势,当达到一定程度后,出现明显下降,且临界点位置较高。政治参与程度对化肥面源污染影响系数为负,在各分位点上都不显著,说明政治参与程度越高,获得生产技术和产品市场信息越多,科学种植理念和环保意识越高,偏向于减少化肥投入。这是由于农业面源污染具有负外部性,大多数农户不会关心生产中的环境污染问题^[35],反而还会通过增施化肥来提高产量和节约劳动力。该结论也得到了付静尘等的验证^[36]。

(7)技术培训能够有效降低化肥面源污染。技术培训在 0.50 分位点以下通过显著性检验,与面源污染呈正相关关系,说明技术培训可有效降低农户化肥施用量。华春林等也验证了农业教育培训可以减少农业面源污染^[37]。但应瑞瑶等指出在考虑了样本的选择性偏误问题之后,农业技术培训对农业生产中面源污

染的减少效果并不明显,这与中国农业技术培训体系注重产品数量安全而忽视农产品生态环境安全以及“从上到下”的行政命令式培训方式有关^[38]。

3 结论

(1)总体上灌溉总效率均值为 0.14,纯技术效率



图中较粗虚线表示解释变量 OLS 回归估计值,两条较细虚线之间的区域表示 OLS 回归估计值的置信区间(置信度为 95%)。

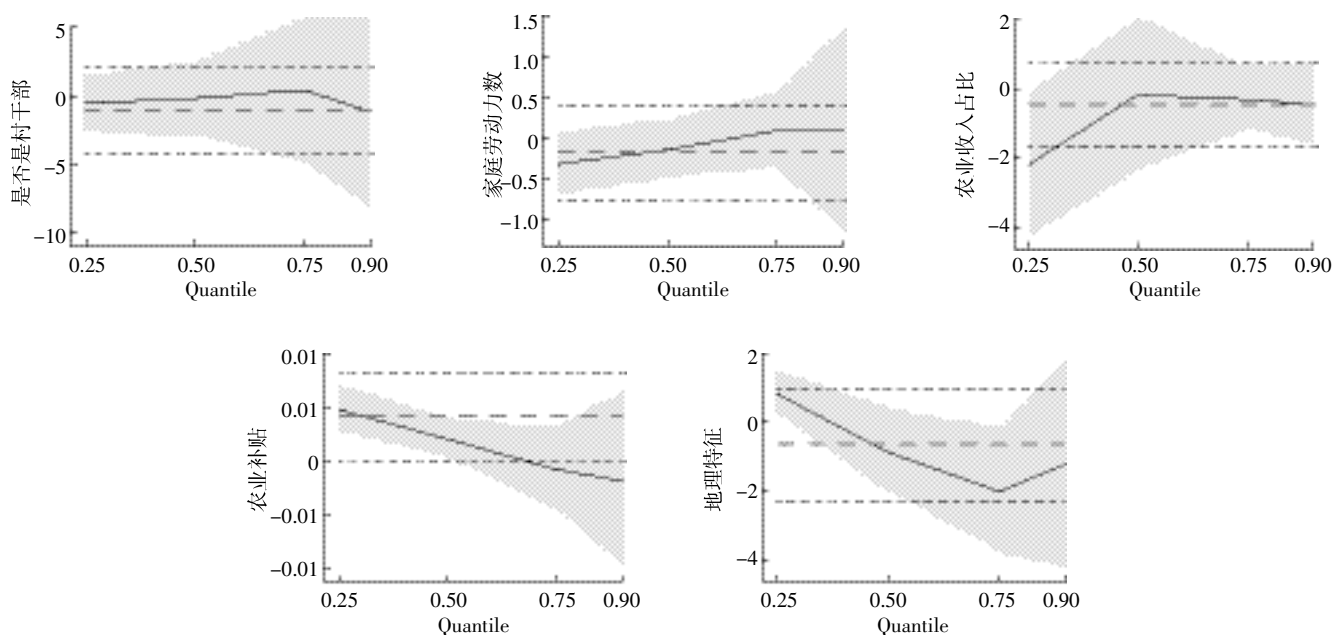
实线为各个解释变量的分位数回归估计值,阴影部分是分位数回归估计值的置信区间(置信度为 95%)。

图中横轴表示化肥面源污染的不同分位点,纵轴表示各变量的回归系数

The coarser dotted line indicates the interpretation variable OLS regression estimates, the area between the two smaller dashed lines indicates the confidence interval for OLS regression estimates (The confidence level is 95%). The solid line indicates the regression estimate for each interpretation variable, the shaded region is the confidence interval for the regression estimate (The confidence level is 95%). The horizontal axis indicates different points of contamination of the fertilizer non-point source, the vertical axis indicates the regression coefficient of each variable.

图 1 化肥面源污染分位数回归的系数变化情况

Figure 1 The changes of fertilizer non-point source pollution of quantile regression coefficient



图中较粗虚线表示解释变量 OLS 回归估计值,两条较细虚线之间的区域表示 OLS 回归估计值的置信区间(置信度为 95%)。

实线为各个解释变量的分位数回归估计值,阴影部分是分位数回归估计值的置信区间(置信度为 95%)。

图中横轴表示化肥面源污染的不同分位点,纵轴表示各变量的回归系数

The coarser dotted line indicates the interpretation variable OLS regression estimates, the area between the two smaller dashed lines indicates the confidence interval for OLS regression estimates (The confidence level is 95%). The solid line indicates the regression estimate for each interpretation variable, the shaded region is the confidence interval for the regression estimate (The confidence level is 95%). The horizontal axis indicates different points of contamination of the fertilizer non-point source, the vertical axis indicates the regression coefficient of each variable.

续图 1 化肥面源污染分位数回归的系数变化情况

Continuous figure 1 The changes of fertilizer non-point source pollution of quantile regression coefficient

均值为 0.27, 规模效率均值为 0.55, 水资源利用改进空间较大, 规模化程度高的平原地区用水效率更高。

(2) 灌溉用水效率与化肥施用量间存在显著替代效应, 两者呈振幅增强的波动式发展。灌溉用水效率对化肥面源污染的弹性系数在不同分位点上依次为 -2.38、-3.63、-2.23、-5.87, 呈增大-减小-增大趋势, 且极大值逐步扩大, 形成替代效应正累积。

(3) 节水灌溉能够降低化肥面源污染, 同时具有保肥效果。灌溉方式与化肥面源污染呈负相关, 且在 0.25 和 0.50 分位点上通过显著性检验。节水灌溉既可以提高水资源利用效率, 降低稻田渗漏量, 还具有控制氮、磷和 COD 流失, 减轻面源污染的效果。

(4) 水旱轮作模式、耕作方式、秸秆还田方式对化肥面源污染存在影响, 但未全部通过显著性检验。水旱轮作对化肥面源污染的影响系数为负, 轮作作物根系固氮能力影响了化肥氮素利用率; 耕作方式的影响系数为负, 但不显著, 深耕能够提高土壤肥力、减少化肥施用; 秸秆还田方式在 0.25 分位点上显著正相关, 对减轻化肥面源污染效果大小依次是堆沤还田、直接还田、焚烧还田。

(5) 耕地细碎化、农业补贴和商品化率会增加化肥面源污染。耕地面积在各分位点上都与化肥面源污染呈 1% 显著性正相关, 耕地细碎化的系数为正, 在 0.25 分位点上 1% 显著。一定规模下随面积增加化肥面源污染会相应增加, 而细碎化程度越高, 单位化肥投入强度越大。

参考文献:

- [1] Baumgärtner S, Dyckhoff H, Faber M. The concept of joint production and ecological economics[J]. *Ecological Economics*, 2001, 36(3):365-372.
- [2] 李秀芬, 朱金兆, 顾晓君, 等. 农业面源污染现状与防治进展[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(4):81-84.
LI Xiu-fen, ZHU Jin-zhao, GU Xiao-jun, et al. Current situation and control of agricultural non-point source pollution[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(4):81-84.
- [3] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.
- [4] 于海蛟, 赵树君, 崔远来, 等. 南方典型水稻灌区肥药及废弃物空间

- 变异规律[J]. 中国农村水利水电, 2016(8):190-195.
- YU Hai-jiao, ZHAO Shu-jun, CUI Yuan-lai, et al. Spatial distribution of rice fertilizer, pesticide and waste disposal in south China's irrigation district[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(8):190-195.
- [5] 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.
- [6] 张锋. 中国化肥投入的面源污染问题研究[D]. 南京:南京农业大学, 2011:47-49.
- ZHANG Feng. Study on the non-point pollution of the agricultural fertilizer input in China-based on the aspect of farmers' fertilizer input[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011:47-49.
- [7] 唐学玉, 张海鹏, 李世平. 农业面源污染防治的经济价值:基于安全农产品生产户视角的支付意愿分析[J]. 中国农村经济, 2012(3):53-67.
- TANG Xue-yu, ZHANG Hai-peng, LI Shi-ping. The economic value of the prevention and control of agricultural surface pollution: Based on the willingness to pay for the production of safety agricultural products[J]. *Chinese Rural Economy*, 2012(3):53-67.
- [8] 马云泽. 当前中国农村环境污染问题的根源及对策:基于规制经济学的研究视角[J]. 广西民族大学学报(哲学社会科学版), 2010, 32(1):18-21.
- MA Yun-ze. On the causes of and countermeasures against environmental pollution in China's rural areas: From the research perspective of regulation economics[J]. *Journal of Guangxi University for Nationalities (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2010, 32(1):18-21.
- [9] 金书秦, 沈贵银, 魏珣, 等. 论农业面源污染的产生和应对[J]. 农业经济问题, 2013(11):97-102.
- JIN Shu-qin, SHEN Gui-yin, WEI Xun, et al. The production and response of the contamination of agricultural surface sources[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2013(11):97-102.
- [10] 饶静, 许翔宇, 纪晓婷. 我国农业面源污染现状、发生机制和对策研究[J]. 农业经济问题, 2011(8):81-87.
- RAO Jing, XU Xiang-yu, JI Xiao-ting. Study on the present situation, mechanism and countermeasures of the contamination of agricultural surface source in China[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2011(8):81-87.
- [11] 余金凤, 洪林, 江洪珊. 南方典型灌区节水灌溉的减污效应[J]. 节水灌溉, 2011(8):1-4.
- YU Jin-feng, HONG Lin, JIANG Hong-shan. Effects of water-saving irrigation on pollution control in typical irrigation district in southern China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2011(8):1-4.
- [12] 汪厚安, 叶慧, 王雅鹏. 农业面源污染与农户经营行为研究:对湖北农户的实证调查与分析[J]. 生态经济, 2009(9):87-91.
- WANG Hou-an, YE Hui, WANG Ya-peng. Study on the agricultural non-point source pollution and farm household's management behavior: An empirical study and analysis of farmer households in Hubei Province[J]. *Ecological Economy*, 2009(9):87-91.
- [13] 李传桐, 张广现. 农业面源污染背后的农户行为:基于山东省昌乐县调查数据的面板分析[J]. 地域研究与开发, 2013, 32(1):143-146, 164.
- LI Chuan-tong, ZHANG Guang-xian. The farm household's behavior behind agricultural non-point source pollution: A panel analysis on change county in Shandong Province[J]. *Areal Research and Development*, 2013, 32(1):143-146, 164.
- [14] 肖新成, 何丙辉, 倪九派, 等. 三峡生态屏障区农业面源污染的排放效率及其影响因素[J]. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11):60-68.
- XIAO Xin-cheng, HE Bing-hui, NI Jiu-pai, et al. Study on emission efficiency, shadow price and motivation factors of agricultural non-point source pollution in ecological barrier zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(11):60-68.
- [15] 向涛, 綦勇. 粮食安全与农业面源污染:以农地禀赋对化肥投入强度的影响研究[J]. 财经研究, 2015, 41(7):132-144.
- XIANG Tao, QI Yong. Food security and agricultural non-point source pollution: Taking the impact of agricultural land endowments on fertilizer use intensity as an example[J]. *Journal of Finance and Economics*, 2015, 41(7):132-144.
- [16] Repetto R. Economic incentives for sustainable production[J]. *The Annals of Regional Science*, 1987(21):44-59.
- [17] 杜江, 罗珺. 我国农业面源污染的经济成因透析[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(4):22-27.
- DU Jiang, LUO Jun. Insight to the economic reasons of agricultural non-point source pollution in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(4):22-27.
- [18] 梁流涛, 曲福田, 冯淑怡. 经济发展与农业面源污染:分解模型与实证研究[J]. 长江流域资源与环境, 2013(10):1369-1374.
- LIANG Liu-tao, QU Fu-tian, FENG Shu-yi. Economic development and agricultural non-point source pollution: decomposition model and empirical analysis[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2013(10):1369-1374.
- [19] Dowda B M, Press D, Huertos M L. Agricultural Nonpoint Source Water Pollution Policy: the Case of California's Central Coast[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2008, 128(11):151-161.
- [20] 王学渊, 赵连阁. 中国农业用水效率及影响因素:基于1997—2006年省区面板数据的SFA分析[J]. 农业经济问题, 2008(3):10-20.
- WANG Xue-yuan, ZHAO Lian-ge. Agricultural water efficiency and the causal factors: A stochastic frontier analysis is based on Chinese provincial panel data 1997—2006[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2008(3):10-20.
- [21] 赖斯芸, 杜鹏飞, 陈吉宁. 基于单元分析的非点源污染调查评估方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(9):1184-1187.
- LAI Si-yun, DU Peng-fei, CHEN Ji-ning. Evaluation of non-point source pollution based on unit analysis[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(9):1184-1187.
- [22] 许朗, 黄莺. 农业灌溉用水效率及其影响因素分析:基于安徽省蒙城县的实地调查[J]. 资源科学, 2012, 34(1):105-113.
- XU Lang, HUANG Ying. Measurement of irrigation water efficiency

- and analysis of influential factors; An empirical study of Mengcheng county in Anhui Province[J]. *Resources Science*, 2012, 34(1): 105–113.
- [23] 严奉君, 孙永健, 马 均, 等. 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟特征及水稻氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(11): 1435–1444.
- YAN Feng-jun, SUN Yong-jian, MA Jun, et al. Effects of irrigation method and straw mulch–nitrogen management pattern on straw decomposition characteristics and nitrogen utilization of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(11): 1435–1444.
- [24] 庞桂斌, 杨士红, 徐俊增. 节水灌溉稻田水肥调控技术试验研究[J]. 节水灌溉, 2015(9): 44–47, 51.
- PANG Gui-bin, YANG Shi-hong, XU Jun-zeng. Field experimental study on water and fertilizer managements of rice paddy under water saving irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2015(9): 44–47, 51.
- [25] 洪 林, 袁自瑛, 江海涛. 漳河灌区农田排水氮素流失规律研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(6): 681–684, 690.
- HONG Lin, YUAN Zi-ying, JIANG Hai-tao. Study of laws of nitrogen losses from farmland drainage in Zhanghe irrigation district[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(6): 681–684, 690.
- [26] 薛利红, 杨林章, 施卫明, 等. 农村面源污染治理的“4R”理论与工程实践: 源头减量技术[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 881–888.
- XUE Li-hong, YANG Lin-zhang, SHI Wei-ming, et al. Reduce–Retain–Reuse–Restore technology for controlling the agricultural non-point pollution in countryside in China: Source reduction technology[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 881–888.
- [27] 汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 608–615.
- TANG Qiu-xiang, REN Tian-zhi, LEI Bao-kun, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss in various crop rotation systems in northern watershed of Erhai Lake[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 608–615.
- [28] 卢 萍, 单玉华, 杨林章, 等. 绿肥轮作还田堆稻田土壤溶液氮素变化及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 270–275.
- LU Ping, SHAN Yu-hua, YANG Lin-zhang, et al. Influence of green manure crop on nitrogen concentration in soil solution of paddy field and rice yield[J]. *Soils*, 2006, 38(3): 270–275.
- [29] 吴义根, 冯开文, 李谷成. 人口增长、结构调整与农业面源污染: 基于空间面板 STIRPAT 模型的实证研究[J]. 农业技术经济, 2017(3): 75–87.
- WU Yi-gen, FENG Kai-wen, LI Gu-cheng. Population growth, structural adjustment and agricultural non-point source pollution: Based on the space panel STIRPAT model[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2017(3): 75–87.
- [30] 吴萍萍, 王家嘉, 李录久. 不同耕作与施肥方式下白土的水稻产量及养分吸收量[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 754–760.
- WU Ping-ping, WANG Jia-jia, LI Lu-jiu. Rice yields and nutrient uptake under different ploughing depths and fertilizations in white soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(3): 754–760.
- [31] 张 锋, 胡 浩. 农户化肥投入行为与面源污染问题研究[J]. 江西农业学报, 2012, 24(1): 183–186.
- ZHANG Feng, HU Hao. Study on farmer's chemical fertilizer input behavior and non-point source pollution[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(1): 183–186.
- [32] 龙 云, 任 力. 农地流转对农业面源污染的影响: 基于农户行为视角[J]. 经济学家, 2016(8): 81–87.
- LONG Yun, REN Li. The effect of agricultural land circulation on the agricultural non-point source pollution: Based on the view of farmer's behavior[J]. *Economist*, 2016(8): 81–87.
- [33] 于伟咏, 漆雁斌, 余 华. 农资补贴对化肥面源污染效应的实证研究: 基于省级面板数据[J]. 农村经济, 2017(2): 89–94.
- YU Wei-yong, QI Yan-bin, YU Hua. An empirical study of agricultural subsidies for fertilizer–point source pollution effects: Based on provincial panel data[J]. *Rural Economy*, 2017(2): 89–94.
- [34] 葛继红, 周曙东. 要素市场扭曲是否激发了农业面源污染: 以化肥为例[J]. 农业经济问题, 2012(3): 92–98.
- GE Ji-hong, ZHOU Shu-dong. Does factor market distortions stimulate the agricultural non-point source pollution? A case study of fertilizer[J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2012(3): 92–98.
- [35] Griffin R C, Bromley D W. Agricultural Runoff as a Nonpoint Externality: A Theoretical Development[J]. *American Journal of Agricultural Economics*, 1983(70): 37–49.
- [36] 付静尘, 韩烈保. 丹江口库区农户对面源污染的认知度及生产行为分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(5): 70–74.
- FU Jing-chen, HAN Lie-bao. Analysis on farmers cognition degree and production behavior with non-point pollution in Danjiangkou Reservoir area[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5): 70–74.
- [37] 华春林, 陆 迁, 姜雅莉, 等. 农业教育培训项目对减少农业面源污染的影响效果研究[J]. 农业技术经济, 2013(4): 83–92.
- HUA Chun-lin, LU Qian, JIANG Ya-li, et al. Study on the agricultural education training program studies the effects of reducing agricultural contamination[J]. *Journal of Agrotechnical Economics*, 2013(4): 83–92.
- [38] 应瑞瑶, 朱 勇. 农业技术培训对农业面源污染的效果评估[J]. 统计与信息论坛, 2016, 31(1): 100–105.
- YING Rui-yao, ZHU Yong. Impact of agricultural training on reducing agricultural non-point source pollution[J]. *Statistics & Information Forum*, 2016, 31(1): 100–105.