



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘晴, 邵云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

引用本文:

李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 527-536.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0150>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稳定氮肥用量和施用方式对水稻产量和氮肥效率的影响

李敏, 叶舒娅, 刘枫, 郭熙盛, 武际, 黄义德, 郭肖颖

农业资源与环境学报. 2015(6): 559-564 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0157>

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 327-333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>

不同蔬菜品种生产效益和碳效益评价

胡亮, 文礼章, 彭云鹏, 易倩, 徐练

农业资源与环境学报. 2016, 33(1): 92-101 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0121>

秸秆碳对不同施肥水平低肥力土壤碳组分的影响

何振超, 苏瑶, 喻曼, 陈喜靖, 万美霞, 沈阿林

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 304-312 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0120>

水氮处理对复播油葵产量和水氮利用效率的影响

谈建鑫, 景峰, 刘建国

农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 456-462 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0032>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李春喜, 刘 晴, 邵 云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 527–536.

LI Chun-xi, LIU Qing, SHAO Yun, et al. Effects of organic material returning and nitrogen fertilizer reduction on the economic yields and carbon, nitrogen, and water footprints of wheat-maize annual farmland in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(4): 527–536.



开放科学 OSID

有机物料还田和减施氮肥对麦-玉周年农田碳氮水足迹及经济效益的影响

李春喜, 刘 晴, 邵 云, 李斯斯, 李晓波, 翁正鹏

(河南师范大学生命科学学院, 河南 新乡 453007)

摘 要:为研究不同有机物料还田与减施氮肥处理对农田碳氮水足迹及经济效益的影响,本试验以单施化肥处理(CK, 纯氮 270 kg·hm⁻²)为对照,设置了秸秆(J)、秸秆+牛粪(JF)、秸秆+菌渣(JZ)3种有机物料还田方式,耦合减施氮肥 10%(N1, 243 kg·hm⁻²)、20%(N2, 216 kg·hm⁻²)、30%(N3, 189 kg·hm⁻²)3个施氮水平,共计 10 个处理。结果表明:与单施化肥相比,有机物料还田与减施氮肥处理能够显著提高作物产量及农田经济效益,且 JZN1、JN2 和 JFN3 处理对农田经济效益的提高效果最显著;JN1、JN2、JFN2、JFN3 和 JZN3 处理均可以有效增加农田的净碳值及碳效率,降低农田的生产氮足迹,增加其输出氮足迹,提高氮投入有效利用水平,同时降低农田水足迹。其中 JFN3 处理可以在保证农田经济效益的同时,显著提高其碳效率、降低生产氮足迹、提高氮投入有效利用水平、降低农田的水足迹。因此建议豫北地区采用秸秆+牛粪还田、配施纯氮 189 kg·hm⁻²的施肥方式。

关键词:有机物料;减施氮肥;碳足迹;氮足迹;水足迹;经济效益

中图分类号:S141;F301.2 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2020)04-0527-10 doi: 10.13254/j.jare.2019.0150

Effects of organic material returning and nitrogen fertilizer reduction on the economic yields and carbon, nitrogen, and water footprints of wheat-maize annual farmland in China

LI Chun-xi, LIU Qing, SHAO Yun, LI Si-si, LI Xiao-bo, WENG Zheng-peng

(College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: The aim of the present study was to investigate the effects of returning different organic materials to agricultural fields and reducing nitrogen fertilizer application on the carbon, nitrogen, water footprints and economic yields of farmland in northern Henan, China. Conventional single nitrogen fertilizer was used as control (270 kg·hm⁻²), and three types of organic materials (straw, straw+manure, straw+mushroom dregs) were used to amend fields under various nitrogen fertilizer regimes (90%, 80%, or 70% of the control treatment). Compared with a single application of chemical fertilizer, returning organic materials to the field and reducing the amount of nitrogen fertilizer significantly improved crop yield and economic benefits, with the straw+mushroom dregs+90% fertilizer, straw+80% fertilizer, and straw+manure+70% fertilizer treatment providing the greatest economic benefits. The net carbon value, carbon efficiency, nitrogen output, and nitrogen input efficiency were increased significantly by the straw+90% fertilizer, straw+80% fertilizer, straw+manure+80% fertilizer, straw+manure+70% fertilizer and straw+mushroom dregs+70% fertilizer treatments, whereas the nitrogen and water footprints were reduced. Because the straw+manure+70% fertilizer treatment significantly improved both carbon and nitrogen input efficiency and reduced the production nitrogen and water footprints of the experimental farmland while also optimizing economic yield, the results of present study suggest that straw and cattle manure should be returned to farmland in northern Henan and that nitrogen fertilizer application should be simultaneously reduced by 30%.

Keywords: organic material; fertilizer reduction; carbon footprint; nitrogen footprint; water footprint; economic benefit

收稿日期:2019-03-25 录用日期:2019-06-03

作者简介:李春喜(1964—),男,河南封丘人,博士,教授,从事小麦栽培及生理研究。E-mail:496513087@qq.com

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目子课题(2018YFD0300708-4, 2016YFD0300203-3)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2018YFD0300708-4, 2016YFD0300203-3)

有机肥与无机肥配施是当前农业领域的研究热点,将有机肥与无机肥配合施用既弥补了单施有机肥时肥效较为缓慢、肥料中氮素当季利用率低等缺点,也降低了过量施用化肥所带来的不良影响,对维持作物高产稳产、改善农田生态环境、促进农业可持续发展具有重要意义^[1-3]。对农田生产活动现状进行客观评估是实现农业可持续发展的第一步,而足迹指标正是农田生态系统生产活动的评估指标。本研究的足迹类型主要有碳足迹、氮足迹和水足迹。目前我国对于农田碳足迹的研究多集中在耕作措施、种植模式、灌溉方式等方面,对于探讨有机无机肥配施对农田碳足迹影响的研究较少^[4-5]。如史磊刚等^[6]在对华北平原麦-玉种植模式下碳足迹的研究中发现,化肥与灌溉造成的碳排放是影响麦-玉模式碳足迹的关键。胡乃娟等^[7]研究了不同麦秸还田方式对周年稻麦轮作农田碳足迹的影响,结果表明,在旋耕、翻耕和沟埋3种麦秸还田方式中,麦秸沟埋还田能够在增加作物产量的同时减少农田碳排放。与碳足迹相比,氮足迹的研究起步相对较晚,因此目前我国对于农田氮足迹的研究相对较少,且氮足迹的核算方法仍在不断更新与完善中^[8-9]。周涛等^[10]对2010年广东省农业氮足迹进行了分析,发现饲料与化肥的氮足迹在农业氮足迹中所占比例最大。周杏等^[11]对湖北省油菜种植的氮足迹进行了分析,结果表明,肥料类型对所排放活性氮的组分有显著影响,施用有机肥可以显著减少活性氮排放。目前国内外对于水足迹影响的研究较为完善,但多数集中在区域性的农田生态系统中,对于不同施肥方式对农田水足迹的影响研究较为少见。秦丽杰等^[12]对吉林省西部玉米生产水足迹进行了研究,结果表明,绿水在当地的作物生产中占有重要地位,且减少小麦、玉米生产水足迹对华北平原具有重要意义。前人在对农业生产中的碳足迹、氮足迹、水足迹进行研究时,多只考虑了其中一个方面,仅有少数研究将多个足迹指标综合考虑,同时将农田生

态系统的碳足迹、氮足迹和水足迹综合考虑的研究更是少之又少^[14]。

本研究针对我国豫北地区存在的化肥施用量过大、农业废弃物利用率低等问题,在有机物料还田的基础上梯度减施氮肥,探究有机肥和化肥配合施用的适宜施肥量,在保证作物高产稳产、提高农田经济效益的前提下,综合考虑农田生态系统的碳足迹、氮足迹和水足迹,确立农田碳、氮、水高效利用的优化培肥模式,为形成和发展高产低耗的肥料施用技术提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

在始于2008年的定位试验基础上,于2017年10月—2018年10月在河南省新乡市获嘉县照镜镇前李村高产试验田(113°39'E, 35°09'N)进行试验。试验田土壤为黏壤土,土壤肥沃,适宜播种,定位试验前耕层土壤及施加的有机肥养分含量见表1,试验期间的气温和降水变化见图1。

1.2 试验设计

试验田种植模式为麦-玉两熟制,供试小麦品种为“百农矮抗58”,玉米品种为“郑单958”。试验于小麦季施加处理,以单施纯氮270 kg·hm⁻²为对照(CK),设置了J(秸秆全量还田,4 200 kg·hm⁻²)、JF(秸秆全量还田+牛粪,牛粪45 m³·hm⁻²)、JZ(秸秆全量还田+菌渣,菌渣60 m³·hm⁻²)3种有机物料还田方式;耦合N1(纯氮243 kg·hm⁻²,较CK减量10%)、N2(纯氮216 kg·hm⁻²,较CK减量20%)、N3(纯氮189 kg·hm⁻²,较CK减量30%)3个施氮水平,共计10个处理。每小区面积5 m×6 m=30 m²,3次重复。

小麦季于播前(2017年10月13日)底施有机肥及化肥,CK底施纯氮162 kg·hm⁻²,N1~N3处理分别底施纯氮135、108 kg·hm⁻²和81 kg·hm⁻²,同时各处理底施K₂O 180 kg·hm⁻²、P₂O₅ 120 kg·hm⁻²、硫磺60 kg·hm⁻²、ZnSO₄ 22.5 kg·hm⁻²;第二年拔节期(2018年3月

表1 土壤和有机肥养分含量

Table 1 The nutrient content of the soil and different organic fertilizer

项目 Items	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	pH	全磷 Total P/g·kg ⁻¹	速效氮 Available N/mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹
播前土 Soil before planting	1.36	13.80	8.05	0.55	52.35	23.49
秸秆 Straw	7.39	79.01	7.71	1.53	—	—
菌渣 Mushroom dregs	7.56	19.61	8.23	10.91	—	—
牛粪 Cattle manure	25.1	60.04	7.55	12.57	—	—

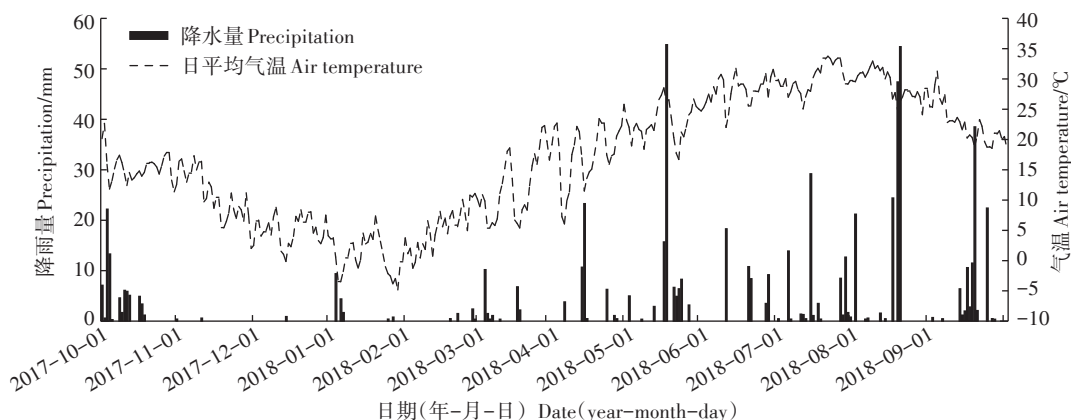


图1 试验期间气温和降水变化

Figure 1 Variations of air temperature and precipitation

24日)追施纯氮 $108 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。玉米季所有处理于玉米出苗后 25~30 d(2018年7月18日)施加复合肥($\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=28:6:6$) $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,除CK外,前茬小麦秸秆全部还田。试验期间,具体的灌水日期及灌水量:2017年12月5日灌水 60 mm;2018年3月25日灌水 68 mm;2018年6月10日灌水 100 mm;2018年7月18日灌水 140 mm。其他管理同一般大田。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 小麦、玉米产量

于小麦成熟期(2018年5月31日)每小区随机选取 1 m^2 单收,3次重复,小型脱粒机脱粒,晒干后计算产量。每小区随机选取 20 株植株考种,测定小麦千粒重。

于玉米成熟期(2018年9月12日)每小区随机选取 3 m^2 单行单收,风干后进行考种,测定玉米的单株穗粒数、百粒重、产量。

1.3.2 土壤呼吸

分别于小麦苗期(2017年12月22日)、拔节期(2018年3月29日)、开花期(2018年4月26日)、成熟期(2018年5月31日),玉米苗期(2018年6月23日)、拔节期(2018年7月9日)、大喇叭口期(2018年7月21日)、成熟期(2018年9月12日)测定田间土壤呼吸状态,采用 EGM-4 便携式土壤 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 通量测定仪(美国 PP Systems 公司)于晴天上午 8:30—11:30 测定,用测得的土壤呼吸数据估算农田碳排放。

1.3.3 土壤气体排放

分别于小麦苗期、拔节期、开花期、成熟期,玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、成熟期采用静态箱法对农田土壤气体的排放进行监测。每次测定时间为上午 8:30—11:30,采集的气体样品使用 Agilent 7890A 气相

色谱仪测定温室气体排放峰面积。试验区盖箱期间的气体排放通量采用直线回归法进行计算:

$$F = \frac{M}{22.4} \times \frac{273}{(273 + T)} \times 60 \times H \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为目标气体的排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; M 为气体的摩尔质量;22.4为标准状态下气体的摩尔体积, $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1}$; H 为采样箱内高度, cm; $\frac{dc}{dt}$ 为箱内气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。生育期内的排放总量采用线性内插法计算^[15]。用测得的温室气体排放数据估算农田的氮挥发量。

1.4 农田碳、氮、水足迹及经济效益的估算

1.4.1 农田碳足迹的估算

农田碳足迹是指农业生产活动在生命周期内的碳排放总量,包括直接碳排放与间接碳排放^[16]。计算公式为:

$$C_t = C_r + C_f \quad (2)$$

$$C_f = \sum_{i=1}^n C_{fi} = \sum_{i=1}^n m_i \beta_i \quad (3)$$

式中: C_t 为碳排放总量; C_r 为农田碳排放,由土壤呼吸数据估算, C_f 为农作物生命周期内各生产资料的碳足迹; n 为整个生产过程中消耗的 n 种物质; C_{fi} 为第 i 种物质的碳足迹; m_i 为第 i 种物质的消耗量; β_i 为第 i 种物质的碳排放参数。碳排放参数取值为农药 $6.3 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,电能 $0.25 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$,柴油 $0.94 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮肥 $1.74 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,磷肥 $0.20 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,钾肥 $0.15 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,小麦种子 $0.11 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,玉米种子 $1.05 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[17]。

碳固定量为作物成熟期生物量的固碳值,计算公式为:

$$C_o = M \times (1 - w) \times C \quad (4)$$

式中: C_o 为碳固定量; M 为作物的生物量; w 为作物含

水率; C 为作物植株含碳百分数。冬小麦的作物含水率为 0.125, 含碳率为 0.405; 夏玉米的作物含水率为 0.135, 含碳率为 0.405^[18]。

$$N_c = C_o - C_i \quad (5)$$

$$C_e = C_o / C_i \quad (6)$$

式中: N_c 指净碳值, 当 $N_c > 0$ 时, 农田生态系统为固碳状态, 当 $N_c < 0$ 时, 农田生态系统为排碳状态; C_e 为碳效率。本文中碳排放量、作物固碳量、净碳值统一用碳当量(kg CE)表示, 考虑到单位标准化, 将“kg CE”省略为“kg”。

1.4.2 农田氮足迹的估算

农田氮足迹包括生产氮足迹和输出氮足迹, 生产氮足迹主要考虑了生产资料投入、机械能源消耗和自然挥发氮三方面; 输出氮足迹主要考虑了农产品收获和秸秆废弃物两方面。有效利用水平为输入的氮素总量转换为农产品收获的比率。计算方法^[10]如下:

$$NF_{seed} = A_{seed} \times A_a \times N_{seed} \quad (7)$$

$$NF_{fer} = T_{fer} \times N_{fer} \quad (8)$$

$$NF_{en} = NF_{NO_x} + NF_{N_2O} \quad (9)$$

$$NF_{NO_x} = EC \times EFH \times c_1 \quad (10)$$

$$NF_{N_2O} = EC \times EFM \times c_2 \quad (11)$$

$$\text{有效利用水平} = \text{农产品收获氮足迹} / \text{生产氮足迹} \quad (12)$$

式中: NF_{seed} 为种子氮足迹; A_{seed} 为单位面积用种量; A_a 为播种面积; N_{seed} 为作物种子含氮量; NF_{fer} 为肥料氮足迹, 包括有机肥和无机肥; T_{fer} 为施肥量; N_{fer} 为肥料含氮量; NF_{en} 为机械能源氮足迹; NF_{NO_x} 和 NF_{N_2O} 分别表示 NO_x 和 N_2O 氮足迹; EC 为柴油消耗量; EFH 为柴油的 NO_x 排放因子, 取值 $31 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$; EFM 为柴油的 N_2O 排放因子, 取值 $25.59 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$; c_1 和 c_2 为 NO_x 和 N_2O 的含氮量, 分别取值 0.304 和 0.727^[19-20]。

1.4.3 农田水足迹的估算

分别从蓝水、绿水和灰水三个方面研究作物的水足迹, 蓝水足迹主要为农田灌溉用水量; 绿水足迹为作物在生育期内土壤的耗水量与降水量; 灰水足迹是指将作物生产中所造成的水污染稀释到标准水所用的水量。作物需水一般包括绿水和蓝水两部分, 计算公式为:

$$WF_{prod, blue} = \frac{CWU_{prod, blue}}{Y} \quad (13)$$

$$WF_{prod, green} = \frac{CWU_{prod, green}}{Y} \quad (14)$$

式中: $WF_{prod, blue}$ 为蓝水足迹, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; $WF_{prod, green}$ 为绿水足迹, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; $CWU_{prod, blue}$ 和 $CWU_{prod, green}$ 分别为作物生

育期蓝水和绿水资源利用量, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; Y 为作物单位面积产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[21]。

本文对灰水足迹进行估算时, 主要考虑施用氮肥对水体造成的污染, 未考虑其他肥料及农药对水质的污染。采用临界稀释体积法计算灰水需求量, 计算公式如下:

$$WF_{prod, grey} = \frac{CWU_{prod, grey}}{Y} \quad (15)$$

$$CWU_{prod, grey} = \frac{L_p}{C_{max} - C_{nat}} \quad (16)$$

式中: $WF_{prod, grey}$ 为灰水足迹, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; $CWU_{prod, grey}$ 为作物生育期灰水资源利用量, $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$; Y 为作物单位面积产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; L_p 为进入水体的污染物的量, 通常选取总施氮量的 10%^[12]; C_{max} 为水体可接受的最大污染物浓度, 本研究中采用 USEPA(美国环保局)标准, 即以每升饮用水中不超过 10 mg 氮计算; C_{nat} 为自然状态下水体中该污染物的浓度, 通常为 0。

作物生产水足迹就是该地区作物生长过程中所消耗的水资源量, 即蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹之和, 计算公式如下:

$$WF_{prod} = WF_{prod, blue} + WF_{prod, green} + WF_{prod, grey} \quad (17)$$

式中: WF_{prod} 为作物生产水足迹, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.4.4 农田经济效益估算

采用市场价值法计算农田的经济效益, 计算公式:

$$V = S \times Y \times P - C \quad (18)$$

式中: V 为农田经济效益, 元 $\cdot \text{hm}^{-2}$; S 为种植面积, hm^2 ; Y 为小麦或玉米的产量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; P 为小麦或玉米的市场价格, 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 小麦的市场价格为 2.4 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米的市场价格为 1.88 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$; C 为小麦或玉米的生产成本, 元, 包括机械投入、劳动成本和生产资料投入, 生产资料投入包括农药、种子和化肥; 小麦种子价格为 4.5 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米种子价格为 5.8 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 氮肥为 2.4 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, K_2O 为 5 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, P_2O_5 为 3 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, $ZnSO_4$ 为 6 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$, 玉米复合肥为 2.5 元 $\cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2 结果与分析

2.1 冬小麦、夏玉米产量及其构成因素

由表 2 可知, 有机物料还田各处理均能不同程度提高小麦及玉米产量, 不同有机物料处理下小麦产量表现为 $JZ > JF > J > CK$, 较 CK 增加了 1.90%~69.64%。 JZ 条件下, 随配施氮量的增加, 小麦产量呈上升趋势, 可能是由于长期施加菌渣改良了麦田土壤质量, 增加了麦田所能利用的最大氮量; JF 条件下, 随着施氮量的增加小麦产量呈下降趋势, 各施氮水平下小麦

表2 不同处理下小麦、玉米的产量及构成因素
Table 2 The yield and yield components of wheat and maize under different treatments

处理 Treatments	小麦季 Wheat			玉米季 Maize		
	穗数 Spikes/10 ⁴ ·hm ⁻²	千粒重 1000-grain weight/g	产量 Yield/kg·hm ⁻²	穗粒数 Kernels per ear	百粒重 100-grain weight/g	产量 Yield/kg·hm ⁻²
CK	464e	47.06a	6 176.46d	436.67c	23.70ef	8 538.78g
JN1	558cd	45.19b	7 225.28c	523.00b	27.63a	11 938.44b
JN2	546d	45.29b	8 138.14b	528.67b	26.86ab	11 721.44b
JN3	510de	44.50bc	6 294.08d	555.67ab	25.57bcde	11 697.33b
JFN1	574bcd	42.42d	7 381.94c	449.33c	25.74abcd	9 551.44e
JFN2	628abc	43.91bcd	7 493.52c	548.33ab	24.20cdef	10 956.78c
JFN3	638ab	44.96b	8 113.05b	580.00a	25.88abc	12 396.56a
JZN1	682a	42.84cd	10 478.04a	540.67ab	22.47f	10 040.56d
JZN2	640ab	42.14d	8 077.97b	473.00c	23.19f	9 065.78f
JZN3	628abc	43.50bcd	7 879.25b	442.67c	23.83def	8 717.89fg

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$ level.

产量较CK增加了19.52%~31.35%;J条件下,各施氮水平小麦产量较CK增加了1.90%~31.76%,且N2水平对小麦产量的增加效果最为显著,说明秸秆还田处理下,配施氮量过高或过低均不利于小麦产量最大限度增加。从产量结构上分析,小麦季各处理的单位面积穗数表现为JZ>JF>J>CK,均显著高于CK,但有机物料还田各处理的千粒重均显著低于CK,因此有机物料还田处理主要通过提高小麦的公顷穗数,而非千粒重来提高小麦产量。

不同处理下玉米产量较CK增加了2.10%~45.18%,且表现为J>JF>JZ>CK,小麦季产量最高的JZ处理在玉米季产量较低,可能是由于JZ处理下小麦生长旺盛,对土壤中养分的消耗较大。J条件下,各处理间产量差异不显著,但均显著高于CK,较CK增加了36.99%~39.81%;JF条件下,与小麦季类似,随配施氮量的增加玉米产量呈降低趋势,可能是由于牛粪中有机质含量远高于菌渣和秸秆,因此在玉米季时养分供应仍充足。玉米的穗粒数和百粒重均表现为J>JF>CK>JZ。J条件下,JN1与JN2处理的百粒重均高于JN3处理;JF条件下,各处理的穗粒数和百粒重均表现为JFN3处理最高,与产量趋势一致;JZ条件下,仅JZN1处理的穗粒数显著高于CK。说明J与JF处理主要通过增加玉米的穗粒数及百粒重提高玉米产量,JZ处理不能有效增加玉米产量及其各构成因素。

2.2 麦-玉周年农田经济效益估算

如表3所示,不同有机物料还田处理下农田的经济效益表现为J>JZ>JF>CK,J条件下,农田的经济效

益表现为JN2>JN1>JN3,JN2处理的经济效益最高,较CK增加了60.71%;JZ条件下,经济效益与施氮量呈正相关,最高的JZN1处理达27 365.09元·hm⁻²,较CK增加了69.94%;JF条件下,不同施氮水平的经济效益表现为JFN3>JFN2>JFN1,随着施氮量的增加,农田的经济效益降低,但均显著高于CK。综上所述,与单施化肥相比,有机物料还田处理增加了农田的经济投入,但在增加经济投入的同时也大幅增加了农田的经济产出,因此可以显著增加农田的经济效益,且JZN1、JN2和JFN3处理对农田经济效益的增加效果最显著。

2.3 麦-玉周年农田碳足迹估算

农田碳足迹包括由土壤呼吸估算的农田碳排放及生产资料碳排放。由图2可知,农田碳排放是农田碳足迹的重要组成部分,占49.58%~66.69%,且除JZN3处理外,有机物料还田处理的农田碳排放均高于CK。生产资料碳排放中,农田灌溉与施用化肥引起的碳排放占生产资料碳排放总量的96%以上,差异主要存在于施用化肥引起的碳排放中,施氮量与碳排放量呈正相关。麦-玉周年农田碳足迹总体表现为J>JZ>JF>CK,与农田直接碳排放表现出一致的趋势,且除JFN2和JZN3处理外,其他有机物料还田处理均增加了麦-玉周年农田的碳足迹,且J处理对碳足迹的增加最多。

由表4可知,不同处理下农田的净碳值均为正值,说明该农田生态系统为固碳状态。不同有机物料还田处理下农田的净碳值总体表现为JF>JZ>J>CK,JF条件下,JFN3处理的净碳值最高,较CK增加了

表3 不同处理下麦-玉周年农田经济效益

Table 3 The economic benefits of wheat-maize annual farmland under different treatments

处理 Treatments	经济价值/元·hm ⁻² Economic value/yuan·hm ⁻²	生产成本/元·hm ⁻² Cost/yuan·hm ⁻²			经济效益/元·hm ⁻² Economic benefits/yuan·hm ⁻²
		机械投入 Machine cost	劳动成本 Labor cost	生产资料 Means of production	
CK	30 876.40	3 495.00	5 350.00	5 928.25	16 103.15g
JN1	39 784.94	4 395.00	5 500.00	5 863.45	24 026.49c
JN2	41 567.85	4 395.00	5 500.00	5 793.85	25 879.00b
JN3	37 096.78	4 395.00	5 500.00	5 733.85	21 467.93d
JFN1	35 673.37	4 395.00	5 600.00	7 363.45	18 314.92f
JFN2	38 583.18	4 395.00	5 600.00	7 293.85	21 294.33d
JFN3	42 776.86	4 395.00	5 600.00	7 233.85	25 548.01b
JZN1	44 023.54	4 395.00	5 650.00	6 613.45	27 365.09a
JZN2	36 430.78	4 395.00	5 650.00	6 543.85	19 841.93e
JZN3	35 299.83	4 395.00	5 650.00	6 483.85	18 770.98ef

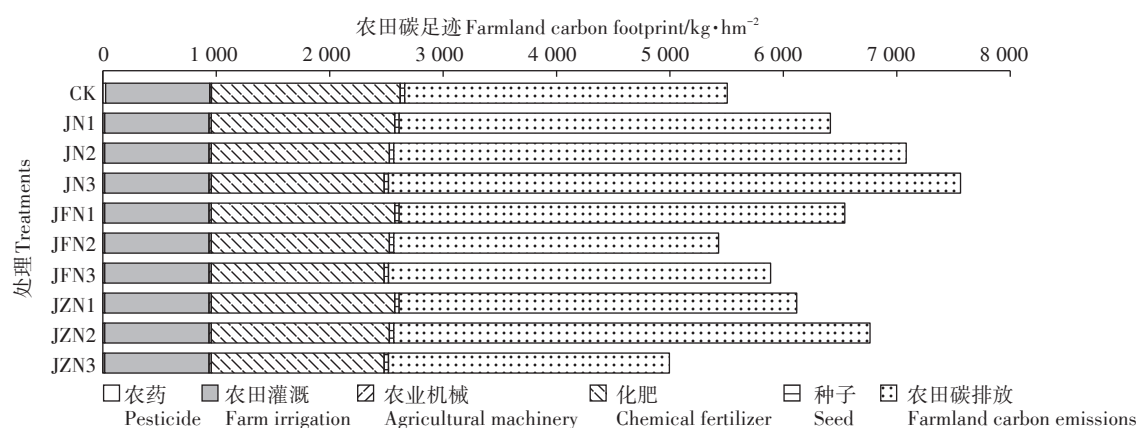


图2 不同处理下麦-玉周年农田碳足迹

Figure 2 Carbon footprint of agricultural production under different treatments

表4 不同处理下麦-玉周年农田碳排放、碳固定、净碳值和碳效率

Table 4 Carbon emission, carbon sequestration, net carbon value and carbon efficiency under different treatments

处理 Treatments	碳排放量 Carbon emission/kg·hm ⁻²	碳固定量 Carbon sequestration/kg·hm ⁻²	净碳值 Net carbon value/kg·hm ⁻²	碳效率 Carbon efficiency
CK	5 504.66	11 320.45g	5 815.79fg	2.06
JN1	6 414.51	15 091.80b	8 677.29c	2.35
JN2	7 083.07	14 818.88bc	7 735.81d	2.09
JN3	7 561.86	13 128.23e	5 566.38g	1.74
JFN1	6 541.33	12 733.78f	6 192.45f	1.95
JFN2	5 428.80	14 937.33b	9 508.54b	2.75
JFN3	5 887.55	16 063.09a	10 175.54a	2.73
JZN1	6 117.25	14 396.37c	8 279.12c	2.35
JZN2	6 764.25	13 563.61d	6 799.37e	2.01
JZN3	4 995.38	12 375.94f	7 380.56d	2.48

74.96%;JZ条件下,各施氮水平的净碳值较CK增加了16.91%~42.36%;J条件下,仅JN3处理的净碳值略低于CK,但差异不显著。碳效率是碳固定量与碳排

放量的比值,是评价农作物碳足迹强度的重要指标。不同有机物料还田处理下农田的碳效率总体表现为JF>JZ>J>CK,除JFN1、JZN2和JN3处理外,其他处理

均能有效增加农田碳效率。因此与单施化肥相比,有机物料还田处理虽然增加了麦-玉周年农田生态系统的碳足迹,但也显著增加了农田的碳固定量,进而增加农田的净碳值及碳效率。

2.4 麦-玉周年农田氮足迹估算

如表5所示,生产氮足迹分为生产资料氮足迹、机械能源氮足迹和自然挥发氮三部分,生产资料投入是生产氮足迹的主要来源,占其总量的71.16%~83.28%。机械能源方面包括整地、收获及秸秆等有机物料还田对柴油的消耗,各处理机械能源氮足迹均较小。各处理的自然挥发氮足迹表现为J条件下仅JN2处理高于CK,JZ条件下各施氮水平均高于CK。输出氮足迹中,不同有机物料还田时农产品收获氮足迹总体表现为JZ>J>JF>CK,J条件下,各水平的农产品收获氮足迹较CK增加了18.90%~39.63%;JZ条件

下,JZN1处理的农产品收获氮足迹最高,达2.33 kg;JF条件下,配施氮量与农产品收获氮足迹呈负相关,JFN3处理最高。有效利用水平为农产品收获氮足迹与生产氮足迹的比值,有机物料还田处理下的有效利用水平均显著高于单施化肥处理,J条件下,各施氮水平的有效利用水平较CK增加了31.76%~39.41%;JF条件下,配施氮量越高,有效利用水平越低,JFN3有效利用水平最高,为0.246 1;JZ条件下JZN1处理的有效利用水平最高,较CK增加了29.33%。因此,与单施化肥相比,有机物料还田下减施氮肥能够降低麦-玉周年农田生态系统的生产氮足迹,增加其输出氮足迹,提高氮投入有效利用水平。

2.5 麦-玉周年农田水足迹估算

采用虚拟水的方法计算了不同处理下作物的水足迹,结果如表6所示。与CK相比,有机物料还田配

表5 不同处理下麦-玉周年农田氮足迹

Table 5 Annual nitrogen footprint in wheat-maize farmland under different treatments

处理 Treatments	生产氮足迹 Production nitrogen footprint/kg				输出氮足迹 Output nitrogen footprint/kg		有效利用水平 Effective utilization rate
	生产资料 Input of production material	机械能源 Mechanical energy	自然挥发 Natural volatilization	总量 Total	农产品收获 Agricultural harvest	秸秆废弃物 Straw wastes	
CK	8.12	0	2.11	10.24	1.64g	1.20	0.160 6±0.002 4h
JN1	8.05	0.01	2.05	10.11	2.14b	0.81	0.211 6±0.002 8de
JN2	7.81	0.01	2.40	10.21	2.29a	0.32	0.223 9±0.003 1b
JN3	7.57	0.01	1.57	9.14	1.95e	0.66	0.213 8±0.002 3cd
JFN1	8.06	0.01	2.05	10.12	1.82f	0.43	0.180 1±0.000 5g
JFN2	7.82	0.01	1.57	9.39	2.05cd	0.20	0.218 2±0.001 4bc
JFN3	7.57	0.01	1.84	9.42	2.32a	1.04	0.246 1±0.002 0a
JZN1	7.97	0.01	3.22	11.20	2.33a	0.48	0.207 7±0.004 1de
JZN2	7.72	0.01	2.53	10.25	2.02d	0.45	0.196 8±0.006 0f
JZN3	7.48	0.01	2.63	10.11	2.09bc	0.39	0.206 4±0.005 4e

表6 不同处理下麦-玉周年农田水足迹

Table 6 Annual water footprint in wheat-maize farmland under different treatments

处理 Treatments	生产耗水量 Production water consumption/m ³ ·hm ⁻²				生产水足迹 Production water footprint/m ³ ·kg ⁻¹			
	蓝水 Blue water	绿水 Green water	灰水 Grey water	总量 Total amount	蓝水 Blue water	绿水 Green water	灰水 Grey water	总量 Total amount
CK	3 673.16	6 893.04	9 000.00	19 566.20a	0.59	1.12	1.46	3.17a
JN1	3 673.16	6 827.41	8 730.00	19 230.58c	0.51	0.94	1.21	2.66c
JN2	3 673.16	6 861.16	8 460.00	18 994.32d	0.45	0.84	1.04	2.33d
JN3	3 673.16	6 799.82	8 190.00	18 662.98f	0.58	1.08	1.30	2.97b
JFN1	3 673.16	6 898.40	8 730.00	19 301.56b	0.50	0.93	1.18	2.61c
JFN2	3 673.16	6 896.84	8 460.00	19 030.00d	0.49	0.92	1.13	2.54c
JFN3	3 673.16	6 829.38	8 190.00	18 692.55ef	0.45	0.84	1.01	2.30d
JZN1	3 673.16	6 844.62	8 730.00	19 247.78c	0.35	0.65	0.83	1.84e
JZN2	3 673.16	6 901.86	8 460.00	19 035.02d	0.45	0.85	1.05	2.36d
JZN3	3 673.16	6 860.65	8 190.00	18 723.82e	0.47	0.87	1.04	2.38d

施氮肥显著降低了作物的生产水足迹,有机物料还田配施氮肥处理下麦田的蓝水、绿水、灰水足迹均有不同程度的降低,且灰水足迹的降低效果最好。麦-玉周年农田的生产水足迹总量表现为 $JZ < JF < J < CK$,JZ条件下,配施氮量与生产水足迹呈负相关,JZN1处理对农田水足迹的降低效果最显著;JF条件下,配施氮量与生产水足迹呈正相关,生产水足迹最低的JFN3处理较CK降低了27.44%;J处理下,农田生产水足迹表现为 $JN2 < JN1 < JN3$,较CK降低了6.31%~26.50%。综上所述,与单施化肥相比,有机物料还田配施氮肥处理可以显著降低作物的生产水足迹,且JZN1、JFN3和JN2处理对麦-玉周年农田生产水足迹的降低效果最好。

3 讨论

本研究以小麦播种为起点,玉米收获为终点,分别计算了麦-玉周年农田生态系统的碳足迹、氮足迹和水足迹。结果表明,与单施化肥相比,有机物料还田和减施氮肥处理增加了农田的碳排放量,与前人研究结果^[7]一致。有机肥的添加增加了农田的直接碳排放,是由于有机肥的施入增加了土壤中碳的含量,使土壤微生物活性增强,土壤呼吸增强;同时有机肥的施入促进了植物根系的生长,使根系生物量增加,并增加了土壤中的根茬残留物,造成农田直接碳排放增加^[4]。但有机物料还田造成的农田直接碳排放增加不会影响大气 CO_2 浓度,因为本研究中所施用的有机肥为农业废弃物,这些农业废弃物如果没有施入农田中,同样也会矿化释放为 CO_2 ,并同时造成环境污染^[22]。农田碳足迹组成中,化肥与灌溉所造成的碳足迹占碳足迹总量的32.29%~48.89%,所占比例较大,与Cheng等^[23]对我国作物生产碳足迹构成的研究结果相似。可能是由于国内化肥与电能生产能耗较高^[24],因此降低能源和工业部门的碳排放对降低农业生产生命周期内的碳足迹仍然十分重要。同时,降低农田施氮量、提高作物氮素利用效率也是降低农田碳足迹的重要措施。

与碳足迹、水足迹相比,目前国内外对于氮足迹的研究相对较少^[8]。借鉴碳足迹的概念,本研究主要从生产和输出两方面对农田生态系统的氮足迹进行估算。生产氮足迹中,秸秆还田+菌渣处理下最高,分析生产氮足迹的组成发现,秸秆还田+菌渣处理主要增加了玉米季田间 N_2O 排放。可能与玉米季作物的生长有关,土壤有效氮源的供应是控制 N_2O 排放的

主要因素,而在玉米季,秸秆还田+菌渣处理下玉米的产量最低,干物质积累最少,对土壤中氮素的利用最少,因此 N_2O 排放最高^[25]。生产氮足迹总量中,施加化肥所造成的氮足迹占70.18%~81.04%,说明在农业生产中,化肥的施用是造成农田氮足迹增加的最主要原因。同时过高的氮肥投入造成了氮肥利用率低下等问题,施入农田中的氮肥大都以活性氮的形式释放到环境中,并未真正为作物利用,带来了严重的环境污染问题^[26]。

水足迹的计算结果表明,与单施化肥相比,有机物料还田处理可以显著降低农田的水足迹总量,一方面是由于有机物料还田处理可以有效降低土壤容重,减小土壤孔隙度,显著改善土壤通气及水分状况,增强土壤表层保水效果;另一方面,有机肥的施入可以显著增加作物的根系总量,扩大根系对土壤水分及养分的吸收空间,提高作物的水分效率^[27]。在3种有机物料还田方式中,秸秆还田+菌渣处理的水足迹最低,说明秸秆菌渣还田方式对于减少田间土壤水分损失、提高作物水分利用效果最好。水足迹组成中,灰水足迹占农田水足迹总量的43.70%~46.06%,是农田水足迹最重要的组成部分,且在本研究中,对于灰水足迹的估算是保守的,因为仅考虑了氮肥对灰水足迹的影响,尚未考虑气候类型及农药施用等对水质造成的污染。因此调整施肥模式、降低灰水足迹对降低农田水足迹至关重要,与张宇等^[28]研究结果一致。

相关研究表明,有机肥与无机肥配施可以调节土壤营养环境,提高土壤保水性和保肥性,降低土壤酸度,最终提高作物产量^[29-30]。孙宁科等^[31]认为,有机肥与无机肥长期配合施用能够显著提高作物产量,同时增加作物产量的稳定性。有机肥氮替代化肥氮之所以能够增产,是由于其能够改善土壤中氮素的供应过程,使土壤养分能够平稳释放^[32]。本研究中,有机物料还田下减施氮肥能够显著增加作物的产量,不同有机物料还田下小麦的产量表现为 $JZ > JF > J > CK$,玉米的产量表现为 $J > JF > JZ > CK$ 。小麦季JZ处理下产量最高,是由于菌渣中存在大量的微生物,可以加速有机物料的分解,增加土壤酶的活性,增加作物对氮的积累及利用,因此JZN1处理下小麦产量最高^[33-34];JF条件下,牛粪中也存在大量的微生物,能够有效改良土壤状况,但牛粪中氮的含量是菌渣中氮的3.3倍,因此氮投入量较JZ处理大大增加,能够满足玉米季作物对氮素的大量需求,故JFN3处理的玉米产量最高。

农田的经济效益与作物的产量和生产成本密切相关,本研究结果表明,与单施化肥相比,秸秆还田处理对农田经济效益的提升最为显著。主要是由于在秸秆还田+牛粪和秸秆还田+菌渣处理中,牛粪与菌渣存在一定的运输成本,且还田时投入的人力成本相对较高,故秸秆还田+牛粪与秸秆还田+菌渣处理的经济效益总体上低于秸秆还田处理。但经济效益最高的JZN1处理仍显著高于秸秆还田各处理。

4 结论

与单施化肥相比,有机物料还田与减施氮肥处理能够显著增加作物产量及农田经济效益,且以JZN1、JFN3和JN2处理对农田经济效益的提高效果最为显著。但从碳、氮、水足迹的计算结果来看,JZN1处理不能有效降低农田的生产氮足迹,JN2处理对农田碳效率的提升及对生产氮足迹的降低效果较弱,因此豫北地区更适宜采用小麦季施纯氮 $189\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、秸秆+牛粪还田(JFN3)的施肥方式。

参考文献:

- [1] 白玲,李俊华,褚贵新,等.有机无机肥配施对棉花养分吸收及氮素效率的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(5):143-148.
BAI Ling, LI Jun-hua, CHU Gui-xin, et al. Effects of organic manure application combined with chemical fertilizers on nutrients absorption and nitrogen efficiency of cotton in Xinjiang, China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(5): 143-148.
- [2] 高菊生,徐明岗,王伯仁,等.长期有机无机肥配施对土壤肥力及水稻产量的影响[J].中国农学通报,2005,21(8):211-214,259.
GAO Ju-sheng, XU Ming-gang, WANG Bo-ren, et al. The effects of rational application of long term organic and chemical fertilizers on soil fertility and rice yield[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 211-214, 259.
- [3] 许晶晶,郝明德,赵云英.黄土高原旱地小麦氮磷钾与有机肥优化配施试验[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):143-147.
XU Jing-jing, HAO Ming-de, ZHAO Yun-ying. Combination effects of nitrogen, phosphorus, potassium and organic manure on winter wheat in dryland of the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 143-147.
- [4] 赵迅,郭李萍,谢立勇,等.不同农作措施对棕壤玉米田 N_2O 排放及碳足迹的影响[J].中国农业气象,2016,37(3):270-280.
ZHAO Xun, GUO Li-ping, XIE Li-yong, et al. Impacts of different farming managements on N_2O emission and carbon footprint for maize from brown soil[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(3): 270-280.
- [5] 伍芬琳,李琳,张海林,等.保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响[J].生态学报,2007,26(12):2035-2039.
WU Fen-lin, LI Lin, ZHANG Hai-lin, et al. Effects of conservation tillage on net carbon flux from farmland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [6] 史磊刚,陈阜,孔凡磊,等.华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):93-98.
SHI Lei-gang, CHEN Fu, KONG Fan-lei, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9): 93-98.
- [7] 胡乃娟,史航,朱利群.不同麦秸还田方式对周年稻麦轮作农田碳足迹的影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2775-2783.
HU Nai-juan, SHI Hang, ZHU Li-qun. Effects of different straw returning modes on carbon footprint in a rice-wheat rotation system[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, 27(12): 2775-2783.
- [8] 秦树平,胡春胜,张玉铭,等.氮足迹研究进展[J].中国生态农业学报,2011,19(2):462-467.
QIN Shu-ping, HU Chun-sheng, ZHANG Yu-ming, et al. Advances in nitrogen footprint research[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2): 462-467.
- [9] Leach A M, Galloway J N, Bleeker A, et al. A nitrogen footprint model to help consumers understand their role in nitrogen losses to the environment[J]. *Environmental Development*, 2012, 1(1): 40-66.
- [10] 周涛,王云鹏,王芳,等.广东省农业氮足迹分析[J].中国环境科学,2014,34(9):2430-2438.
ZHOU Tao, WANG Yun-peng, WANG Fang, et al. Analysis of the nitrogen footprint of agriculture in Guangdong[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2430-2438.
- [11] 周杏,冯玄韬,于书霞,等.湖北省油菜种植氮足迹分析[J].环境科学与技术,2018,41(1):41-46.
ZHOU Xing, FENG Xuan-tao, YU Shu-xia, et al. Analysis of nitrogen footprint for rape cultivation in Hubei Province[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(1): 41-46.
- [12] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.
QIN Li-jie, JIN Ying-hua, DUAN Pei-li. Production water footprint of maize in the west of Jilin Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(8): 1020-1025.
- [13] 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.
GE 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.
- [14] 付永虎,刘黎明,袁承程.农业土地利用系统氮足迹与灰水足迹综合评价[J].农业工程学报,2016,32(S1):312-319.
FU Yong-hu, LIU Li-ming, YUAN Cheng-cheng. Comprehensive evaluation for nitrogen footprint and gray water footprint of agricultural land use system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 312-319.
- [15] 王玉英,胡春胜,程一松,等.太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳储存及其气体调节价值[J].农业环境科学学报,2009,28(7):1508-1515.
WANG Yu-ying, HU Chun-sheng, CHENG Yi-song, et al. Carbon

- sequestrations and gas regulations in summer-maize and winter-wheat rotation ecosystem affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Taihang Mountains, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7):1508-1515.
- [16] Lal R. Carbon emission from farm operations[J]. *Environment International*, 2004, 30(7):981-990.
- [17] 牛海生, 李大平, 张娜, 等. 不同灌溉方式冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5):749-755.
NIU Hai-sheng, LI Da-ping, ZHANG Na, et al. Effect of irrigation modes on carbon budget in winter wheat field[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2014, 23(5):749-755.
- [18] 卢小宏, 黄晶, 史磊刚, 等. 北京市主要农作模式的碳效益分析[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(2):48-53.
LU Xiao-hong, HUANG Jing, SHI Lei-gang, et al. Analysis on carbon efficiency of the main cropping systems in Beijing[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2):48-53.
- [19] 李新艳, 李恒鹏. 中国大气NH₃和NO_x排放的时空分布特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(1):37-42.
LI Xin-yan, LI Heng-peng. Emission and distribution of NH₃ and NO_x in China[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(1):37-42.
- [20] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪, 等. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, 21(6):493-497.
TIAN He-zhong, HAO Ji-ming, LU Yong-qi, et al. Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China[J]. *China Environmental Science*, 2001, 21(6):493-497.
- [21] 田宏安, 诸大建, 王欢明, 等. 中国主要粮食作物的水足迹值: 1978—2010[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(6):122-128.
TIAN Yuan-hong, ZHU Da-jian, WANG Huan-ming, et al. Water footprint calculation of China's main food crops: 1978—2010[J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(6):122-128.
- [22] 陈义, 吴春艳, 水建国, 等. 长期施用有机肥对水稻土CO₂释放与固定的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12):2468-2473.
CHEN Yi, WU Chun-yan, SHUI Jian-guo, et al. Emission and fixation of CO₂ from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12):2468-2473.
- [23] Cheng K, Pan G, Smith P, et al. Carbon footprint of China's crop production: An estimation using agro-statistics data over 1993—2007[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3):231-237.
- [24] 陈舜, 逯非, 王效科. 中国氮磷钾肥制造温室气体排放系数的估算[J]. 生态学报, 2015, 35(19):6371-6383.
CHEN Shun, LU Fei, WANG Xiao-ke. Estimation of greenhouse gases emission factors for China's nitrogen, phosphate, and potash fertilizers[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(19):6371-6383.
- [25] 黄小林. 菌渣还田对农田温室气体排放的影响研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
HUANG Xiao-lin. Effects of mushroom residues on GHG emissions from soils under rice-wheat rotation[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2012.
- [26] 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.
- [27] 李科, 马剑. 有机无机配施对旱作冬小麦水分利用率的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(5):1170-1175.
LI Ke, MA Jian. Effects of combined application of organic and inorganic fertilization on water use efficiency of winter wheat in dryland[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(5):1170-1175.
- [28] 张宇, 李云开, 欧阳志云, 等. 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[J]. 生态学报, 2015, 35(20):6647-6654.
ZHANG Yu, LI Yun-kai, OUYANG Zhi-yun, et al. The grey water footprint of the winter wheat-summer maize crop rotation system of the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20):6647-6654.
- [29] Diacono M, Montemurro F. Long-term effects of organic amendments on soil fertility: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2010, 30(2):401-422.
- [30] 段红光. 增施有机肥对小麦生育特性·产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(10):4353-4355.
DUAN Hong-guang. Effect of applying organic manure on characteristics of growth and yield of wheat[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2013, 41(10):4353-4355.
- [31] 孙宁科, 索东让. 有机肥与化肥长期配施对作物产量和灌漠土养分库的影响[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4):42-46.
SUN Ning-ke, SUO Dong-rang. Effects of long-term mixed use of organic manure and chemical fertilizers on crop yield and indigenous soil nutrients[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(4):42-46.
- [32] 王艳博, 黄启为, 孟琳, 等. 有机无机肥料配施对盆栽菠菜生长和土壤供氮特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3):44-48.
WANG Yan-bo, HUANG Qi-wei, MENG Lin, et al. Effect of combined application of organic and inorganic fertilizer application on growth of spinach and soil nitrogen supply[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2006, 29(3):44-48.
- [33] 董志新, 李筱梅, 续珍, 等. 沼渣有机无机复混肥对土壤养分含量和酶活性的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2):398-404.
DONG Zhi-xin, LI Xiao-mei, XU Zhen, et al. Effects of organic-inorganic mixed fertilizer made by biogas residue on soil nutrients and enzyme activities[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(2):398-404.
- [34] 龙攀, 高旺盛, 隋鹏, 等. 农业废弃物还田对土壤团聚体及土壤C和N的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6):107-118.
LONG Pan, GAO Wang-sheng, SUI Peng, et al. Effects of agricultural organic wastes incorporation on soil water-stable aggregates and C, N contents[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(6):107-118.