

基于 Meta 分析的黑龙江省水稻水土肥资源协同优化调配

李 茉^{1,2} 薛 敏¹ 沙 炎¹ 李海燕¹ 陈颖珊¹

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 水稻灌溉水量、氮肥和种植面积的高效管理有助于提升农业经济效益, 提高资源利用效率和改善生态环境。以黑龙江省 13 个市(区)为研究区域, 利用 Meta 分析量化不同灌溉方式和施氮量对水稻产量和温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)排放的影响, 并建立水肥生产函数。在此基础上, 以经济效益、温室气体排放量、水肥利用效率为目标函数构建多目标优化模型, 以优化分配各地区的水肥资源, 调整水稻种植面积。优化结果表明: 控制灌溉和施加氮肥不同程度影响产量和温室气体排放, 优化后水稻种植面积减少 3.76%, 水利用效率提高 18.4%, 灌溉水量均值为 4 513.54 m^3/hm^2 , 氮肥施用量减少 11%, 氮肥利用效率提高 32%, 氮肥施用量均值为 100 kg/hm^2 ; 经济效益增加 8.1%, 温室气体排放降低 10.6%。本模型可以量化表征区域尺度基于控制灌溉的水肥施用与产量及温室气体排放的响应关系, 协同优化稻田水土肥资源最佳配比, 平衡经济、温室气体排放和资源利用效率, 有助于黑龙江省水稻不同目标间的水肥资源优化和种植面积调整, 促进农业可持续发展, 可为水稻水土肥资源优化与管理提供参考。

关键词: 水稻; 控制灌溉; Meta 分析; 水肥耦合; 多目标非线性优化模型

中图分类号: S274; S36

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)05-0302-10

OSID:



Synergistic and Optimal Allocation of Water, Land and Fertilizer Resources of Rice in Heilongjiang Province Based on Meta-analysis

LI Mo^{1,2} XUE Min¹ SHA Yan¹ LI Haiyan¹ CHEN Yingshan¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. National Key Laboratory of Smart Farm Technology and System, Harbin 150030, China)

Abstract: Efficient management of irrigation water, nitrogen fertilizer and planting area of rice is helpful to improve agricultural economic efficiency, resource utilization efficiency and ecological environment. Taking 13 cities (districts) in Heilongjiang Province as the study area, Meta analysis was used to quantify the effects of different irrigation methods and nitrogen application rates on rice yield and greenhouse gas emissions (CO_2 , CH_4 , N_2O), and the water-fertilizer production function was established. Furthermore, a multi-objective optimization model was established with economic benefit, greenhouse gas emission and water and fertilizer utilization efficiency as objective functions to optimize the allocation of water and fertilizer resources in different regions and adjust the rice planting area. The results showed that controlled irrigation and application of nitrogen fertilizer had different effects on yield and greenhouse gas emissions. After optimization, rice planting area was reduced by 3.76% and water use efficiency was increased by 18.4%, the amount of irrigation was 4 513.54 m^3/hm^2 . The nitrogen application rate was reduced by 11%, and the nitrogen use efficiency was increased by 32%, the amount of nitrogen fertilizer applied was 100 kg/hm^2 . Economic benefits were increased by 8.1%, and environmental pollution was decreased by 10.6%. The model can quantify the response of controlled irrigation based water and fertilizer application to yield and greenhouse gas emissions at regional scale, synergistically optimize water - land - fertilizer resource allocation in rice paddies, balance economics, greenhouse gas emissions, and resource efficiency, it was helpful to optimize water and nitrogen resources and adjust planting area between different targets of rice in Heilongjiang Province, so as to promote sustainable agricultural development. It can provide reference for the optimization and management of

收稿日期: 2024-02-22 修回日期: 2024-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(52003900, 52222902)

作者简介: 李茉(1988—), 女, 教授, 博士, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: limo0828@neau.edu.cn

soil, water and fertilizer resources of rice.

Key words: rice; controlled irrigation; Meta-analysis; water and fertilizer coupling; multi-objective nonlinear optimization model

0 引言

水稻是黑龙江省重要的粮食作物之一,其种植面积占粮食作物总种植面积的 26.6%,是保障国家粮食安全的有力支撑^[1]。水、肥两个重要因素影响水稻的生长,适量的水肥配置模式能明显改善水稻生长特性、实现增产效果^[2]。然而水稻生产也是导致温室气体排放的因素之一。IPCC 报告显示,水稻种植造成的温室气体排放分别占全球农业甲烷(CH₄)和二氧化氮(N₂O)排放量的 30% 和 11%^[3],并且增加了田间二氧化碳(CO₂)排放。因此,实现水稻的可持续生产不仅要考虑增产带来的经济效益提高,还要考虑水稻生长过程水肥利用效率及温室气体排放对环境的影响。

在黑龙江地区,由于降水和作物需水存在时间和空间上分配的矛盾,控制灌溉(CI)成为作物稳产、获得较高用水效率的重要田间管理措施之一^[4],对稻田的氮素利用也有重要影响^[5]。不合理灌溉会造成氮素淋溶损失,影响氮肥利用率,也会浪费水资源,影响水资源利用率提高。已有研究表明,与常规淹灌相比,控制灌溉的过程会影响土壤的理化性质^[6],能在减少灌溉量的同时满足水稻的生理需求,促进水稻生长及提高水利用效率^[7]。此外,施用氮肥是保持水稻高产的一个重要措施^[8]。传统水稻种植中通常施用过氮量来提高水稻产量,然而这种方式存在肥料利用率低的问题,还会对环境造成巨大的负面影响。因此探究适合水稻高产优质的水肥耦合制度、提高水肥利用效率和缓解温室气体排放是当前水稻可持续发展的重要任务。水稻水肥耦合制度的优化建立在控制灌溉和不同施氮量对水稻产量和温室气体排放量影响的基础上。现有控制灌溉和施氮量对水稻产量和温室气体排放的研究多集中在田间试验,区域尺度上水肥耦合对水稻产量和温室气体排放影响的研究不足。而 Meta 分析能够解决试验数据短缺、大田试验周期长、试验区小对量化区域尺度水肥耦合与产量和温室气体排放响应关系影响的问题。大量理论研究往往关注控制灌溉或者施氮量因素^[9-13]对产量或温室气体排放的影响,综合研究水肥耦合对水稻产量和温室气体排放的影响较少。

在有限的水土资源刚性约束下,水稻水肥耦合与种植面积在协同提升产量、减少温室气体排放中

存在相互制约的关系,需要协同优化调配。现阶段优化调配研究多体现在系统中单一要素的优化,如对水资源量进行优化^[14-17],对氮肥施用量进行优化^[18-20],对种植面积进行优化^[21-24],传统单一要素优化难以有效兼顾多目标之间的制约和影响。而不同灌溉水量、施氮量和种植面积会影响水稻种植系统的经济、环境和水肥利用效率,三者相互作用,是一个多目标优化过程。因此,在区域水肥耦合生产函数的基础上,考虑经济效益、温室气体排放量和水肥利用效率多目标的协同,对水肥资源和种植面积三者进行协同优化调配,有利于解决水稻资源最优分配问题,提高水肥利用效率、促进稻田生态系统可持续发展,保证地区粮食安全稳定,然而相关研究鲜有报道。

因此,本研究构建基于 Meta 分析的多目标优化模型,基于 Meta 分析方法量化控制灌溉和施氮量对作物产量和温室气体排放的影响,建立区域水稻水肥生产函数,耦合水肥生产函数关系式,建立考虑经济效益、温室气体排放、水肥利用效率多目标模型。旨在优化黑龙江省水稻水肥资源和调整种植面积,以实现经济效益、温室气体排放和水肥资源利用效率多目标的协同。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

构建的模型应用于黑龙江省 13 个市(区)(43°26'~53°33'N,121°11'~135°05'E),包括伊春市、牡丹江市、大庆市、鸡西市、鹤岗市、绥化市、双鸭山市、七台河市、佳木斯市、黑河市、齐齐哈尔市、哈尔滨市、大兴安岭地区,属温带大陆季风性气候,多年平均气温为 2.65℃,年均降水量 400~650 mm。2022 年以来黑龙江省水稻播种面积呈增长趋势,水稻是该地区的主要粮食作物之一,种植面积达 2.82 × 10⁶ hm²,占黑龙江粮食种植总面积的 26.6%,占全国的 12.4%,居全国第 2 位^[25]。水稻灌溉水需求量巨大,在有限的农业可利用水条件下,黑龙江省三江平原由于大面积的水稻种植已引起地下水超采,地下水位严重下降等问题^[26],节水灌溉刻不容缓。近些年,黑龙江省大力推广水稻控制灌溉技术,是节约稻田用水的重要措施。虽然黑龙江省黑土质量和肥力均较高,但存在农田施肥过量的现象,大量种植水稻导致温室气体排放量增多,环境问题不断加剧^[27]。亟待解决黑龙江地区水稻水土

肥资源高效优化配置问题。本研究针对黑龙江省13个市(区)水稻作物进行水肥资源优化和种植面积调整。研究区域见图1。

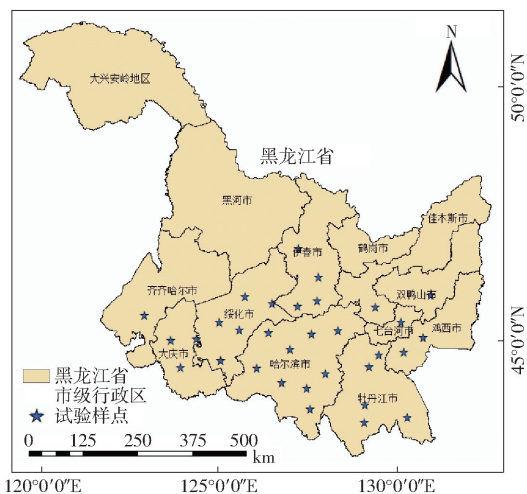


图1 研究区域图

Fig. 1 Research area map

1.2 Meta 分析

Meta 分析是用于比较和综合某一科学问题研究结果的统计学方法。本文利用 Meta 分析从文献库中搜集大量数据系统地评估黑龙江省水稻灌溉方式(控制灌溉)和氮肥施加量对作物产量和温室气体排放的影响,获得与常规淹灌相比控制灌溉的效应值以及与不施氮相比施氮量的效应值。Meta 分析过程中整理样本数量增多,能够提高估计精度和准确性,同时可以检验不同研究结果的差异性,对异质性来源做出更好的解释。

从筛选的文献中提取控制灌溉(CI)、常规灌溉(FI)和不同施氮量处理的水稻产量和温室气体排放数据作为响应变量,在多种灌溉施肥量条件下,选择水稻的常规淹灌(FI)和施肥量(0 kg/hm^2)作为对照组,试验组为不同灌溉水量和不同施肥量。定义响应比的自然对数($\ln R$),令其作为效应值的衡量标准值(Effect size)来量化灌溉量和施肥量对水稻产量和温室气体排放的影响程度。当 $\ln R$ 大于 0 时,水肥施加量对产量和温室气体排放量表现为正效应,小于 0 时表现为负效应。

某一指标对应数据响应比的自然对数 $\ln R$ 计算公式为

$$\ln R = \ln \frac{\chi_t}{\chi_c} = \ln \chi_t - \ln \chi_c \quad (1)$$

式中 χ_c 、 χ_t ——对照组、试验组响应变量均值

为了更好地表示水肥对于产量和温室气体的影响,将效应值 $\ln R$ 转变为变化率 E , 计算式为

$$E = (\exp(\ln R) - 1) \times 100\% \quad (2)$$

搜集的数据大部分集中研究常规淹灌和控制灌

溉的影响,也有些研究关于氮肥施加量可能会对水稻产量和温室气体排放产生影响。这可能出现控制灌溉和常规淹灌的效果被高估或者低估。通过 R 语言中的 metafor 包,使用混合效应模型对效应值 $\ln R$ 进行统计分析^[28]。在该混合效应模型中,控制灌溉(相对于传统淹灌)被设定为固定效应,施氮量变化被设定为随机效应模型,表达式为

$$\ln R = \alpha_1 + \beta_1 + e \quad (3)$$

式中 α_1 ——截距

β_1 ——控制灌溉(CI)引起的产量变化的响应系数

e ——由氮肥变量引起产量变化解释的残差

搜集文献数据的偏倚检验通过 RStudio 软件的正态百分位图验证^[29]。

1.3 水稻水土肥资源多目标协同优化模型建立

建立多目标非线性优化模型,以优化决策黑龙江省13个市(区)水稻的灌溉水量、种植面积和氮肥施用量。基于 Meta 分析量化控制灌溉和不同施氮量对水稻作物产量和温室气体排放的影响,构建水肥生产函数,将函数与优化模型相结合。该多目标优化模型旨在协同经济、环境和水肥资源利用效率之间的矛盾,包括经济效益最大化、温室气体排放量最小化、水利用效率最大化和氮肥资源利用效率最大化4个目标函数,并受到土地供应、供需水量需求、粮食安全、环境碳排放、氮肥需求量等约束的限制。研究方法框架如图2所示。

1.3.1 目标函数

建立模型的目标函数包括净经济效益最大化、温室气体排放量最小化、水利用效率最大化和氮肥资源利用效率最大化4个目标。模型决策变量为黑龙江省13个市(区)水稻的灌溉水量、种植面积和施氮量。在多目标优化模型中,决策变量的优化依赖于模型中目标函数和约束条件的相互作用。4个目标函数之间相关关系如下:作物产量受水肥耦合效应的影响,通过由 Meta 分析构建的水肥生产函数表征,同时水稻种植中单位面积种子、化肥、排灌、人工劳作等费用消耗和作物产量直接影响经济效益;作物产量与灌溉水量共同影响水利用效率;作物产量与施氮量共同影响氮肥资源利用效率;温室气体净排放量包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 气体排放,作物种植面积和肥料施用量共同影响温室气体排放。不同区域的经济效益、温室气体排放、水利用效率和氮肥资源利用效率存在相互制约、相互平衡的关系。

(1) 净经济效益最大化

该目标函数旨在确定水稻作物单位面积下经济效益最大化,通过经济收入和种植总成本之间差值

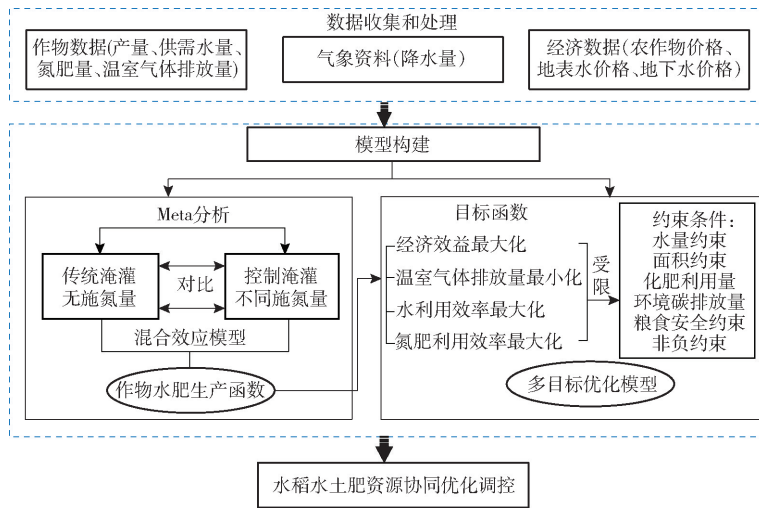


图 2 研究方法框架

Fig. 2 Methodological framework

来量化。经济收入与水稻的种植面积、市场价格、产量有关,种植总成本中的各要素与种植面积有关。该目标函数通过经济效益最大化角度对水稻水肥资源和种植面积进行优化配置与调整,表达式为

$$\max f_{eco} = \sum_{i=1}^I (f_i^{Yield}) (N_{F,i}, I_{W,i}) p_i A_i Y_i - I_{S,i} A_i \quad (4)$$

其中 $I_{W,i} = I_{WS,i}^{(sur)} + I_{WG,i}^{(gro)}$ (5)

式中 f_{eco} ——净经济效益目标函数,元
i——区域指数,表示黑龙江省 13 个市(区)
 $f_i^{(Yield)}(N_{F,i}, I_{W,i})$ ——在控制灌溉下不同氮肥施加量对产量增长率影响的变化函数

- $I_{W,i}$ ——灌水定额, m^3/hm^2
- $N_{F,i}$ ——氮肥施用量, kg/hm^2
- p_i ——水稻市场单价,元/ hm^2
- A_i ——水稻种植面积, hm^2
- Y_i ——水稻实际产量, kg/hm^2
- $I_{WS,i}^{(sur)}, I_{WG,i}^{(gro)}$ ——区域水稻地表水、地下水灌溉定额, m^3/hm^2
- $I_{S,i}$ ——水稻种植成本,元/ hm^2

产量增长率与施肥量和灌溉水量有关,建立水肥与产量生产函数关系,表征控制灌溉下氮肥与产量的增长关系,计算式为

$$f_i^{(Yield)}(N_{F,i}, I_{W,i}) = C(a + cN_{F,i} + dN_{F,i}^2) \quad (6)$$

式中 C ——区域水稻相对于传统淹灌下控制灌溉对产量影响的变化率

a, c, d ——区域水稻施氮量与产量生产函数关系的拟合系数

种植总成本包括种子、农药、氮肥、农膜、农机柴油、排灌和人工使用量成本,表达式为

$$I_{S,i} = \sum_{i=1}^I (I_{SN,i} + I_{SC,i} + I_{SY,i} + I_{SZ,i} + I_{SM,i} + I_{SL,i} + I_{SW,i}) \quad (7)$$

式中 $I_{SN,i}, I_{SC,i}, I_{SY,i}, I_{SZ,i}, I_{SM,i}, I_{SL,i}, I_{SW,i}$ 分别为氮肥、农机柴油、农药、种子、农膜、排灌、人工使用量价格,元/ hm^2 。

(2) 温室气体排放量最小化

该目标函数旨在减少温室气体排放对环境造成的影响。稻田中的温室气体有 CO_2, CH_4 和 N_2O , 其中, CO_2 和 CH_4 排放量主要来自各种农业活动^[30], N_2O 排放量主要来自氮肥的硝化和反硝化。该目标函数通过温室气体净排放的角度实现对水稻水肥资源和种植面积进行优化配置与调整,表达式为

$$\min f_{env} = \sum_{i=1}^I I_{G,i} \quad (8)$$

其中 $I_G = f_{CO_2} + 28 \frac{16}{12} f_{CH_4} + 265 \frac{44}{28} f_{N_2O}$ (9)

式中 f_{env} ——温室气体排放量目标函数, kg
 $I_{G,i}$ ——温室气体(CO_2, CH_4, N_2O)排放量, kg
 $f_{CO_2}, f_{CH_4}, f_{N_2O}$ —— CO_2, CH_4, N_2O 排放量, kg
 CO_2 排放量主要来自各种农业活动,包括氮肥、农药、燃料、农膜和电力的应用,表达式为

$$f_{CO_2} = \lambda_1 \mu_1 \sum_{i=1}^I (\delta_f N_{F,i} + \delta_p D_{p,i} + \delta_g D_{g,i} + \delta_l D_{l,i} + \delta_e F_{e,i}) A_i \quad (10)$$

式中 λ_1 ——控制灌溉对温室气体 CO_2 排放的影响系数

μ_1 ——氮肥施加量对温室气体 CO_2 排放的影响系数

$\delta_f, \delta_p, \delta_g, \delta_l, \delta_e$ ——肥料、农药、燃料、农膜、电力的碳排放系数, kg/kg

$D_{p,i}, D_{g,i}, D_{l,i}$ ——单位面积农药、柴油、农膜

用量, kg/hm²

$F_{e,i}$ ——单位面积灌溉耗电量, kW·h/hm²

CH₄排放量表达式为

$$f_{\text{CH}_4} = \lambda_2 \mu_2 \sum_{i=1}^I A_i \Delta_i \quad (11)$$

式中 λ_2 ——控制灌溉对温室气体 CH₄ 排放的影响系数

μ_2 ——氮肥施加量对温室气体 CH₄ 排放的影响系数

Δ_i ——CH₄ 排放系数, kg/hm²

N₂O 排放量包括作物本底 N₂O 排放和含氮肥料的应用, 表达式为

$$f_{\text{N}_2\text{O}} = \lambda_3 \mu_3 \sum_{i=1}^I A_i (N_{F,i} N_{ep,i} + N_{bp,i}) \quad (12)$$

式中 λ_3 ——控制灌溉对温室气体 N₂O 排放的影响系数

μ_3 ——氮肥施加量对温室气体 N₂O 排放的影响系数

$N_{ep,i}$ ——氮肥 N₂O 排放系数, kg/kg

$N_{bp,i}$ ——作物本底 N₂O 排放系数, kg/hm²

(3) 水利用效率最大化

水利用效率是水稻产量与灌溉水量的比值^[31]。该目标函数通过水利用效率最大化角度对水稻水肥资源和种植面积进行优化配置与调整, 旨在提高用水效率, 达到有效节水, 表达式为

$$\max IWUE = \frac{\sum_{i=1}^I A_i f_i^{(\text{Yield})} (N_{F,i}, I_{W,i}) Y_i}{\sum_{i=1}^I A_i I_{W,i} \mu} \quad (13)$$

式中 $IWUE$ ——水利用效率目标函数, kg/m³

μ ——灌溉区与种植区面积比例

(4) 氮肥利用效率最大化

氮肥利用效率也称氮肥偏生产力, 是水稻产量与施氮量比值^[5], 该目标函数通过氮肥利用效率最大化角度对水稻水肥资源和种植面积进行优化配置与调整, 以节约氮肥资源, 从而抑制温室气体排放, 起到环境保护作用, 表达式为

$$\max P_{CEK} = \frac{\sum_{i=1}^I A_i f_i^{(\text{Yield})} (N_{F,i}, I_{W,i}) Y_i}{\sum_{i=1}^I A_i N_{F,i}} \quad (14)$$

式中 P_{CEK} ——氮肥利用效率目标函数, %

1.3.2 约束条件

(1) 供水约束

供水约束反映各地区在灌溉过程中消耗的水量不应超过各地区水资源总供给量, 包括地表水和地下水供水约束。

地表水供水约束为

$$\sum_{i=1}^I I_{WS,i}^{(sur)} A_i \leq I_{SS,i} A_{TS,i} \quad (15)$$

地下水供水约束为

$$\sum_{i=1}^I I_{WG,i}^{(gro)} A_i \leq I_{SG,i} A_{TG,i} \quad (16)$$

式中 $I_{SS,i}$ 、 $I_{SG,i}$ ——各地区地表水、地下水总供水

量, m³

$A_{TS,i}$ 、 $A_{TG,i}$ ——各地区地表水、地下水利用效率

(2) 需水约束

需水约束反映各地区灌溉过程中消耗的水量应满足各地区中最低灌溉用水需求, 同时不能超过最大需水要求, 即

$$I_{R,imin} \leq I_{WS,i}^{(sur)} + I_{WG,i}^{(gro)} \leq I_{R,imax} \quad (17)$$

式中 $I_{R,imin}$ 、 $I_{R,imax}$ ——最低、最高灌溉需水量, m³/hm²

(3) 面积约束

面积约束反映各地区水稻种植面积不能超过各地区要求的最大和最小面积, 即

$$A_{imin} \leq A_i \leq A_{imax} \quad (18)$$

式中 A_{imin} 、 A_{imax} ——最小、最大种植面积, hm²

(4) 化肥利用量约束

化肥利用量约束反映在各个分区的氮肥使用量应低于规定的用量上限, 即

$$\sum_{i=1}^I N_{F,i} A_i \leq N_{Fmax} \quad (19)$$

式中 N_{Fmax} ——最大氮肥施用量, kg

(5) 碳排放量约束

碳排放量约束反映各地区的环境碳排放量应不超过环境限制的最大温室气体排放量, 即

$$\sum_{i=1}^I I_{G,i} \leq I_{Gmax} \quad (20)$$

式中 I_{Gmax} ——环境中限制的最大温室气体排放量, kg

(6) 粮食安全约束

粮食安全约束反映各地区粮食产量应高于该地区人口粮食最低供应量, 即

$$\sum_{i=1}^I A_i f_i^{(\text{Yield})} (N_{F,i}, I_{W,i}) \geq M_i M_{0min} \quad (21)$$

式中 M_i ——各地区人口数量, 人

M_{0min} ——人均水稻最小需求量, kg/人

(7) 非负约束

非负约束反映模型中的所有决策变量(灌溉水量、氮肥用量、种植面积)应满足变量非负的现实物理意义, 即

$$\begin{cases} I_{w,i} \geq 0 \\ N_{F,i} \geq 0 \\ A_i \geq 0 \end{cases} \quad (22)$$

以上多目标非线性规划模型采用基于模糊数学规划 Zimmerman 算法^[16]进行求解。

1.4 数据来源

利用 Meta 分析法评价黑龙江省不同灌溉量和施肥量对水稻产量、温室气体排放(CH₄、N₂O、CO₂)的影响。数据通过 Web of Science、中国知网等中英文数据库输入检索词“水(或灌溉水)、肥料(或氮肥)、水肥耦合、水稻、产量、固碳减排、温室气体排放”等主题。共检索到 3 410 篇文献,进行筛选,首先去掉综述类、新闻、会议论文和荟萃分析文献,其次通过文献的标题和摘要筛选,最后通过文献内容筛选出 33 篇文献,共 119 组观测数据集,其中中文文献 26 篇,英文文献 7 篇。选择基于黑龙江省水稻作物产量和温室气体排放田间试验的研究文献进行 Meta 分析。文献中的表格数据可以直接提取,图形数据使用 Getdata 软件提取。对符合标准的文献提取关键信息,包括:①作者姓名、试验年限、试验地点。②灌溉方式、灌溉水量、氮肥施用量。③试验重复数。④响应变量的均值和标准差(水稻产量和温室气体排放量)。

经济效益参数包括影响水稻产量的水肥生产函数,该函数的拟合需根据搜集的大田试验数据和 Meta 分析的整合数据。大田试验数据包括控制灌溉和常规淹灌两种灌溉方式和不同施氮水平,拟合系数为 $a = -1.3049, c = 0.049, d = -0.000206,$

$C = 0.99$ 。根据回归分析,拟合决定系数 R^2 为 0.81,拟合效果较好。其他参数包括水稻市场单价、单位面积产量、种植总成本包括种子(19.5 元/hm²)、农药(27.6 元/hm²)、氮肥(296.7 元/hm²)、农膜(12.5 元/hm²)、农机柴油(7.13 元/hm²)、排灌(794.45 元/hm²)和人工成本(1 361.4 元/hm²),主要来源于《黑龙江省统计年鉴》、《黑龙江省水资源公报》、《全国农产品成本收益资料汇编》。环境相关数据主要包括温室气体排放系数和农资投入量,其中碳排放系数(包括农药(12.47 kg/kg)、肥料(决策变量)(2.3 kg/kg)、柴油(2.9 kg/kg)、农膜(22.7 kg/kg)、电力(0.92 kg/kg))和与之相对应的主要单位面积碳源。其他温室气体排放系数包括 CH₄ 排放系数、肥料 N₂O 排放系数、作物本底 N₂O 排放系数。灌溉水利用效率目标函数涉及的参数包括灌溉区与种植区面积比例。以上数据主要来源于规划报告和公开发表的文献。

1.5 数据处理

采用 Excel 2021 进行数据整理、分类;采用 RStudio 软件进行 Meta 分析;采用 DPS 软件统计数据拟合相关性、建立函数关系式,采用 Origin 2021 和 Arcgis 进行图形绘制;采用 Lingo 软件求解优化模型。

2 结果与分析

2.1 水肥对产量和温室气体的影响

由图 3 可知,控制灌溉和施氮量对水稻产量和温室气体排放量都呈现线性相关,且均在置信区间内分布,表明数据符合正态分布,发表偏倚很小。通过构建的模型可得到控制灌溉和施氮量对产量、

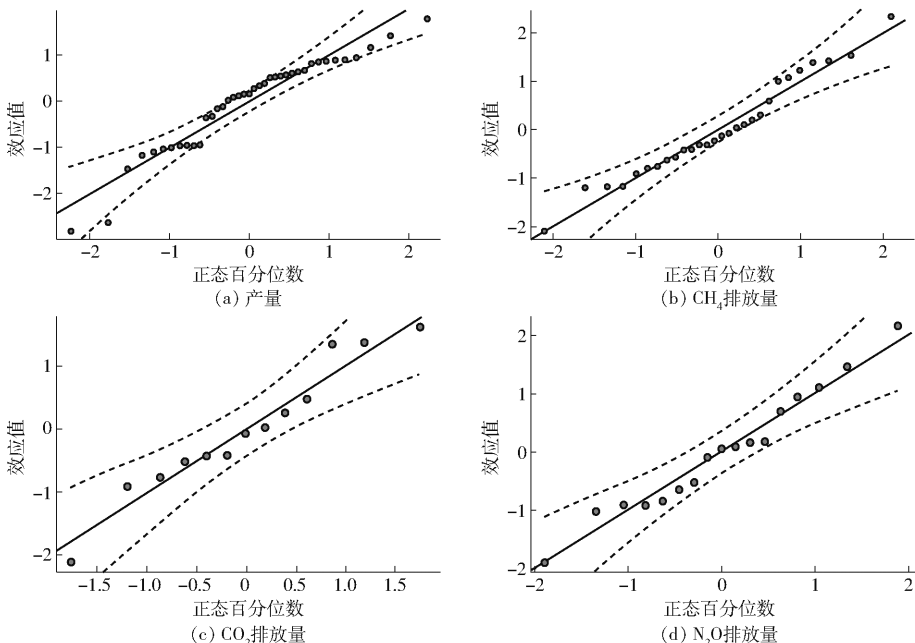


图3 灌溉量和施氮量的正态百分位图

Fig. 3 Normal quantile plots of irrigation and nitrogen application data

3种温室气体(CH_4 、 N_2O 、 CO_2)排放量的整合效应值及95%置信区间(图4),当置信区间与0交叉,表示控制灌溉和不同施氮量对产量等因素影响不显著,当置信区间在0的右侧,表示有增长趋势,反之则表示降低趋势。由表1可得到效应值相对应的增长率,表中数据为Meta分析使用的数据对数。由图4a可知,控制灌溉由于节约水资源量,在一定程度上会降低产量,但是不显著,增长率为 -0.99% (95%置信区间为 $-0.05 \sim 0.04$);与传统灌溉相比,控制灌溉能一定程度改变温室气体排放,表现为控制灌溉可显著降低 CH_4 温室气体排放量,增长率为 -40.5% (95%置信区间为 $-0.81 \sim -0.23$),但控制灌溉会在一定程度上增加 N_2O 和 CO_2 排放量,分别为 19.7% (95%置信区间为 $-0.11 \sim 0.48$)和 41.9% (95%置信区间为 $-0.15 \sim 0.86$)。由表2可知,灌溉量和施氮量对水稻产量的影响存在显著的相互耦合关系。控制灌溉下不同施氮量施加对黑龙江省稻田产量和温室气体排放产生的影响如图4b所示。与不施加氮肥相比,施加氮肥对产量的影响显著提高 40.49% (95%置信区间为 $0.28 \sim 0.39$);施加氮肥显著增加 CO_2 排放量 39.10% (95%置信区间为 $0.10 \sim 0.55$),施加氮肥显著增加 N_2O 排放量 56.8% (95%置信区间为 $0.31 \sim 0.60$),施加氮肥增加 CH_4 排放量 4.08% (95%置信区间为 $-0.06 \sim 0.14$)。

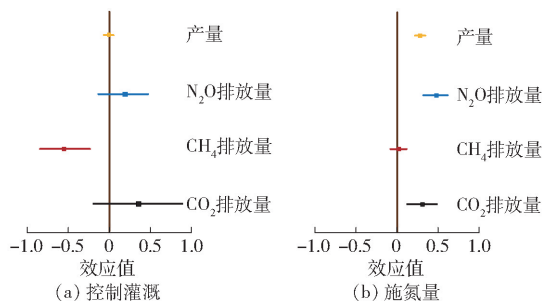


图4 控制灌溉和施氮量对影响因素的效应值

Fig. 4 Effect values of controlled irrigation and nitrogen amounts on affecting factors

表1 控制灌溉和不同施氮量对影响因素产生的变化效应

Tab. 1 Effects of controlled irrigation and different nitrogen amounts on influencing factors

试验组	影响因素	效应值	数据对数量	增长率/%
控制灌溉(CI)	产量	-0.01	21	-0.99
	N_2O 排放量	0.18	12	19.7
	CH_4 排放量	-0.52	15	-40.5
	CO_2 排放量	0.35	8	41.9
不同施氮量	产量	0.34	30	40.49
	N_2O 排放量	0.45	14	56.8
	CH_4 排放量	0.04	11	4.08
	CO_2 排放量	0.33	8	39.1

表2 水肥耦合对水稻产量影响的统计分析

Tab. 2 Statistical analysis of effect of fertilizer coupling on rice yield

影响因素	系数	估计值	标准差	T检验	P检验
产量	α	0.018 2	0.001	15.636	7.39×10^{-9} ***
	β_1	0.010	0.002	4.133	0.001 6 **

注:T检验和P检验是检验在控制灌溉因素基础上加入氮肥因素对水稻产量的异质性;***表示 $P < 0.001$,**表示 $0.001 < P < 0.01$ 。

2.2 水肥资源和种植面积优化

水稻种植中控制灌溉量会影响作物产量和温室气体排放。黑龙江省13个市(区)优化后的地表水和地下水的灌溉量以及地表水与地下水水量分配比例如图5所示,图中红色虚线表示水稻灌溉定额最优均值为 $4513.54 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,不同市(区)水稻灌溉水量分配情况不同,从哈尔滨市到大兴安岭地区依次比平均线高370、21、239、-294、-55、478、-510、-204、-91、110、4、247、-315 m^3/hm^2 ,其中齐齐哈尔市和黑河市灌溉定额最接近平均水平。水稻实际生长过程中灌溉需求量为 $4200 \sim 7200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,控制灌溉下,与实际情况相比水稻水量分配有所降低,达到节水效果。上述优化结果有助于了解黑龙江省13个市(区)水稻水量分配和种植面积情况,从而有助于不同地理分区下做出较优的水稻配水和种植面积决策。

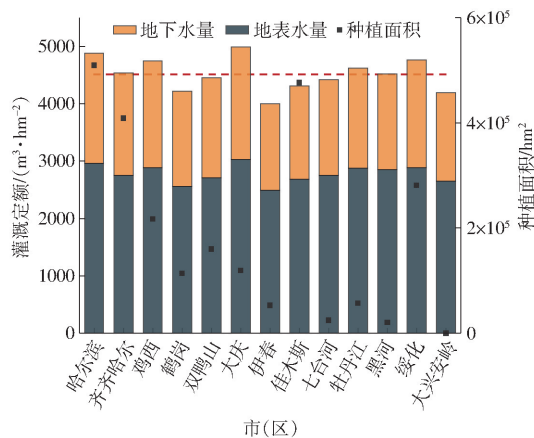


图5 黑龙江省不同地区水稻优化的地表水量、地下水量和种植面积

Fig. 5 Surface and groundwater allocation and acreage distribution of optimized rice in different regions of Heilongjiang Province

优化后的水稻在黑龙江省不同分区种植面积分布如图5所示。优化后水稻种植面积结果与实际面积情况趋势一致。优化后全省水稻种植面积较实际面积减少 $9.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。黑龙江省内分布在哈尔滨市、齐齐哈尔市和佳木斯市的水稻种植面积较大,分别为 5.097×10^5 、 4.089×10^5 、 $4.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 。其中齐

齐齐哈尔市水稻种植面积显著增加 $8.17 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 但佳木斯市水稻种植面积下降 $9.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 而大兴安岭市不种植水稻。

优化后黑龙江省水稻施氮量空间分布如图 6 所示。由图 6 可知, 黑龙江省施氮强度空间差异性较大, 其中中部地区施氮强度较强, 例如哈尔滨市、齐齐哈尔市、鸡西市、佳木斯市和绥化市水稻对氮肥需求量相对较高, 分别为 120、107、104、123、122 kg/hm^2 。优化后黑龙江省水稻施氮量均值为 $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 水稻实际生长需要的氮肥需求量为 $89.95 \sim 134.93 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 优化后施氮量符合水稻生长需求。优化后氮肥施用量显著减少, 氮肥利用率提高 32%, 水稻产量提高 4.48%, 经济效益提高 8.1%, 温室气体排放降低 10.6%, 有效缓解了稻田生产对环境的污染。优化后灌溉水量降低, 水利用效率提高 18.4%。

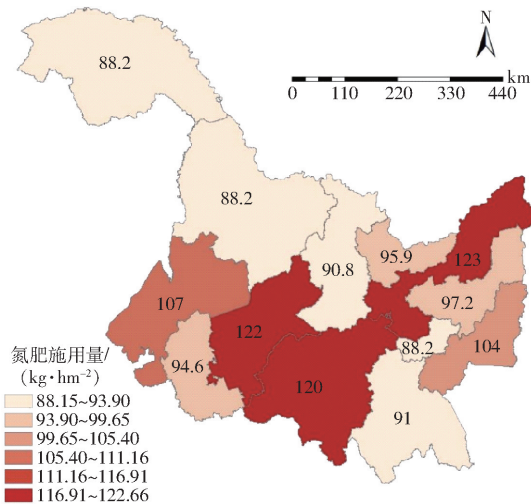


图 6 优化后水稻施氮量空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of optimized nitrogen application to rice

3 讨论

本研究利用 Meta 分析方法确定控制灌溉相比于传统淹灌以及氮肥施加对黑龙江省水稻产量、温室气体排放的影响。控制灌溉和施加氮肥均能显著增加温室气体 N_2O 和 CO_2 排放, 这与前人的研究一致^[32]。对于产量的变化, 控制灌溉对产量的影响不大, 而氮肥施加能显著提高水稻产量。控制灌溉可显著降低温室气体 CH_4 , 落干与覆水交替的土壤环境下通气情况有所改善, 从而减少温室气体 CH_4 排放, 这与前人研究一致^[33]。控制灌溉相对于传统淹

灌, 用水量减少 10.8%, 这与前人研究一致^[34], 所以控制灌溉是黑龙江省水稻种植可持续发展的有效措施。

本研究提出了一种基于 Meta 分析的多目标非线性优化模型。该模型旨在实现黑龙江省水稻水资源、氮肥资源优化配置和种植面积合理调整, 实现经济、环境和水肥资源利用效率的协同提升。本研究优化后全省平均水稻灌溉水量为 $4\,513.54 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 优化后全省种植面积呈降低趋势, 提高水肥利用效率, 降低温室气体排放。种植面积调整有利于从总量和效率两方面实现水肥资源的可持续利用, 缓解资源压力。合理规划种植面积可有效提高水利用效率, 优化后氮肥施加量在合理的施氮量范围内呈降低趋势, 防止过多氮量或土壤碳氮损失造成土壤肥力降低^[35]。该模型综合考虑经济效益、环境保护和水肥利用效率, 得出黑龙江省水稻最佳的水肥管理制度为采用控制灌溉和氮肥减施方式, 为黑龙江省水稻节水节肥生产提供理论参考。

本文耦合 Meta 分析与优化模型, 建立水肥生产函数, 优化决策黑龙江省水稻种植的水土肥资源利用。但本文只考虑了控制灌溉, 其他灌溉方式没有提及, 如干湿交替灌溉也会影响水稻生长, 能显著降低 CH_4 排放, 较大幅度增加 N_2O 排放^[36], 从而影响水稻产量。故今后研究中应考虑多种灌溉方式对水稻的影响。

4 结论

(1) 构建了一种基于 Meta 分析的多目标非线性优化模型, 基于该模型最终得到黑龙江省 13 个市(区)种植面积、灌溉水量和氮肥施用量的优化配置结果, 实现区域经济效益提高、碳排放量降低、水肥资源利用效率提高的多目标协同。

(2) 优化后分配的水土肥资源量减少, 全省水稻种植面积低于实际面积, 减少 $9.55 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 灌溉水量和氮肥施用量也呈减少趋势, 全省灌溉水量均值为 $4\,513.54 \text{ m}^3/\text{hm}^2$, 全省氮肥施用量均值为 $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 达到了有效节水节肥效果。

(3) 与实际相比, 优化后水和肥利用效率分别提高 18.4% 和 32%, 经济效益增加 8.1%, 温室气体排放降低 10.6%, 实现区域经济效益、碳排放、水肥资源利用效率相互协同、相互均衡, 获得了黑龙江省水稻种植资源可持续分配方案。

参 考 文 献

- [1] GROSS B L, ZHAO Z J. Archaeological and genetic insights into the origins of domesticated rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014, 111(17): 6190-6197.
- [2] 何振嘉, 范王涛, 杜宜春, 等. 基于土体有机重构的水肥耦合对土壤理化性质和稻产量的影响[J]. 中国农业科技导

- 报, 2022, 24(3): 176–185.
- HE Zhenjia, FAN Wangtao, DU Yichun, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the physical and chemical properties of rice soil and yield based on soil organic reconstruction[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(3): 176–185. (in Chinese)
- [3] WIN E P, WIN K K, BELLINGRATHKIMURA S D, et al. Influence of rice varieties, organic manure and water management on greenhouse gas emissions from paddy rice soils[J]. *Plos One*, 2022, 17(1): e0263554.
- [4] 武亚梅. 基于 Meta 分析和灌溉评价的中国冬小麦灌溉制度研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2019.
- WU Yamei. Irrigation managemnet for winter wheat in China based on Meta-analysis and irrigation evaluation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [5] 张忠学, 宋健, 齐智娟, 等. 控制灌溉氮肥减施对土壤氮素分布及氮素利用率的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(3): 42–49, 60.
- ZHANG Zhongxue, SONG Jian, QI Zhijuan, et al. Effects of reducing nitrogen fertilizer application on soil nitrogen distribution and nitrogen use efficiency under water-saving irrigation[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(3): 42–49, 60 (in Chinese)
- [6] 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 99–104.
- YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(11): 99–104. (in Chinese)
- [7] 周胜, 张鲜鲜, 王从, 等. 水分和秸秆管理减排稻田温室气体研究与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 852–862.
- ZHOU Sheng, ZHANG Xianxian, WANG Cong, et al. Research progress and prospects of water and crop residue managements to mitigate greenhouse gases emissions from paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 852–862. (in Chinese)
- [8] JI J, HOU H, LIU Y, et al. Effects of long-term fertilization on yield variation trend, yield stability and sustainability in the double cropping rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3): 607–619.
- [9] GUO J, ZHENG L, MA J, et al. Meta-analysis of the effect of subsurface irrigation on crop yield and water productivity[J]. *Sustainability*, 2023, 15(22): 15716.
- [10] ZHU Y P, ZHANG H P, LI R C, et al. Nitrogen fertigation affects crop yield, nitrogen loss and gaseous emissions; a Meta-analysis[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2023, 127(3): 359–373.
- [11] TONG X Y, WU P T, LIU X F, et al. A global Meta-analysis of fruit tree yield and water use efficiency under deficit irrigation[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 260: 107321.
- [12] KUANG W N, GAO X P, TENOTA M, et al. A global Meta-analysis of nitrous oxide emission from drip-irrigated cropping system[J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(14): 3244–3256.
- [13] 张玲椿, 张馨月, 高强, 等. 基于 Meta 分析的我国华北地区氮肥施用对玉米增产效应研究[J]. *四川农业大学学报*, 2022, 40(4): 550–557.
- ZHANG Lingchun, ZHANG Xinyue, GAO Qiang, et al. Study on the effect of nitrogen fertilizer application on maize yield in North China based on Meta-analysis[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2022, 40(4): 550–557. (in Chinese)
- [14] 崔弼峰. 基于鲁棒优化方法的灌区水资源实时优化配置研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2023.
- CUI Bifeng. Research on real-time optimal allocation of water resources in irrigation area based on robust optimization method[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023. (in Chinese)
- [15] TANG X Y, HE Y, QI P, et al. A new multi-objective optimization model of water resources considering fairness and water shortage risk[J]. *Water*, 2021, 13(19): 18.
- [16] 李茱, 刘武元, 付强, 等. 基于供水不确定性的灌区农业水资源多层多目标协同调控[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(8): 20–29.
- LI Mo, LIU Wuyuan, FU Qiang, et al. Multi-layer and multi-objective coordinated regulation of agricultural water resources in irrigation districts with water supply uncertainties considered[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 20–29. (in Chinese)
- [17] 李茱, 曹凯华, 付强, 等. 不确定条件下考虑水循环过程的灌区多水源高效配置[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(18): 62–73.
- LI Mo, CAO Kaihua, FU Qiang, et al. Efficient allocation of multiple water sources in irrigation areas considering water cycle process under uncertainty[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(18): 62–73. (in Chinese)
- [18] TIAN S, XU Y, WANG Q S, et al. The effect of optimizing chemical fertilizers consumption structure to promote environmental protection, crop yield and reduce greenhouse gases emission in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 12.
- [19] 谷晓博, 宋慧, 白东萍, 等. 优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(11): 56–65.
- GU Xiaobo, SONG Hui, BAI Dongping, et al. Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(11): 56–65. (in Chinese)
- [20] VAHAMIDIS P, STEFOPOULOU A, KOTOULAS V. Optimizing sustainability in malting barley: a practical approach to nitrogen management for enhanced environmental, agronomic, and economic benefits[J]. *Agriculture*, 2023, 13(12): 2272.
- [21] 崔思梦, 吴梦洋, 王小军, 等. 基于水足迹与水-能源-粮食关联关系的提水灌溉系统种植结构优化[J]. *水利学报*, 2023, 54(8): 967–977.
- CUI Simeng, WU Mengyang, WANG Xiaojun, et al. Optimization of planting structure in pumping irrigation system based on water footprint and water-energy-grain nexus[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2023, 54(8): 967–977. (in Chinese)
- [22] 张红梅, 宋戈, 姚双双. 粮食种植结构视角下东北黑土区耕地利用结构调控研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(3):

- 198 - 209.
- ZHANG Hongmei, SONG Ge, YAO Shuangshuang. Regulation of cultivated land use structure in black soil region of Northeast China based on perspective of grain planting structure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 198 - 209. (in Chinese)
- [23] 赵丹. 黑龙江省农业水土资源系统脆弱性测度及种植结构调控优化[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- ZHAO Dan. Vulnerability evaluation and planting structure regulation and optimization of agricultural soil and water resources system in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [24] LUO J M, ZHANG H M, QI Y Q, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing - Tianjin - Hebei region, China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 262: 13.
- [25] 徐永清, 刘赫男, 刘春生, 等. 黑龙江省 2011—2020 年水稻播种面积和产量变化及主要气象灾害易发区研究[J]. 江西农业学报, 2023, 35(6): 218 - 224.
- XU Yongqing, LIU He'nan, LIU Chunsheng, et al. Research on changes of rice planting area, yield and main meteorological disaster prone areas in Heilongjiang Province from 2011 to 2020 [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 35(6): 218 - 224. (in Chinese)
- [26] 刘海林. 黑龙江省粮食主产区地下水管理与保护建议[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(2): 176, 221.
- [27] 赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1471 - 1482.
- ZHAO Xueyan, LIU Jianghua, WANG Rong, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1471 - 1482. (in Chinese)
- [28] WEI Q, CHUNSHENG H, OENE O. Soil mulching significantly enhances yields and water and nitrogen use efficiencies of maize and wheat; a Meta-analysis[J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 16210.
- [29] 李长卓. 基于 Meta 分析研究不同耕作方式对麦田 N_2O 排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
- LI Changzhuo. Effect of different tillage methods on N_2O emissions from wheat fields based on Meta-analysis[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [30] 于海洋, 张广斌, 马静, 等. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放对大气 CO_2 浓度升高响应的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(3): 458 - 467.
- YU Haiyang, ZHANG Guangbin, MA Jing, et al. Response of CH_4 and N_2O emissions to elevated atmospheric CO_2 concentration from rice fields: a review[J]. Soils, 2021, 53(3): 458 - 467. (in Chinese)
- [31] WANG G, LIANG Y, ZHANG Q, et al. Mitigated CH_4 and N_2O emissions and improved irrigation water use efficiency in winter wheat field with surface drip irrigation in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 163: 403 - 407.
- [32] 李铁成, 张忠学, 张作合, 等. 减施氮肥对节水灌溉稻田 NH_3 、 N_2O 排放与氮肥利用的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 348 - 355.
- LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction under water-saving irrigation on NH_3 、 N_2O emissions and absorption of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 348 - 355. (in Chinese)
- [33] 张忠学, 余佩哲, 杜思澄, 等. 不同水氮管理模式下黑土稻田碳固定与碳减排效应分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 366 - 375.
- ZHANG Zhongxue, YU Peizhe, DU Sicheng, et al. Carbon fixation and carbon emission reduction effects of different water and nitrogen management modes in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 366 - 375. (in Chinese)
- [34] 王光耀, 刘巍, 雷波, 等. 不同节水灌溉方式下的黑龙江省水稻节水减排潜力评估[J]. 节水灌溉, 2023(11): 34 - 38.
- WANG Guangyao, LIU Wei, LEI Bo, et al. Evaluation of water saving and emission reduction potential of rice in Heilongjiang Province under different water-saving irrigation methods[J]. Water Saving Irrigation, 2023(11): 34 - 38. (in Chinese)
- [35] 尹思佳, 李慧, 徐志强, 等. 东北典型黑土区旱地耕层土壤肥力指标的纬度变化特征及其关系[J]. 中国农业科学, 2021, 54(10): 2132 - 2141.
- YIN Sijia, LI Hui, XU Zhiqiang, et al. Spatial variations and relationships of topsoil fertility indices of drylands in the typical black soil region of Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(10): 2132 - 2141. (in Chinese)
- [36] 张鲜鲜, 周胜, 孙会峰, 等. 干湿交替灌溉对水稻生产和温室气体减排影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2020, 39(11): 3873 - 3880.
- ZHANG Xianxian, ZHOU Sheng, SUN Huifeng, et al. Impacts of alternate wetting and drying irrigation on rice production and the mitigation of greenhouse gas emission in paddy fields[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(11): 3873 - 3880. (in Chinese)