中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

华北平原多目标约束下冬小麦最优施氮量

代　娜，史文娇，石晓丽

Optimal nitrogen application rate for winter wheat under multi-objective constraints in the North China Plain

DAI Na, SHI Wenjiao, and SHI Xiaoli

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210107

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水压采区冬小麦种植综合效应探讨

Evaluating the comprehensive effects of planting winter wheat in the groundwater depletion regions in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(5): 724–733

北平原典型冬小麦农田生态系统能量平衡与闭合研究

Energy balance and closure of typical winter wheat farmland ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(10): 1413–1422

基于HYDRUS模型的华北平原小麦种植区水盐运移模拟

Water and salt transport simulation in the wheat growing area of the North China Plain based on HYDRUS model

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(6): 1085–1094

华北平原氮肥周年深施对冬小麦–夏玉米轮作体系土壤氨挥发的影响

The effects of deep application of nitrogen fertilization on ammonia volatilization in a winter wheat/summer maize rotation system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(12): 1880–1889

华北平原种植结构变化对农业需水的影响

Impact of planting structure changes on agricultural water requirement in North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(1): 8–16

华北平原农田生态系统碳过程与环境效应研究

Carbon processes and environmental effects on agro–ecosystem in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(10): 1515–1520

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 9 月 第 29 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2021, 29(9): 1512−1523

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210107

代娜, 史文娇, 石晓丽. 华北平原多目标约束下冬小麦最优施氮量 [J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(9): 1512−1523

DAI N, SHI W J, SHI X L. Optimal nitrogen application rate for winter wheat under multi-objective constraints in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1512−1523

华北平原多目标约束下冬小麦最优施氮量*

代 娜[1], 史文娇[2,3], 石晓丽[1**]

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院/河北省环境演变与生态建设实验室/河北省环境变化遥感识别技术创新中心 石家庄 050024; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所/中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100049)

摘 要: 农田氮素管理不当导致水体污染、土壤结构破坏和全球变暖等环境问题。从经济与生态环境各方面探讨华北平原冬小麦的最优施氮量可为粮食生产及区域农业生态保护提供重要的科学参考。本文利用华北平原 9 个站点 1981—2017 年的逐日气象数据及冬小麦物候和产量观测资料, 借助 CERES-Wheat 模型, 基于 5 个约束指标 (产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡和环境-经济效益) 和施氮量的关系曲线, 揭示华北平原冬小麦在不同约束条件下的最优施氮量。结果表明: 华北平原各站点基于不同目标约束所得的最优施氮量有所不同, 其大小顺序为氮素吸收>产量>环境-经济效益>增产-节氮权衡>氮肥偏生产力, 且各地区最优施氮量的参考值也存在一定的空间差异。通过对粮食安全与生态友好的综合考量, 本研究认为增产-节氮权衡和环境-经济效益约束条件下的最优施氮量能够实现经济效益和生态效益的统一, 是较合理的区域施氮参考, 该条件下最优施氮量分别为 173 kg·hm^{-2} 和 190 kg·hm^{-2}, 比当前华北平原农民实际施氮水平分别减少约 47% 和 42%, 可以作为冬小麦种植施氮的区域参考值。该目标约束下最优施氮量的低值主要分布在 II 区和IV区, 分别为 150 kg·hm^{-2} 和 170 kg·hm^{-2}, I 区和III区则相对较高, 最优施氮量分别为 200 kg·hm^{-2} 和 225 kg·hm^{-2}, 原因可能在于长期施氮降低土壤有机碳含量, 进而影响土壤供氮能力。

关键词: 华北平原; CERES-Wheat 模型; 冬小麦; 农业生态环境; 最优施氮量; 多目标约束

中图分类号: S365 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Optimal nitrogen application rate for winter wheat under multi-objective constraints in the North China Plain*

DAI Na[1], SHI Wenjiao[2,3], SHI Xiaoli[1**]

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University / Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction / Hebei Technology Innovation Center for Remote Sensing Identification of Environmental Change, Shijiazhuang 050024, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences / Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* 国家自然科学基金项目 (41771111)、河北省自然科学基金 (D2019205123, D2020205009)、中国科学院战略性先导科技专项 (XDA23100202)、中国科学院青年创新促进会 (会员号: 2018071) 和河北师范大学科研基金 (L052018Z09) 资助

** 通信作者: 石晓丽, 研究方向为气候变化与区域农业。E-mail: shixiaoli_2004@163.com
代娜, 研究方向为气候变化与区域农业。E-mail: daina1569841381@163.com

收稿日期: 2021-03-01 接受日期: 2021-05-28

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771111), the Natural Science Foundation of Hebei Province (D2019205123, D2020205009), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA23100202), the Youth Innovation Promotion Association, Chinese Academy of Sciences (2018071), and the Research Fund Project of Hebei Normal University (L052018Z09).

** Corresponding author, E-mail: shixiaoli_2004@163.com

Received Mar. 1, 2021; accepted May 28, 2021

Abstract: The oversupply of nitrogen fertilizers has caused serious environmental problems, such as water pollution, destruction of soil structure, and global warming. Thus, the optimal nitrogen application rate of winter wheat should consider the environmental impacts. Many attempts have been made to evaluate the optimal winter wheat nitrogen application rate using different indicators, such as yield, nitrogen use efficiency, and nitrogen uptake. However, previous studies have only focused on economic benefits and did not consider the ecological benefits. Furthermore, the optimal nitrogen application rates have been evaluated with individual indicators; a systematic approach that integrates these indicators has not yet been presented. To better understand the optimal nitrogen application rate for winter wheat under multi-objective constraints in the North China Plain, this study used the daily meteorological data, observation data of the phenology, and the yield of winter wheat at nine stations (Tangshan, Huanghua, Luancheng, Huimin, Nangong, Ganyu, Shangqiu, Zhumadian, and Shouxian) from 1981 to 2017, to simulate five indicators of the economic and environmental benefits of the winter wheat (yield, nitrogen partial factor productivity, nitrogen uptake, the balance between yield increase and nitrogen saving, and environmental-economic benefits) by using the crop estimation through resource and environment synthesis (CERES)-Wheat model. The relationship between each indicator and the nitrogen application rate was investigated to determine the optimal nitrogen application rates under different constraints. Finally, the comprehensive optimal nitrogen application rate was determined according to the economic and ecological benefits. The results indicated that the optimal nitrogen application rates varied across stations and objective constraints. The average value of the optimal nitrogen application rate for the nine stations from high to low were that constrained by nitrogen uptake (363 kg·hm^{-2}), yield (257 kg·hm^{-2}), environment-economic benefits (190 kg·hm^{-2}), the balance between yield increase and nitrogen saving (173 kg·hm^{-2}) and nitrogen partial factor productivity (30 kg·hm^{-2}). The optimal nitrogen application rates under the constraints of the balance between yield increase and nitrogen-saving and environmental-economic benefits were 173 kg·hm^{-2} and 190 kg·hm^{-2}, respectively. This indicates a reduction by approximately 20%−30% of the nitrogen application rates for constraints related to yield maximization, and reductions by 47% and 42% compared to the actual nitrogen application rates of farmers in the North China Plain. Thus, the environmental damage caused by nitrogen fertilizers can be minimized under these constraints. Meanwhile, approximately 90% of the wheat yield can be obtained with these optimal nitrogen application rates, and economic and ecological benefits can be simultaneously guaranteed. To secure grain production and minimize environmental impacts, the optimal nitrogen application rates under the constraints of the balance between yield increase and nitrogen-saving and environmental-economic benefits can be regarded as the regional reference for winter wheat planting in the North China Plain. The regional reference of the optimal nitrogen application rates for winter wheat varied with zones, it was 150 kg·hm^{-2} in the piedmont plains of Taihang Mountain and Yanshan Mountain, and 170 kg·hm^{-2} in the Nanyang Basin. For the winter wheat in the Shandong Peninsula and the plains around Bohai Sea, the optimal nitrogen application rate was higher (200 kg·hm^{-2}), and in the Haihe Plain, the optimal nitrogen application rate was 225 kg·hm^{-2}.

Keywords: North China Plain; CERES-Wheat model; Winter wheat; Agricultural ecological environment; Optimal nitrogen application rate; Multi-objective constraints

粮食安全是全人类共同面对的问题之一, 由于耕地面积有限, 提高作物单产成为应对日益增长的粮食需求的重要途径[1]。作为作物生长所必需的元素, 氮肥的施用使得发达国家和发展中国家粮食产量分别增加了 40% 和 55%[2-3], 对全球农业生产至关重要。但是, 作物产量并不会随氮肥的增加无限增长[4], 氮肥利用率也会随着施氮量的增加逐渐下降[5-6], 过量的氮肥投入还会带来诸多环境问题[7-9]。因此, 有必要将农业生产中的氮肥投入最优化, 以保障粮食安全的同时最大限度地降低农业对生态环境的破坏。

关于最优施氮量的衡量指标, 作物产量最为常用。例如, 马登科等[10] 认为黄土高原东南部和西北部冬小麦 (*Triticum aestivum*) 高产目标下的合理施氮量分别为 227 kg·hm^{-2} 和 212 kg·hm^{-2}。刘建刚等[11] 利用 DSSAT 模型 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) 分析了河北省吴桥地区冬小麦不同氮肥管理水平下的产量, 认为 222 kg·hm^{-2} 为该地区的最优施氮量, 此时最大可获得产量为 7618 kg·hm^{-2}。产量指标清晰直观, 直接关系到农民的切身利益, 在实际种植过程中, 农民为了追求产量最大化, 通常根据经验确定氮肥投入量, 缺乏科学标准, 容易过量施氮。此外, 该指标没有考虑作物对氮素的吸收和利用情况。当作物体内氮素吸收达到饱和后, 继续施加则会造成氮肥流失和环境污染[12-13]。因此有学者结合产量、氮素吸收与氮肥利用指标衡量区域作物最优施氮量。例如吴强等[14] 通过田间试验分析, 基于产量、氮肥利用效率和植株吸氮量, 得出河套灌区小麦最优施氮量介于 185.5~240.9 kg·hm^{-2}。沙之敏等[15] 分析了最佳养分管理对华北冬小麦产量、养分吸收和肥料利用的影响。较单一产量指标而言, 该方法考虑了氮肥的投入、吸收以及产出情况, 指标更加多样化; 同时, 氮肥利用率、植株吸氮量可以分别通过产量、施氮量计算和取样分析来实现, 操

作性强。但是最优施氮量的衡量仍基于单一指标, 没有考虑指标间的耦合效应。鉴于此, 有研究基于产量增长与氮肥损失的权衡关系, 寻找两者达到平衡时的最优施氮量。例如, 基于 APSIM 模型 (Agricultural Production System Simulator), Bai 等[16]认为 390~420 kg·hm^{-2} 是江苏和安徽水稻 (*Oryza sativa*)-小麦轮作系统平衡产量增长与氮素损失的最优施氮量。该方法综合考虑了两种指标耦合作用下的最优施氮量, 较单独考虑产量、氮素吸收和氮肥利用下的最优施氮量更为全面。另外, 指标所涉及的氮素损失除应用模型模拟获得之外, 还可通过传统经验公式根据施氮量来计算, 方便易行。但是, 该方法对氮肥施用带来的环境影响关注不多。随着环境风险的增加, 施氮所产生的氮排放也应成为确定区域冬小麦最优施氮量的重要参考指标。此外, 氮排放带来的环境问题也可以转化为经济问题, 因为治理由此带来的环境问题会消耗大量资源。但在评价区域最优施氮量的问题上, 多目标耦合且同时考虑经济收益与农业生态环境的研究还相对较少。

探讨作物最优施氮量的方法主要有田间试验法与模型法。田间试验法主要依据研究目的设定作物品种和田间管理措施, 根据实测数据进行最优施氮量的计算。例如, 陈天鑫等[17]根据田间地块试验, 分析了多种施氮条件下冬小麦的光合生理指标及产量差异, 确定了冬小麦的最优施氮水平。田间试验法可控制特定环境条件且数据准确, 但是工作量大, 且现有技术难以通过现场实时监测所有的环境因子, 因此在大面积应用方面比较困难。借助一些基于过程的化学模型如反硝化分解模型 (Denitrification-Decomposition, DNDC) 和作物模型 (如 DSSAT、APSIM) 来研究作物最优施氮量也是一种较为普遍的方法。例如, Xin 等[18]应用 APSIM 模型, 模拟了华北平原冬小麦的最优施氮量。刘建超等[19]应用 CERES-Wheat 模型模拟了不同水氮管理对关中地区冬小麦产量和品质的影响。成林等[20]利用 CERES-Wheat 模型研究了主要生育期的气候变化对河南省冬小麦生长与产量的影响。相对而言, 模型法对详细精确的田间管理数据和土壤数据的获取较为困难, 但在很大程度上弥补了传统田间试验方法需要实时监测的弊端, 在区域应用方面有较好的表现。CERES-Wheat 模型是当前应用最广泛的作物模型 DSSAT 集成的小麦模型, 能够很好地为农业生产提供决策支持。

华北平原是我国冬小麦主产区之一, 长期以来该地区农业生产都存在着较严重的过度施肥问题, 当地占主导地位的冬小麦-夏玉米 (*Zea mays*) 一年两熟制的氮肥投入高达 600 kg·hm^{-2}, 氮肥利用效率却很低[18,21-22]。过度施肥不仅造成资源浪费和种植成本增加, 还引发了土壤结构破坏和水体富营养化等环境问题, 阻碍了当地农业种植的可持续发展。综合各项指标, 尤其是考虑环境影响的农业生态指标, 合理明确冬小麦种植的最优施氮量, 对保证华北平原粮食生产及保护当地农业生态环境意义重大。目前在探讨华北平原冬小麦施氮量的研究中, 多选取产量、经济效益等单一指标, 对农业生态环境考虑不多[11,16-17]。选取兼顾经济效益和环境效益的指标且通过多目标耦合评估冬小麦最优施氮量的研究还相对较少。作物最优施氮量的确定应同时考虑粮食安全和环境友好。除此之外, 相对于单一指标而言, 基于指标多样化和多目标耦合的研究能为确定区域最优施氮量提供更好的参考。

本研究应用 CERES-Wheat 模型, 选择了华北平原 9 个具有代表性的农业试验站点, 选取 5 个具有现实意义的指标 (产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡和环境-经济效益), 探讨了每个指标和施氮量的关系曲线; 明确不同目标约束下冬小麦最优施氮量, 为华北平原冬小麦种植过程中的氮肥投入提供科学的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于 32°~40°N, 114°~121°E, 面积 3×10^5 km^2, 行政上主要涵盖北京、天津、山东、河北和河南大部、安徽和江苏北部等地区, 地形以平原为主 (图 1)。气候类型为暖温带半湿润大陆性季风气候, 雨热同期。年平均温度 14~15 ℃, 年降水量 500~900 mm, 无霜期约 200 d, 热量资源和光照资源丰富。该地区以冬小麦-夏玉米一年两熟的种植模式为主, 小麦和玉米的产量分别占全国总产量的 45% 和 32%[23]。本文从华北平原各区域选取 9 个均匀分布、数据记录完整且具有代表性的农业试验站 (唐山站、黄骅站、栾城站、惠民站、南宫站、赣榆站、商丘站、驻马店和寿县站) 展开研究。

1.2 数据来源

逐日气象数据来自中国气象数据网 (http://data.cma.cn/), 选取与 9 个农业试验站相对应的气象站点 1981—2017 年日最高温、日最低温、降水量和日照时数等数据。其中太阳辐射利用埃斯屈朗 (Angstron) 经验公式根据日照时数计算而得。土壤数据

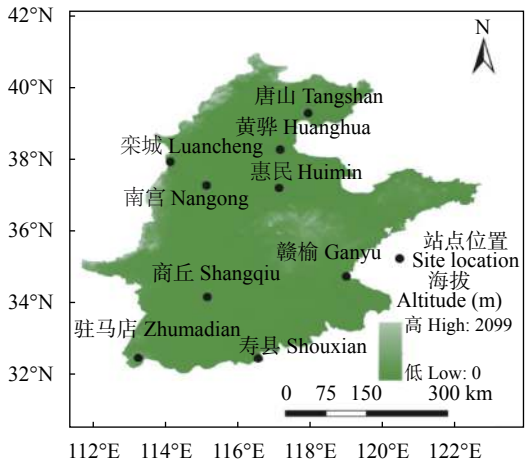

图 1　华北平原典型农业试验站分布图

Fig. 1　Location of the agricultural experimental stations in the North China Plain (NCP)

来自中国土壤科学数据库全国第 2 次土壤普查汇总成果 (http://vdb3.soil.csdb.cn/), 包括各农业试验站的土壤名称、颜色、土层深度、有机碳含量、土壤质地、全氮含量、容重和 pH 等, 其中有机碳含量通过土壤有机质乘以 0.58 换算系数得到[5]。

冬小麦生育期、产量及产量构成要素等作物数据以及冬小麦品种名称、播种、灌溉和施肥等田间管理措施均来自各农业试验站点的实测数据。

1.3　研究方法

1.3.1　模型运行与验证

DSSAT 模型由美国农业部组织研究开发, 是目前国际上广泛使用的作物模型之一。其中的 CERES-Wheat 模型是专为小麦类作物开发的较为成熟的子模型之一, 对土壤氮素平衡过程及其物理机制考虑较为完整。该模型已被验证能较好地模拟小麦的生长发育及产量形成过程, 同样也适用于国内小麦生产的评估[24]。利用 CERES-Wheat 模型模拟华北平原 9 个站点连续 36 年 (1982—2017 年) 不同施氮水平下 (0~390 kg·hm^{-2}, 每 30 kg·hm^{-2} 为一间隔梯度) 的冬小麦产量和氮肥利用情况以及氮肥投入所造成的环境影响, 以量化冬小麦种植在产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡、环境-经济效益等约束条件下的最优施氮量。

模型所需文件准备完毕后, 调试冬小麦各项遗传品种参数, 并对其结果进行验证。CERES-Wheat 模型中冬小麦共有 33 个作物参数, 包括 26 个生态型参数和 7 个品种型参数。其中对冬小麦生长发育最敏感的主要是其品种型参数。因此, 在参数“本地化”过程中主要以调整品种型参数为主。采用归一化均方根误差 (NRMSE) 评价模型模拟值和实际观测值的差异, 并使用一致性指数 (D 值) 来对模型模拟效果进行评估。计算公式如下:

$$\mathrm{NRMSE}=\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(S_i-R_i)/n}}{\overline{R}}\times 100\% \tag{1}$$

$$D=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i-R_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|S_i+\overline{R}\right|+\left|R_i-\overline{R}\right|\right)^2}\right] \tag{2}$$

式中: S_i 为模型模拟值; R_i 为实际观测值; $\overline{R}$为实际观测值的平均值; n 为模拟值的取样数量。通常认为, NRMSE<10%, 模拟效果极好; 10%<NRMSE<20%, 模拟效果较好; 20%<NRMSE<30%, 模拟效果一般; NRMSE>30%, 模拟效果较差。D 值越接近 1 说明模拟值与实际观测值的一致性越好。

1.3.2　指标选取及计算方法

研究分别设置产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡、环境-经济效益 5 个约束指标, 分别计算各指标 1982—2017 年的数值, 分析不同评价指标多年均值达到最优时所对应的最优施氮量, 将各站点的平均最优施氮量作为区域最优施氮量参考值。

1) 产量: 产量为不受水分、病虫害等因素限制、仅受施氮量影响的产量, 由模型模拟后直接输出。以作物产量随施氮量增加而变化的曲线趋于平稳时对应的施氮量作为以产量最大化为目标的最优施氮量; 产量变化趋势不明显的地区参考其产量增幅情况来确定最优施氮量。

2) 氮肥偏生产力: 氮肥偏生产力指单位氮投入所生产的作物产量, 是适合我国肥料效应评价的重要指标[25], 计算公式如下:

$$\mathrm{PFP_N}=\frac{Y}{N_{\mathrm{rate}}} \tag{3}$$

式中: $\mathrm{PFP_N}$ 为冬小麦氮肥偏生产力 [kg·kg^{-1}(N)], Y 为冬小麦产量 (kg·hm^{-2}), N_{rate} 为氮肥施用量 (kg·hm^{-2})。

3) 氮素吸收: 氮素吸收为冬小麦生育期的植株吸氮量, 由模型直接输出[23]。以氮素吸收随施氮量增加而变化的曲线趋于平稳时对应的施氮量作为以氮素吸收最大化为目标时的最优施氮量; 氮素吸收曲线未出现平稳趋势的地区暂不考虑。

4) 增产-节氮权衡: 增产-节氮权衡是综合考虑产量增长与氮素损失的最优施氮量。以每增施 1 单位的氮肥而增加的产量表示产量增长, 以每增施 1 单

位的氮肥而增加的氮损失量表示氮素损失, 氮素损失主要考虑氮淋溶和反硝化作用。对两者分别进行离差标准化后, 将两条曲线的交叉点作为以投入产出相平衡为目标的最优施氮量[16], 产量与氮素损失均由模型模拟输出。

5) 环境-经济效益: 环境-经济效益由作物种植的经济收入减去氮肥施用成本和氮排放所造成的污染处理成本计算得到。污染处理成本包括治理各种氮排放对生态系统、人类健康和气候变化所造成的破坏的平均成本[26]。氮肥施用的排放物包含氨气挥发、氮氧化物、氧化亚氮和氮淋溶 (表 1), 其中氨气挥发的计算方法参考 Chen 等[27-28] 的方法, 各种氮氧化物、氧化亚氮和氮淋溶由模型运行后直接输出。环境-经济效益计算公式如下:

$$E = Y \times P - \mathrm{FF} - C \quad (4)$$

式中: E 为环境-经济效益 (¥·hm^{-2}), Y 为冬小麦产量 (kg·hm^{-2}), P 为冬小麦价格 (¥·kg^{-1}), FF 为氮肥施用成本 (¥·hm^{-2}), C 为污染处理成本 (¥·hm^{-2})。

在特定的施氮量下, 冬小麦的环境-经济效益随施氮量的增加而增加, 但超过一定的阈值便开始下降, 将这个阈值定义为冬小麦在环境-经济效益约束下的最优施氮量。

表 1 氮肥施用过程排放物类型与污染处理成本[26-28]

Table 1 Types of emissions from the application of nitrogen fertilizer and pollution treatment costs[26-28]

排放物类型 Emission type	排放量计算方式 Formula model	处理成本 Treatment cost (¥·kg^{-1})
氨气 NH_3	−4.95+0.17×施氮量[27-28] −4.95+0.17×N application rate[27-28]	37.5
氮氧化物 NO_x	模型输出 Model output	29.6
氧化亚氮 N_2O	模型输出 Model output	83.7
氮淋溶 N leaching	模型输出 Model output	9.3

2 结果与分析

2.1 CERES-Wheat 模型模拟结果验证

CERES-Wheat 模型的模拟结果采用农业试验站冬小麦生育期和产量的实测数据进行验证 (图 2)。经对比, 华北平原各站点冬小麦开花期、成熟期和产量的模拟值与实测值有较好的相关性, 均匀分布于 1∶1 直线附近。冬小麦开花期、成熟期和产量的

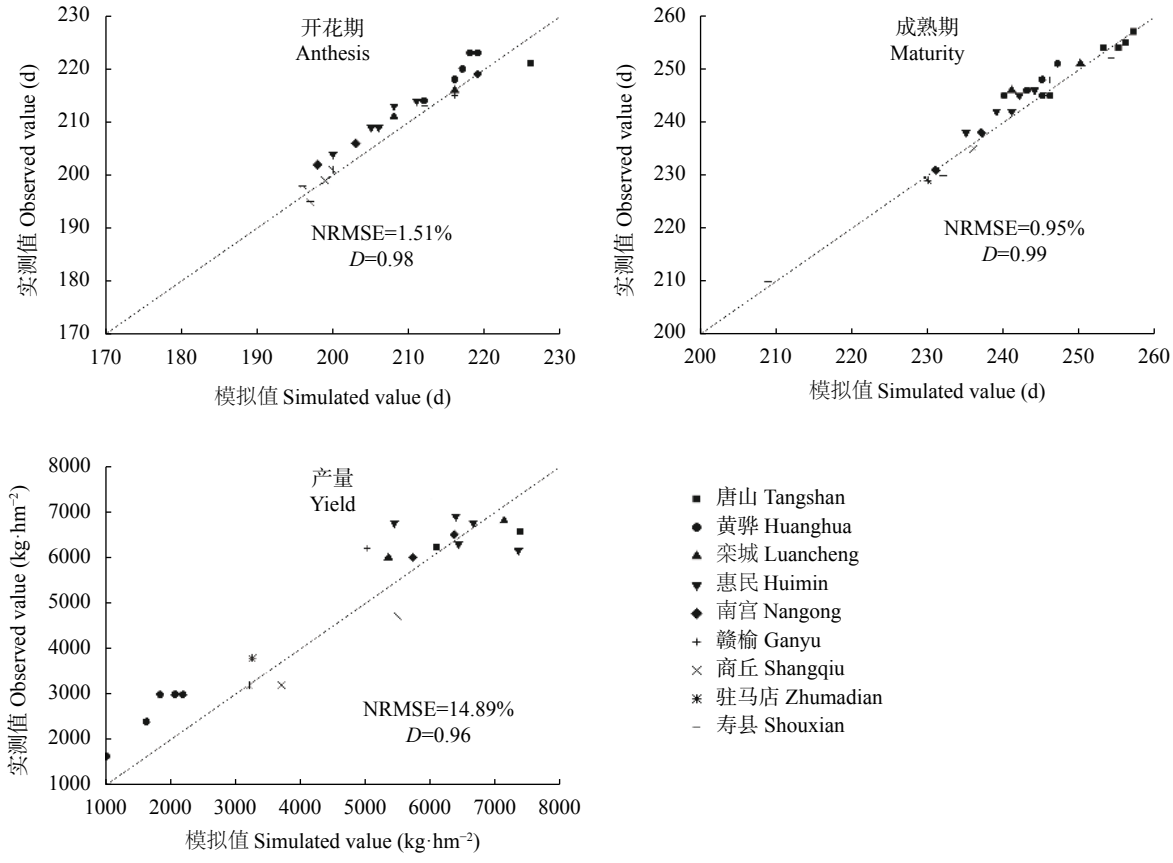

图 2 冬小麦开花期、成熟期和产量的 CERES-Wheat 模型模拟效果验证

Fig. 2 Validation of CERES-Wheat model simulation of anthesis, maturity stages and yield of winter wheat

归一化均方根误差 (NRMSE) 分别为 1.51%、0.95% 和 14.89%, 一致性指数 (D) 分别达 0.98、0.99 和 0.96, 表明经过参数校正后的 CERES-Wheat 模型能够较为准确地模拟华北平原冬小麦的生长发育及产量形成过程。

2.2　以冬小麦产量最大化为目标的最优施氮量

华北平原各站点冬小麦产量随着施氮量的增加逐渐增长, 但在施氮量达到一定水平时, 产量变化趋于平稳 (图 3)。说明在一定范围内施用氮肥能够促进冬小麦产量增加, 但由于边际报酬递减规律的存在, 氮肥投入过量对增产作用不大。以冬小麦产量最大化为目标, 唐山站和惠民站最优施氮量相对较低, 为 180 kg·hm^{-2}, 此时产量分别达 7808 kg·hm^{-2} 和 7287 kg·hm^{-2}; 赣榆站、驻马店站和寿县站的最优施氮量略高, 分别约为 210 kg·hm^{-2}、240 kg·hm^{-2} 和 270 kg·hm^{-2}, 能够分别达 7207 kg·hm^{-2}、5132 kg·hm^{-2} 和 8105 kg·hm^{-2} 的产量; 黄骅站、栾城站和南宫站的最优施氮量约为 300 kg·hm^{-2}, 此时 3 个站点能达到的最大产量分别为 6341 kg·hm^{-2}、7905 kg·hm^{-2} 和 10 100 kg·hm^{-2}; 商丘站冬小麦产量变化趋势不是特别明显, 最优施氮量为 9 站点最高 (330 kg·hm^{-2}), 此时其冬小麦产量为 7842 kg·hm^{-2}。

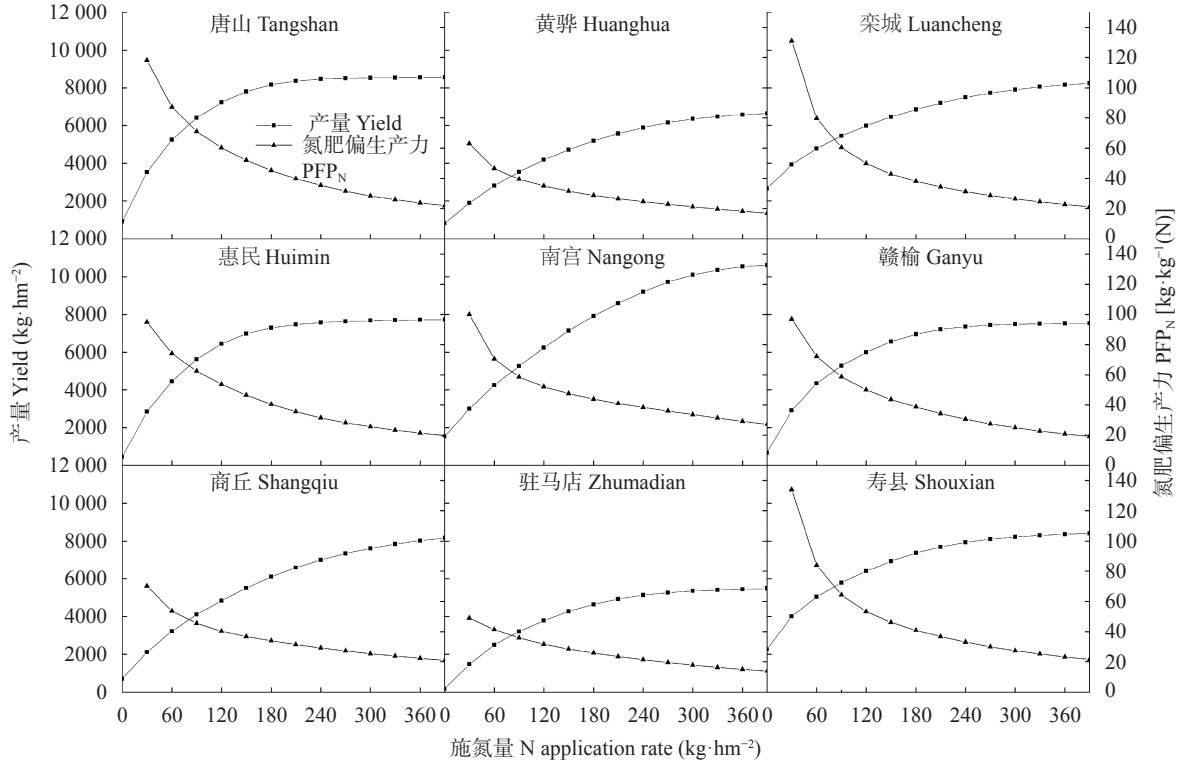

图 3　华北平原各站点冬小麦产量和氮肥偏生产力随施氮量的变化

Fig. 3　Changes in winter wheat yield and nitrogen partial factor productivity (PFP_N) with N application rates in the NCP stations

2.3　以冬小麦氮肥偏生产力最高为目标的最优施氮量

华北平原各站点氮肥偏生产力随着施氮量的增加迅速下降, 之后均稳定在较低水平 (图 3)。当氮肥投入从 30 kg·hm^{-2} 增加到 390 kg·hm^{-2} 时, 全区平均冬小麦氮肥偏生产力从最高的 95 kg·kg^{-1}(N) 下降至 20 kg·kg^{-1}(N)。以氮肥偏生产力最高为目标, 各站点的最优施氮量均为氮肥施用的最低值 (30 kg·hm^{-2}), 此时全区最高氮肥偏生产力平均值为 95 kg·kg^{-1}(N)。在 30 kg·hm^{-2} 的最优施氮量下, 栾城站与寿县站氮肥偏生产力较高, 分别为 131 kg·kg^{-1}(N) 和 134 kg·kg^{-1}(N)。驻马店站、黄骅站和商丘站均低于全区平均水平 [95 kg·kg^{-1}(N)], 分别为 49 kg·kg^{-1}(N)、63 kg·kg^{-1}(N) 和 70 kg·kg^{-1}(N)。较低的施氮量虽然能实现氮肥偏生产力的最大化, 但是氮肥投入过少难以实现当地冬小麦的生产潜力, 因此不能为了追求氮肥偏生产力的增加而一味地减少氮肥投入, 具体生产中应权衡氮肥施用与产量增加之间的关系。

2.4　以冬小麦氮素吸收最大化为目标的最优施氮量

华北平原大部分站点冬小麦氮素吸收随着施氮量的增加而增加, 之后趋于平缓。但部分地区 (栾城站、南宫站、商丘站) 冬小麦氮素吸收一直增加, 并未出现下降或平稳的趋势 (图 4), 因此这 3 个站点暂时不考虑以冬小麦氮素吸收最大化为目标的最优施

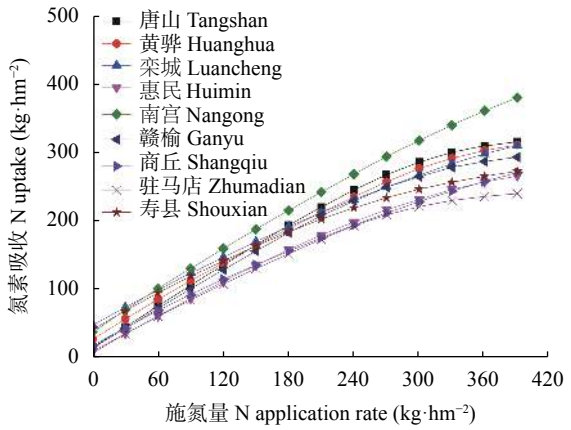

图 4 华北平原各站点冬小麦氮素吸收随施氮量的变化

Fig. 4 Changes in N uptake with N application rates of winter wheat in the NCP stations

氮量。以冬小麦氮素吸收最大化为目标, 各站点最优施氮量较高且差异比较小, 除栾城站、南宫站和商丘站之外, 唐山站、黄骅站、惠民站和寿县站的最优施氮量最高, 为 360 kg·hm^{-2}; 赣榆站和驻马店站最优施氮量次之 (330 kg·hm^{-2})。以氮素吸收最大化为目标的最优施氮量高于以最高产量为目标的最优施氮量, 表明冬小麦对氮素的吸收可能要大于其生长所需的氮吸收[12]。由于各站点冬小麦吸氮量都比较高, 因此在冬小麦实际种植过程中, 需综合其他指标来决定氮肥投入, 避免因氮肥施用过量造成浪费和环境污染。

2.5 以增产-节氮权衡最佳为目标的最优施氮量

以增产-节氮权衡最佳为目标的最优施氮量, 在保证获得较高产量的同时有效地节约氮肥且兼顾了区域生态效益, 使增产-节氮原本对立的两个目标达到平衡。若施氮量超过最优施氮量, 氮损失将随着施氮量的增长而大幅增加, 造成大量的氮肥浪费, 增加成本的同时对生态环境造成威胁; 若施氮量小于最优施氮量, 虽然在一定程度上节约了氮肥成本且对环境影响较小, 但难以通过氮肥施加实现当地冬小麦的产量潜力。华北平原各地区冬小麦产量增幅随施氮量的增加逐渐下降, 但是氮损失却迅速上升 (图 5)。以增产-节氮权衡最佳为目标, 唐山站和惠民站最优施氮量处于较低水平, 介于 120~150 kg·hm^{-2}; 栾城站、赣榆站、寿县站和驻马店站最优施氮量略高, 为 150~180 kg·hm^{-2} 左右; 黄骅站和商丘站最优施氮量为 180~210 kg·hm^{-2}; 南宫站的最优施氮量最高, 为 210~240 kg·hm^{-2}。

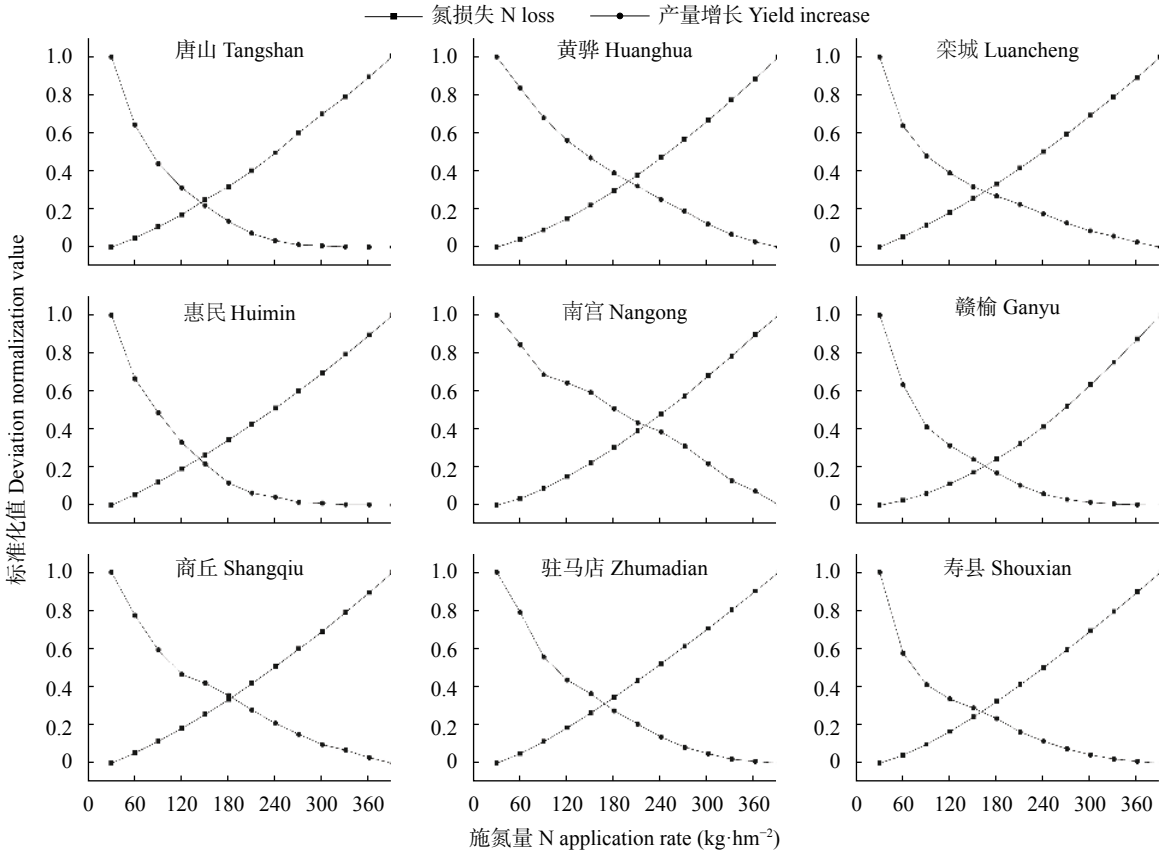

图 5 华北平原各站点冬小麦氮损失和产量增长随施氮量的变化 (氮损失、产量增长分别经过离差标准化)

Fig. 5 Changes in N loss and yield increase with N application rates of winter wheat in the NCP stations (N loss and yield increase were obtained from deviation normalization)

2.6　以环境-经济效益最高为目标的最优施氮量

华北平原各站点冬小麦环境-经济效益随施氮量的增加呈先增长后降低的趋势。施氮量为 0 时, 全区冬小麦平均环境-经济效益为 2399 ¥·hm^{-2}。此时各站点之间冬小麦环境-经济效益有所差别 (图 6)。栾城站、南宫站和寿县站效益相对较高, 分别为 5438 ¥·hm^{-2}、3250 ¥·hm^{-2} 和 4639 ¥·hm^{-2}; 其余站点效益均低于 2000 ¥·hm^{-2}, 其中驻马店站为全区效益最低的地区 (533 ¥·hm^{-2})。以环境-经济效益最高为目标, 南宫站最优施氮量最高 (300 kg·hm^{-2}), 此时其环境-经济效益为 15 751 ¥·hm^{-2}; 唐山站和黄骅站最优施氮量略低于南宫站 (210 kg·hm^{-2}), 二者的环境-经济效益分别为 14 448 ¥·hm^{-2} 和 7129 ¥·hm^{-2}; 赣榆站、商丘站和寿县站最优施氮量为 180 kg·hm^{-2}, 其环境-经济效益分别为 11 394 ¥·hm^{-2}、7273 ¥·hm^{-2} 和 11 137 ¥·hm^{-2}; 栾城站、惠民站和驻马店站最优施氮量最低 (150 kg·hm^{-2}), 此时其环境-经济效益分别为 9301 ¥·hm^{-2}、11 033 ¥·hm^{-2} 和 5285 ¥·hm^{-2}。

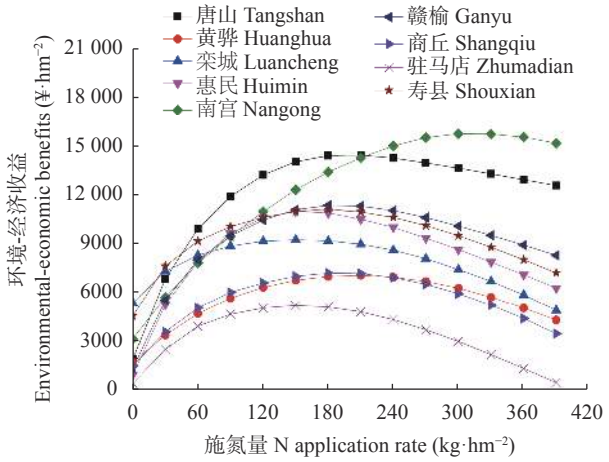

图 6　华北平原各站点冬小麦环境-经济效益随施氮量的变化

Fig. 6　Changes in environmental-economic benefits with N application rates of winter wheat in the NCP stations

2.7　华北平原不同约束条件的综合最优施氮量

基于产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡和环境-经济效益等不同目标约束下, 华北平原区域最优施氮量参考值存在空间差异 (图 7、图 8)。基于刘巽浩等[29] 根据种植业中作物类型、熟制等进行的中国农作制区划, 选择 4 个有研究站点分布的亚区 (图中的 Ⅰ 区、Ⅱ 区、Ⅲ 区、Ⅳ 区) 来阐明华北平原各指标约束下最优施氮量的空间特征 (图 9), 每个亚区的最优施氮量用区内研究站点的均值表示。Ⅴ 区没有研究站点, 暂时不考虑该区域最优施氮量的空间特征。

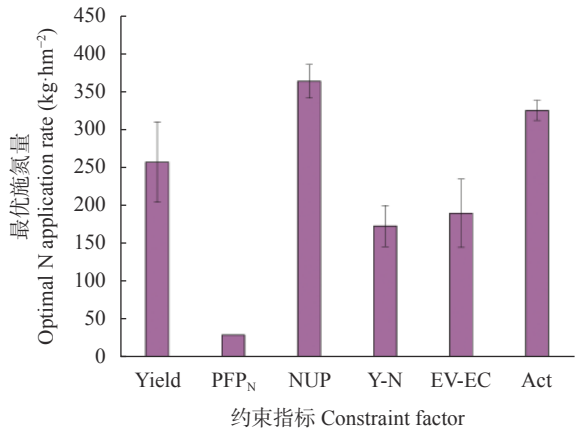

图 7　华北平原各指标约束下冬小麦最优施氮量

Fig. 7　Optimal N application rates under different constraints of winter wheat in the NCP

Yield: 产量; PFP$_N$: 氮肥偏生产力; NUP: 氮素吸收; Y-N: 增产-节氮权衡; EV-EC: 环境-经济效益; Act: 农户实际施氮量。PFP$_N$: nitrogen partial factor productivity; NUP: N uptake; Y-N: the balance of yield increase and nitrogen-saving; EV-EC: environmental-economic benefits; Act: actual nitrogen application of farmers.

各约束条件下最优施氮量顺序为氮素吸收>产量>环境-经济效益>增产-节氮权衡>氮肥偏生产力 (图 7)。以冬小麦氮素吸收最大化为目标的最优施氮量最高, 全区平均为 363 kg·hm^{-2}。该施氮量下, 产量平均可达 7882 kg·hm^{-2}, 但是氮肥偏生产力、增产-节氮权衡和环境-经济效益的表现均比较差 (图 8b, d, e)。其次是以产量最大化为目标, 各站点平均最优施氮量为 257 kg·hm^{-2}。相比于 363 kg·hm^{-2} 的氮肥投入, 该施氮量下, 产量保持在较高水平的同时, 增产-节氮权衡和环境-经济效益有一定的改善, 但氮肥偏生产力仍然处于较低水平 (图 8b)。此处需要说明的是, 以产量最大化为目标的最优施氮量是取产量随施氮量变化曲线趋于平稳的数值而并非绝对峰值, 此时若继续增加氮肥投入产量仍会有微弱的增加, 故以产量最大化为目标时所得产量的数值略小于以氮素吸收为目标的施氮量所得的产量数值, 但是二者相差无几, 可以将产量趋于平稳时的施氮量认为是以产量最大化为目标的最优施氮量。考虑环境成本的增产-节氮权衡目标和环境-经济效益目标下所得的最优施氮量相近, 全区平均值分别为 173 kg·hm^{-2} 和 190 kg·hm^{-2}, 此时可获得产量分别为 6624 kg·hm^{-2} 和 6848 kg·hm^{-2} (图 8a)。相比以氮素吸收和产量最大化为目标的施氮量, 该施氮量下所得产量虽有所下降, 但其余指标均有不同程度的改善, 尤其是增产-节氮权衡和环境-经济效益都能达到较优水平 (图 8d-e)。此处值得注意的是, 增产-节氮权衡与其他指标略有

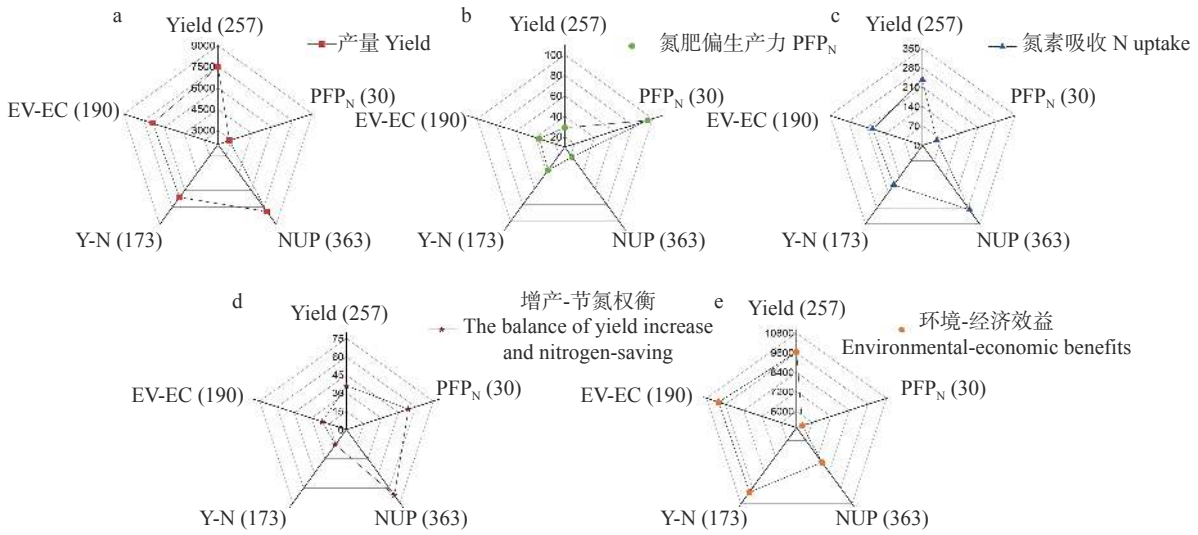

图 8　华北平原冬小麦最优施氮量下各约束指标的基本情况

Fig. 8　Conditions of each constraint indicator under the optimal N application rate of winter wheat in the NCP

Yield: 产量; PFP$_N$: 氮肥偏生产力; NUP: 氮素吸收; Y-N: 增产-节氮权衡; EV-EC: 环境-经济效益; Act: 农户实际施氮量。每个指标后括号内数据为最优施氮量。PFP$_N$: nitrogen partial factor productivity; NUP: N uptake; Y-N: the balance of yield increase and nitrogen-saving; EV-EC: environmental-economic benefits; Act: actual nitrogen application of farmers. The date in the bracket following the indicator is the optimal N application rate.

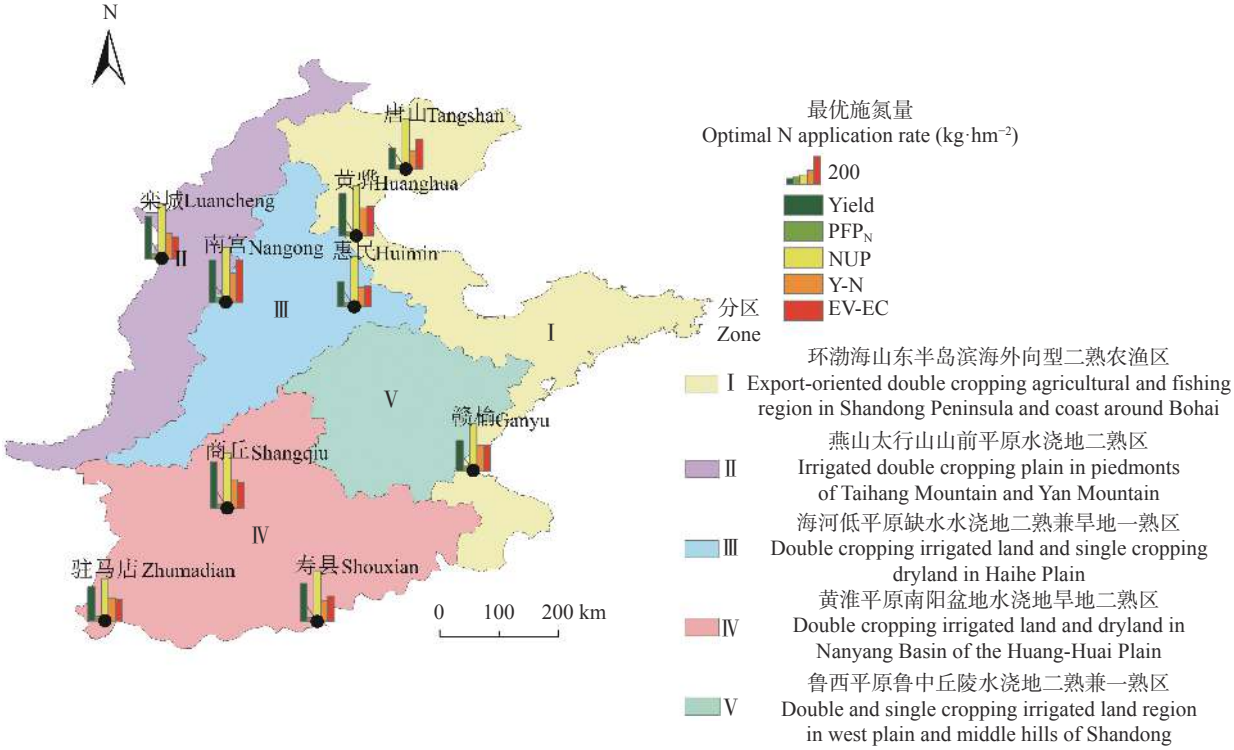

图 9　华北平原各站点冬小麦最优施氮量分布图

Fig. 9　Optimal N application rates of winter wheat in the NCP stations

Yield: 产量; PFP$_N$: 氮肥偏生产力; NUP: 氮素吸收; Y-N: 增产-节氮权衡; EV-EC: 环境-经济效益; Act: 农户实际施氮量。PFP$_N$: nitrogen partial factor productivity; NUP: N uptake; Y-N: the balance of yield increase and nitrogen-saving; EV-EC: environmental-economic benefits; Act: actual nitrogen application of farmers.

不同, 它是用来衡量产量增长与氮素损失平衡的一项指标, 因此越接近于 0 证明该指标表现越好。基于冬小麦氮肥偏生产力最高为目标时, 最优施氮量最低 (30 kg·hm^{-2}), 该施氮量下, 其余指标的表现均比较差, 尤其是产量、氮素吸收和环境-经济效益都处于最低水平 (图 8a, c, e)。

综合而言, 以增产-节氮权衡和环境-经济效益为约束条件下的施氮管理, 可保证冬小麦约 90% 的产

量, 但施氮量却比目前实际施肥水平减少将近一半, 极大地降低了氮肥施用对环境的负面影响。同时, 5 项指标均可以保持在相对平衡的状态。因此, 本研究认为增产-节氮权衡和环境-经济效益约束目标下所得最优施氮量更为合理。该约束条件同时将经济和环境纳入决策系统, 以最小的生态环境影响保障最大的作物收益, 能够兼顾经济效益和生态效益, 实现粮食安全和生态友好的双重目标。

由于气候、土壤和人为等因素, 各亚区最优施氮量也存在一定的差异。以冬小麦氮素吸收最大化为目标时, Ⅰ区最优施氮量最低, 为 350 kg·hm^{-2}; Ⅳ区的最优施氮量次之, 为 360 kg·hm^{-2}; Ⅲ区略高, 最优施氮量为 375 kg·hm^{-2}; Ⅱ区最优施氮量为各亚区中最高, 为 390 kg·hm^{-2}。以产量最大化为目标时, Ⅰ区和Ⅲ区最优施氮量相对较低, 分别为 230 kg·hm^{-2} 和 240 kg·hm^{-2}; Ⅱ区和Ⅳ区的最优施氮量相对较高, 分别为 300 kg·hm^{-2} 和 280 kg·hm^{-2}。以增产-节氮权衡为目标时, 各亚区最优施氮量均介于 169~180 kg·hm^{-2}, 差异较小。以环境-经济效益为目标时, 各亚区间最优施氮量的差异较大。低值主要分布在Ⅱ区和Ⅳ区, 分别为 150 kg·hm^{-2} 和 170 kg·hm^{-2}; Ⅰ区和Ⅲ区则相对较高, 最优施氮量分别为 200 kg·hm^{-2} 和 225 kg·hm^{-2}。基于冬小麦氮肥偏生产力最高考虑时, 最优施氮量为各指标最低, 各亚区均为 30 kg·hm^{-2}。

3　讨论

本研究利用 CERES-Wheat 模型, 基于 5 个指标(产量、氮肥偏生产力、氮素吸收、增产-节氮权衡和环境-经济效益) 和施氮量的关系曲线得到华北平原冬小麦的最优施氮量, 为华北平原冬小麦种植的氮肥管理提供科学参考。

研究结果显示, 冬小麦产量随氮肥投入量的增加而增加, 超过一定范围, 产量将不再增加, 这与前人研究得出的规律一致[16-18,22,30-31], 主要原因是过量的氮肥投入破坏了土壤养分平衡, 氮素相关转化酶活性降低, 阻碍了同化物向籽粒的再分配。基于产量最大化考虑, 华北平原各站点平均适宜性施氮量为 257 kg·hm^{-2}, 该数值与陈天鑫等[17]的研究结果(240 kg·hm^{-2}) 基本一致。大量研究表明氮肥偏生产力随着施氮量的增加而降低[4,17,31-33], 与本研究所得规律基本一致。本研究还显示, 冬小麦氮素吸收随施氮量的增加而增长, 之后逐渐放缓, 也存在部分地区氮素吸收会一直增长未出现放缓趋势。本研究认为 363 kg·hm^{-2} 是基于冬小麦氮素吸收考虑的最优施氮量, 较 Khoshnevisan 等[13]的研究数值偏高。原因一方面是选取的冬小麦品种和灌溉模式的不同, 本文所有施氮水平均设置为充分灌溉, 拔节-开花期灌溉充分有助于氮素的吸收和分配[34]。另一方面, 冬小麦生育期施肥方式、氮磷钾的配比问题、选取的研究站点及研究方法等存在差异。考虑环境要素的约束条件下 (增产-节氮权衡、环境-经济效益), 最优施氮量分别为 173 kg·hm^{-2} 和 190 kg·hm^{-2}, 比单纯考虑产量时的最优施氮量减少 20%~30%。但是在实际种植过程中, 由于没有政府补贴、农户认知不足和肥料类型差异等原因, 农民很少会考虑环境要素, 长期以来都在过量施用氮肥, 冬小麦种植过程中投入的氮肥平均高达 300~325 kg·hm^{-2}[23,35]。除氮素吸收外, 其余 4 个最优施氮量均不同程度地低于当前华北平原农民实际施氮水平。以环境-经济效益和增产-节氮权衡为约束条件下的最优施氮量比当前实际水平分别节约了 42% 和 47%, 但是产量仍可以保持在较高水平。增产-节氮权衡与环境-经济效益约束条件在实现节氮最大化的同时将经济效益和生态效益纳入决策系统, 可以在一定程度上降低环境风险, 在保证增产-节氮权衡和环境-经济效益最大化的同时较好地兼顾其他指标, 综合而言优于其他指标, 采用相应的最优施氮量有利于农业集约化可持续发展。因此, 建议在考虑区域差异以及当地实际情况的基础上, 将环境成本纳入决策系统, 推荐基于环境-经济效益与增产-节氮权衡目标约束下的最优施氮量作为区域施肥的主要参考。

区域最优施氮量的确定是一项复杂的工作, 涉及经济、生态、区域发展定位和国家政策等多方面。本文虽然探讨了不同施氮条件下冬小麦产量、氮肥利用等指标的变化情况, 但并未涉及氮磷钾的配比、施肥时间和次数的问题。同时, 除氮肥管理水平之外其余种植条件均设为最佳状态, 而实际种植中, 气候、土壤、耕作栽培方式和病虫害等因素都会影响作物最优施氮量, 因此结果具有一定的局限性。此外, 本研究得出增产-节氮权衡和环境-经济效益约束条件下的最优施氮量较为合理的结论仅停留在理论分析阶段, 在今后的研究中, 还需在具体考虑区域农业种植条件差异的基础上进一步解析冬小麦的最优施氮量, 并将理论研究所得的最优施氮量应用到田间试验中进行综合量化与验证。基于多目标约束条件, 未来研究可将不同指标耦合为系统的最优施氮量评估模型, 以期在指导区域小麦氮肥施用中发挥更大的作用。

4 结论

1) 由于各站点地势、气候和土壤环境等要素的不同, 华北平原不同约束条件下冬小麦最优施氮量具有差异, 其顺序为氮素吸收>产量>环境-经济效益>增产-节氮权衡>氮肥偏生产力。

2) 与单纯考虑产量最大化相比, 考虑环境要素指标 (增产-节氮权衡和环境-经济效益) 所得的冬小麦最优施氮量平均可减少约 20%~30%。

3) 与当前华北平原农民实际平均施氮水平相比, 考虑环境要素指标 (增产-节氮权衡和环境-经济效益) 所得的最优施氮量分别可减少 42% 和 47%。

4) 建议以增产-节氮权衡和环境-经济效益为目标来衡量区域冬小麦种植的氮肥投入, 华北平原最优氮肥投入为 173~190 kg·hm^{-2}。

参考文献 References

[1] PISHGAR-KOMLEH S H, AKRAM A, KEYHANI A, et al. Integration of life cycle assessment, artificial neural networks, and metaheuristic optimization algorithms for optimization of tomato-based cropping systems in Iran[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, 25(3): 620−632

[2] MALHI S S, GRANT C A, JOHNSTON A M, et al. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review[J]. Soil and Tillage Research, 2001, 60(3/4): 101−122

[3] LI S X, WANG Z H, HU T T, et al. Chapter 3 nitrogen in dryland soils of China and its management[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2009: 123–181

[4] 柏慧, 张秀, 初金鹏, 等. 氮肥水平对强筋小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(4): 7−14
BAI H, ZHANG X, CHU J P, et al. Nitrogen fertilizer level: Effects on yield and nitrogen utilization of strong gluten wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(4): 7−14

[5] ZHANG H, TAO F L, ZHOU G S. Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China[J]. Agricultural Systems, 2019, 171: 100−112

[6] ZHAO Z G, QIN X, WANG E L, et al. Modelling to increase the eco-efficiency of a wheat-maize double cropping system[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 210: 36−46

[7] 康飞, 孟凡乔. 基于文献分析的北方冬麦田氨挥发特性[J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 228−234
KANG F, MENG F Q. Ammonia volatilization from winter wheat cropland in Northern China based on a literature analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 228−234

[8] TIAN Z, WANG J J, LIU S, et al. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region[J]. Science of the Total Environment, 2015, 533: 329−338

[9] WU Y Y, GU B J, ERISMAN J W, et al. $PM_{2.5}$ pollution is substantially affected by ammonia emissions in China[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 86−94

[10] 马登科, 殷俐娜, 刘溢健, 等. 施氮量对黄土高原旱地冬小麦产量和水分利用效率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(3): 486−499
MA D K, YIN L N, LIU Y J, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen application rates on yield and water use efficiency of winter wheat in dryland of Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(3): 486−499

[11] 刘建刚, 褚庆全, 王光耀, 等. 基于DSSAT模型的氮肥管理下华北地区冬小麦产量差的模拟[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 124−129
LIU J G, CHU Q Q, WANG G Y, et al. Simulating yield gap of winter wheat in response to nitrogen management in North China Plain based on DSSAT model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 124−129

[12] 钟茜, 巨晓棠, 张福锁. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系对氮素环境承受力分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(3): 285−293
ZHONG Q, JU X T, ZHANG F S. Analysis of environmental endurance of winter wheat/summer maize rotation system to nitrogen in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(3): 285−293

[13] KHOSHNEVISAN B, RAFIEE S, PAN J T, et al. A multi-criteria evolutionary-based algorithm as a regional scale decision support system to optimize nitrogen consumption rate: A case study in North China Plain[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120213

[14] 吴强, 张永平, 董玉新, 等. 施氮量和灌水模式对小麦产量、品质和氮肥利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 334−342
WU Q, ZHANG Y P, DONG Y X, et al. Effect of nitrogen application rates and irrigation modes on yield, nitrogen use efficiency and quality in wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(3): 334−342

[15] 沙之敏, 边秀举, 郑伟, 等. 最佳养分管理对华北冬小麦养分吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1049−1055
SHA Z M, BIAN X J, ZHENG W, et al. Effects of optimum nutrient management on nutrient uptake and utilization of winter wheat in North China Plain[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1049−1055

[16] BAI H Z, TAO F L. Sustainable intensification options to improve yield potential and eco-efficiency for rice-wheat rotation system in China[J]. Field Crops Research, 2017, 211: 89−105

[17] 陈天鑫, 王艳杰, 张燕, 等. 不同施氮量对冬小麦光合生理指标及产量的影响[J]. 作物杂志, 2020, (2): 88−96
CHEN T X, WANG Y J, ZHANG Y, et al. Effects of different nitrogen rates on photosynthetic and physiological indexes and yield of winter wheat[J]. Crops, 2020, (2): 88−96

[18] XIN Y, TAO F L. Optimizing genotype-environment-

management interactions to enhance productivity and eco-efficiency for wheat-maize rotation in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2019, 654: 480−492

[19] 刘建超, 何建强, 武文杰, 等. 水氮管理影响冬小麦品质的CERES-Wheat模型模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 271−278
LIU J C, HE J Q, WU W J, et al. Effect of irrigation and nitrogen fertilizer managements on winter wheat quality based on CERES-Wheat model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 271−278

[20] 成林, 李彤霄, 刘荣花. 主要生育期气候变化对河南省冬小麦生长及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(6): 931−940
CHENG L, LI T X, LIU R H. Effect of climate change on growth and yield of winter wheat in Henan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(6): 931−940

[21] CUI Z L, ZHANG F S, CHEN X P, et al. On-farm evaluation of an in-season nitrogen management strategy based on soil Nmin test[J]. Field Crops Research, 2008, 105(1/2): 48−55

[22] 任思洋, 张青松, 李婷玉, 等. 华北平原五省冬小麦产量和氮素管理的时空变异[J]. 中国农业科学, 2019, 52(24): 4527−4539
REN S Y, ZHANG Q S, LI T Y, et al. Spatiotemporal variation of winter wheat yield and nitrogen management in five provinces of North China Plain[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(24): 4527−4539

[23] ZHANG Y T, WANG H Y, LEI Q L, et al. Optimizing the nitrogen application rate for maize and wheat based on yield and environment on the Northern China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1173−1183

[24] 熊伟. CERES-Wheat模型在我国小麦区的应用效果及误差来源[J]. 应用气象学报, 2009, 20(1): 88−94
XIONG W. The performance of CERES-Wheat model in wheat planting areas and its uncertainties[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2009, 20(1): 88−94

[25] 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 F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915−924

[26] XIA L L, TI C P, LI B L, et al. Greenhouse gas emissions and reactive nitrogen releases during the life-cycles of staple food production in China and their mitigation potential[J]. Science of the Total Environment, 2016, 556: 116−125

[27] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486−489

[28] YAN X Y, AKIMOTO H, OHARA T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia[J]. Global Change Biology, 2003, 9(7): 1080−1096

[29] 刘巽浩, 陈阜. 中国农作制[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
LIU X H, CHEN F. Farming Systems in China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005

[30] QIN W L, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Crop rotation and N application rate affecting the performance of winter wheat under deficit irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2018, 210: 330−339

[31] 刘梦, 梁茜, 葛均筑, 等. 不同密度下施氮量对夏玉米产量和氮肥利用效率的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 153−159
LIU M, LIANG Q, GE J Z, et al. Effects of nitrogen and density on summer maize yield and nitrogen use efficiency[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(6): 153−159

[32] 李春喜, 刘晴, 邵云, 等. 有机物料还田和减施氮肥对小麦氮素利用及经济效益的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 214−220
LI C X, LIU Q, SHAO Y, et al. Effects of organic materials returning and nitrogen fertilizer reduction on nitrogen utilization and economic benefits of wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 214−220

[33] 李珺, 刘双全, 仇少君, 等. 不同施氮量对典型黑土马铃薯产量、养分吸收和氮素利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(4): 1−8
LI J, LIU S Q, QIU S J, et al. Effects of different nitrogen rates on potato yield and nitrogen use efficiency in a typical black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2020, 26(4): 1−8

[34] 刘恩科, 梅旭荣, 龚道枝, 等. 不同生育时期干旱对冬小麦氮素吸收与利用的影响[J]. 植物生态学报, 2010, 34(5): 555−562
LIU E K, MEI X R, GONG D Z, et al. Effects of drought on N absorption and utilization in winter wheat at different developmental stages[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(5): 555−562

[35] LIU Z, YU N N, CAMBERATO J J, et al. Crop production kept stable and sustainable with the decrease of nitrogen rate in North China Plain: an economic and environmental assessment over 8 years[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 19335