

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317(2023)08-0001-08

权衡生产和耗水的区域小麦种植格局优化

任频频¹, 李保国^{1,2,3}, 黄峰^{1,2,3*}

(1.中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193; 2.农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 3.自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193)

摘要:【目的】优化种植广泛、灌溉密集的小麦种植面积, 发挥节水灌溉优势, 缓解华北地区的水资源短缺压力。【方法】引入小麦蒸散量耗水和产量等指标, 建立华北区域尺度上的县域小麦种植面积目标规划模型, 探讨生产和耗水权衡视角下的区域小麦生产布局优化方案。【结果】2001—2009 年, 华北地区小麦生育期 ET (Evapotranspiration) 呈上升趋势, 2010—2018 年呈显著下降趋势 ($p<0.05$)。不同水文年型的小麦 ET 差异显著, 总体表现出“枯水年最高、平水年次之、丰水年最低”的特征。省级水平上, 当总产量权重为 1 时, 现有灌溉水平下的小麦总产量可提高 1.2%~2.3%, 当 ET 权重为 1 时, 小麦蒸散量耗水可减少 0.4%~0.8%; 市级水平上的相应结果分别为 0.7%~1.6%和 0.3%~0.5%。此外, 同一灌溉水平下, 在总产量权重降低、 ET 权重增加的过程中, 能保持较高小麦种植规模的区域呈现规律性转移 (在河北是由南向北转移), 体现了不同县域在小麦生产或耗水管理方面的优势。【结论】无论是当前灌溉水平还是在一定的灌溉约束下, 通过优化华北地区的县域小麦种植规模, 都可以获取更多的产量或实现更少的蒸散量耗水, 本研究可为该地区区域小麦种植格局优化和水资源管理提供一定的参考。

关键词: 小麦种植; 区域优化; 生产耗水平衡; 灌溉约束

中图分类号: S-3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2022545

OSID: 

任频频, 李保国, 黄峰. 权衡生产和耗水的区域小麦种植格局优化[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(8): 1-8.

REN Pinpin, LI Baoguo, HUANG Feng. Optimizing Wheat Planting Pattern to Balance Wheat Production and Its Water Consumption[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 1-8.

0 引言

【研究意义】小麦 (*Triticum aestivum* L.) 是世界上的主要农作物之一, 其种植面积占全球耕地面积的 1/6, 对膳食热量的贡献达到了 20%^[1-2]。灌溉是农业生产中的重要农事措施^[3], 灌溉农业对全球农业生产的贡献达到了 50%左右^[4-5]。灌溉对作物增产贡献巨大, 尤其是对小麦产量的增加^[6-7]。研究表明, 若没有灌溉, 相对于 20 世纪 70 年代, 20 世纪初印度小麦产量的增长将要减少 13%^[8]。从全球范围看, 灌溉和雨养小麦产量的差异可达 34%±9%^[9]。然而, 对中国华北地区来说, 小麦的集约种植及其巨大的灌溉需求正在加速该地区水资源的不可持续性利用。由于降水稀少、降水时期和小麦生育期不匹配等原因, 抽取地下水灌溉成为保证华北地区小麦正常生产的普遍措施^[10], 因此也加剧了该地区的水资源短缺现状, 导致地下水位快速下降, 引发了一系列生态环境问题^[11-14]。小麦生产

和水资源短缺之间的矛盾正在影响该地区水资源的可持续利用, 调整灌溉密集型的小麦种植, 对实现该地区“粮-水”平衡的可持续发展具有重要意义。

【研究进展】可持续发展的理念推动国内外学者探索了许多农业节水生产措施, 其中, 调整农作物种植制度^[15-16]、优化农作物种植结构^[17-18]等成为热点研究目标。Osama 等^[19]通过建立线性规划模型, 优化了水资源和土地资源约束下的埃及地区 28 种农作物的种植面积。Van 等^[11]基于模型模拟了地下水平衡的农作物种植体系, 并评估了作物种植变化对作物生产和耗水的影响。无论以上哪种方式, 都引入了小麦季节性休耕或减少小麦种植面积的措施, 这不仅可以直接节约水资源, 还可以改善农业生态环境和土地质量^[20]。然而, 尽管小麦季节性休耕可以实现明显的灌溉节水效果, 但也会导致产量下降^[21]。引进春玉米种植可以提高粮食总产量^[22], 但仍应慎重考虑小麦、玉米和其他作物之间的种植权衡。在华北地区, 小麦是最重要的主食之一, 玉米则主要用作动物饲料^[23]。农作物种植结构优化是指在一定的约束条件下, 重新分配作物种植面积, 从而实现作物总产量或总效益最大化, 或总生产成本最小化等^[24-26]。在华北地区, 王璐等^[27]、胡洪静等^[28]、Zhang 等^[29]分别在不同地域尺度优化了

收稿日期: 2022-10-02 修回日期: 2023-05-14 网络出版日期: 2023-05-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0300301)

作者简介: 任频频 (1993-), 男, 博士, 主要从事农业水文遥感研究。

E-mail: 1015422930@qq.com

通信作者: 黄峰 (1972-), 男, 副教授, 主要从事农业水土资源利用研究。

E-mail: fhuang@cau.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

相关农作物的种植结构,但在华北区域尺度上,探索农作物种植优化格局的研究尚不多见。

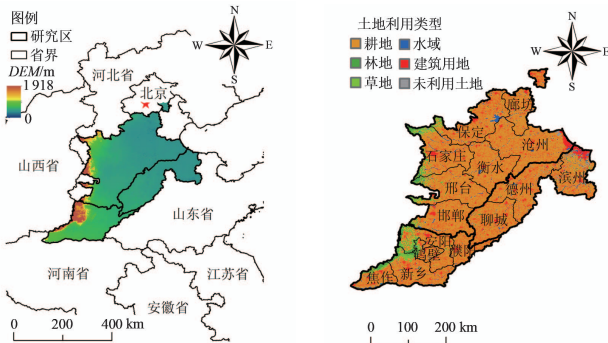
【切入点】由于农业生产的时空异质性,全方位考虑作物生产的影响因素、并在区域尺度上开展作物种植优化具有一定的挑战性。聚焦于华北地区的“水粮”矛盾,在水资源短缺和小麦生产需求的背景下,如何构建有限水资源条件下“耗水少、产量高”的区域小麦种植格局?基于此,本文以华北地区县域尺度的小麦种植面积为优化对象,通过引入权重系数权衡小麦生产和耗水,建立区域尺度小麦种植面积目标规划模型,旨在明确“生产-耗水平衡”视角下的小麦生产空间布局优化潜力及其区域生产优势,为实现华北地区的“粮水平衡”可持续发展提供理论支撑与实践支持。

【拟解决的关键问题】①华北地区小麦生育期的蒸散量耗水(Evapotranspiration, ET)特征;②以“生产多、耗水少”为权衡目标,以县域为最小研究单元,建立小麦种植面积目标规划模型,探讨华北地区小麦种植格局在区域上的优化潜力。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本文研究区如图1所示,覆盖了河北中南部、河南北部以及山东鲁西北地区的151个县市,陆地总面积约15万 km^2 。研究区内的主要土地利用类型是耕地,主要农作物种植制度是冬小麦夏玉米一年两熟的种植制度,该种植制度的周年蒸散量耗水约800~900 mm,而该地区年平均降水量仅有500~600 mm,其中约60%~70%的降水集中在夏季。由于降水时期与小麦生育期的不匹配性,小麦生长季通常需要抽取地下水灌溉来补充作物所需水分,这也导致该地区地下水呈逐年下降趋势,其中浅层地下水下降速率达到了 $(0.46 \pm 0.37) \text{ m/a}$,深层地下水下降速率达到了 $(1.14 \pm 0.58) \text{ m/a}$ ^[30]。



(a) 研究区位置示意图

(b) 研究区主要土地利用类型

图1 研究区位置示意图及其主要土地利用类型

Fig.1 Location of the study area, and its main land use types

1.2 数据源

本文所用到的数据包括:小麦生育期的 ET 和灌溉耗水(Irrigation Water Consumption, IWC)数据、小麦总产量、小麦种植面积、小麦单产等县域尺度统计数据。2001—2018年小麦生育期的 ET 和 IWC 数据来自Ren等^[31],其中 ET 的计算是基于经典的地表能量平衡模型SEBS(Surface Energy Balance System)^[32], IWC 则是根据土壤水平衡由蒸散量和降水量估算得到,该方法广泛应用于作物灌溉估算与评价^[33-34]。小麦总产量、种植面积和单产等统计数据来源于各省市农业统计年鉴。为了反映总现状,本文以搜集到的2014、2016年和2018年的小麦单产均值作为单产平均水平,并以2018年小麦种植面积作为当前小麦种植规模。

2 小麦种植面积目标规划模型

2.1 模型建立

小麦生产直接关系到农民利益和粮食生产安全,小麦蒸散量总体描述了小麦生产过程中的耗水特征。综合小麦蒸散量、耗水量和小麦生产,本文建立了小麦种植面积的多目标规划模型,模型优化总目标为“小麦总产量最大,总蒸散量最小”,约束条件包括灌溉约束、种植面积约束、小麦需求约束等。此外,本文探讨了不同情景下的目标优化结果,具体情景设置包括生产和耗水的不同权衡情景、不同水文年型情景、不同灌溉约束情景。

模型具体内容如下:

1) 目标函数

$$\max f = a \times \frac{f_1^*}{f_{1\max}} - b \times \frac{f_2^*}{f_{2\min}}, \quad (1)$$

$$f_1^* = \sum_{i=1}^n X_i Y_i, \quad (2)$$

$$f_2^* = \sum_{i=1}^n X_i ET_i, \quad (3)$$

$$a + b = 1, \quad (4)$$

式中: f 为总目标函数; a 和 b 分别为总产量和总蒸散量的权重系数,且 a 和 b 满足 $a+b=1$; f_1^* 为总产量的目标函数(t); $f_{1\max}$ 为能达到的最大小麦总产量(t); f_2^* 为总蒸散量的目标函数(m^3); $f_{2\min}$ 为能达到的最少小麦蒸散量(m^3),由于产量和蒸散量是2个不同的变量且单位不同,本文利用 $f_{1\max}$ 和 $f_{2\min}$ 分别对产量目标函数和蒸散量目标函数进行了标准化; X_i 为第 i 个县的小麦种植面积(hm^2); Y_i 为第 i 个县的小麦单产(t/hm^2); ET_i 为第 i 个县的小麦蒸散量(m^3/hm^2); n 为县域数目。

2) 约束条件

灌溉约束:

$$\sum_{i=1}^n X_i IWC_i = Q, \quad (5)$$

式中： IWC_i 为第*i*个县的小麦灌溉需水 (m^3)； Q_j 为第*j*个 ($j=1,2,3,4,5$) 灌溉水平 (m^3)，由各个县域的小麦 IWC 和种植面积计算。在这一部分中，本文分别在省、市两级进行了目标优化，即 Q_j 分别在省和市级水平上进行统计。

种植面积约束：

$$X_{i,\min} \leq X_i \leq X_{i,\max}, \quad (6)$$

式中： $X_{i,\min}$ 为第*i*个县的最少小麦种植面积 (hm^2)； $X_{i,\max}$ 为第*i*个县的最大小麦种植面积 (hm^2)。本文将小麦最少种植面积设置为当前种植面积的 40%，最大种植面积设置为当前种植面积的 110%^[35]。

小麦需求约束：

$$\sum_{i=1}^n X_i Y_i > \lambda P, \quad (7)$$

式中： λ 为人均小麦需求量^[36]； P 为总人口数目。

2.2 情景模拟

本文设置了 5 个灌溉水平，包括根据 IWC 计算的现状灌溉水平 Q ，以及分别减少灌溉 10%、20%、30%、40% 的 4 个灌溉约束水平，分别表示为 $0.9Q$ 、 $0.8Q$ 、 $0.7Q$ 、 $0.6Q$ 。本文设置了 3 组权重来研究小麦产量和蒸散量、耗水量之间的权衡关系，分别为：产量权重为 1，蒸散量权重为 0，此种情景下仅考虑小麦生产在区域尺度上达到最大化；产量权重为 0，蒸散量权重为 1，此种情景下仅考虑小麦蒸散量在区域尺度上达到最小化；产量和蒸散量的权重分别为 0.5，此种情景下考虑区域尺度上小麦生产和蒸散量、耗水量的平衡。此外，本文考虑了水文年型的影响，基于降水数据，2001—2018 年小麦生育期观测到 4 个枯水年、6 个平水年和 8 个丰水年。考虑到小麦蒸散量和灌溉耗水量在不同水文年型间差异显著 ($p<0.05$ ，表 1)，本文开展了不同降水条件（多年平均，枯水年、平水年、丰水年）下的数据分析和小麦种植优化。

3 结果与分析

3.1 小麦蒸散量和灌溉耗水量

小麦蒸散量和灌溉耗水量的年际变化如图 2 所示。河北、河南和山东的小麦蒸散量变化范围分别为 283~411、313~463 mm 和 322~470 mm，年际变异系数分别为 10.8%、9.5%和 10.5%。小麦灌溉耗水量的年际波动较大，河北、河南、山东小麦灌溉需水的标准偏差分别为 65.0、65.7、73.5 mm，年际变异系数

分别为 28.2%、27.9%、28.1%。此外，2010 年以后，小麦蒸散量和灌溉耗水量均呈明显的下降趋势，进一步对 2001—2009 年和 2010—2018 年的蒸散量和灌溉耗水量进行线性拟合，结果表明（表 1），2001—2009 年小麦蒸散量显著增加，2010—2018 年显著减少 ($p<0.05$)。2001—2009 年，小麦灌溉耗水量呈上升趋势，2010—2018 年显著下降 ($p<0.05$)。

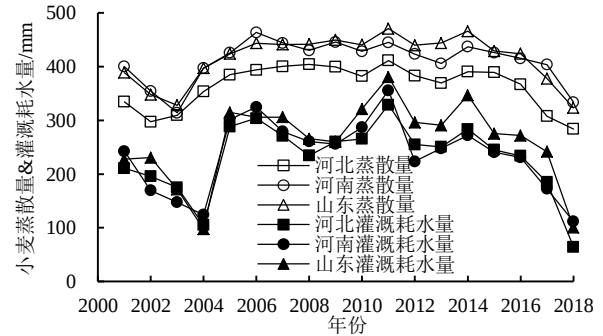


图 2 小麦蒸散量和灌溉耗水量的时序变化特征

Fig.2 Temporal variations of ET and irrigation water consumption of wheat

表 1 小麦蒸散量和灌溉耗水量的线性拟合系数

Table 1 Linear fitting coefficients of ET and irrigation water consumption of wheat

时段	蒸散量			灌溉耗水量		
	河北	河南	山东	河北	河南	山东
2001—2009 年	13.4**	12.3*	13.3**	11.7	13.2	11.9
2010—2018 年	-11.9*	-8.3*	-13.2*	-21.4*	-20.7**	-22.7*

注 *表示 $p<0.05$ ，**表示 $p<0.01$ 。

表 2 显示了不同水文年型小麦蒸散量和灌溉耗水量的统计特征及其方差分析结果。河北省的小麦蒸散量最少 (366.1 mm)、灌溉耗水量最少 (231.9 mm)，山东省的小麦蒸散量最大 (414.3 mm)、灌溉耗水量最大 (261.5 mm)。不同水文年型的小麦蒸散量和灌溉耗水量差异显著 ($p<0.05$)，其中蒸散量由枯水年向平水年和丰水年递减，在河北表现为 $396.7 \text{ mm} > 379.7 \text{ mm} > 340.5 \text{ mm}$ ，在山东表现为 $449.7 \text{ mm} > 432.6 \text{ mm} > 382.8 \text{ mm}$ ，这可能归因于枯水年较少的降水和较大的饱和水汽压差，从而有利于蒸散量的进行。受蒸散量和降水量的双重差异，枯水年的小麦灌溉耗水最多，在河北、河南和山东分别达到了 302.9、311.5 mm 和 336.3 mm；丰水年的小麦灌溉耗水量最少，在河北、河南和山东分别为 180.5、181.9 mm 和 207.4 mm。

表 2 小麦蒸散量和灌溉耗水量在不同水文年型的统计分析（平均值±标准差）

Table 2 Statistics on ET and irrigation water consumption of wheat in different hydrological year types

年型	蒸散量/mm			灌溉耗水量/mm		
	河北	河南	山东	河北	河南	山东
平均年	366.1±24.8	409.3±21.6	414.3±21.7	231.9±21.4	235.3±19.1	261.5±16.05
枯水年	396.7±25.4a	441.2±24.1a	449.7±23.6a	302.9±25.3a	311.5±22.5a	336.3±18.3a
平水年	379.7±26.2b	422.6±22.5b	432.6±23.4b	253.1±23.0b	255.7±21.6b	283.7±17.4b
丰水年	340.5±24.3c	383.4±20.3c	382.8±20.7c	180.5±20.3c	181.9±16.8c	207.4±17.2c

3.2 省级水平小麦种植面积优化

表 3 列出了省级水平下优化后的小麦总产量和蒸散量相对于现状的变化比例。当前灌溉水平下,产量权重不低于 0.5 时,通过优化,小麦总产量可提高 1.2%~2.3%;当产量权重为 0 时,河北、河南、山东的小麦总产量将会分别减少-1.3%、-1.2%、-0.2%。当灌溉量减少 10% (0.9Q) 时,小麦总产量最少可以减少-7.1% (河北)、-7.3% (河南)、-7.9% (山东),此时蒸散量的减少量也在 10% 以下;当仅优化蒸散量时,河北、河南、山东的蒸散量分别减少-11.2%、-11.0%、-10.5%。

表 3 小麦总产量和蒸散量的优化结果 (平均年, 省级水平)

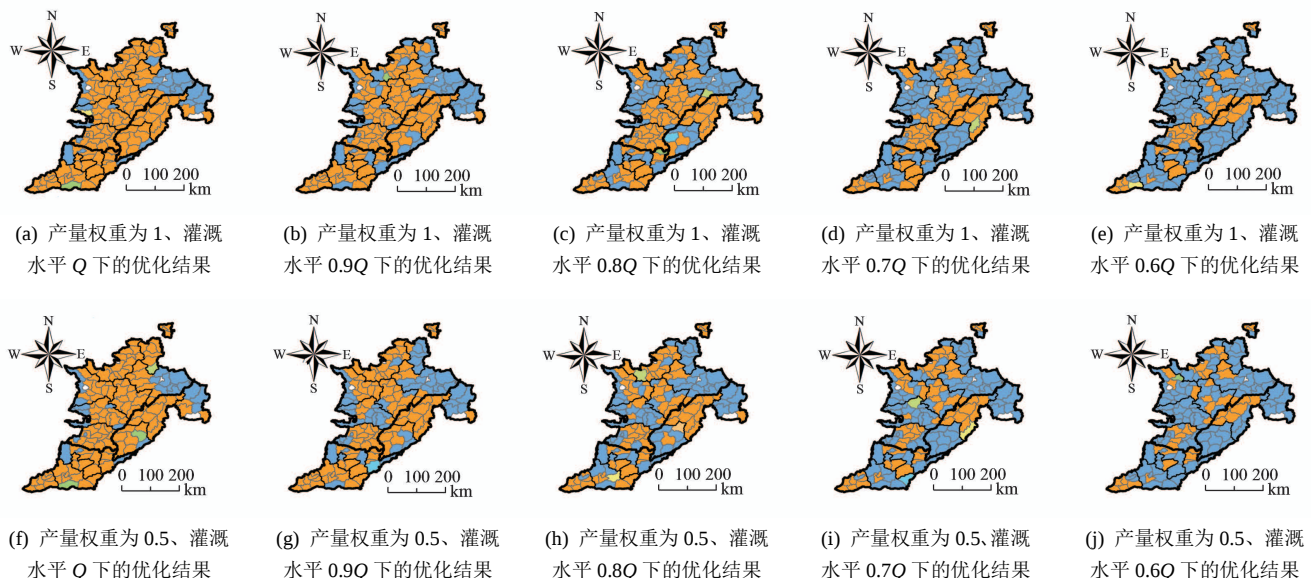
灌溉水平	产量权重	河北		河南		山东	
		总产量/%	蒸散量/%	总产量/%	蒸散量/%	总产量/%	蒸散量/%
Q	1	2.3	-0.1	2.0	0.2	1.2	0.1
	0.5	2.3	-0.1	2.0	0.2	1.2	0
	0	-1.3	-0.8	-1.2	-0.7	-0.2	-0.4
0.9Q	1	-7.1	-9.7	-7.3	-9.7	-7.9	-10.0
	0.5	-7.5	-10.3	-7.3	-9.7	-7.9	-10.0
	0	-11.7	-11.2	-10.8	-11.0	-10.1	-10.5
0.8Q	1	-17.0	-19.2	-16.9	-19.4	-17.4	-20.1
	0.5	-17.5	-20.1	-17.0	-19.7	-17.5	-20.2
	0	-21.7	-21.4	-21.3	-21.1	-20.2	-20.7
0.7Q	1	-27.2	-29.1	-27.1	-29.3	-27.2	-30.2
	0.5	-27.7	-30.0	-27.4	-30.0	-27.2	-30.3
	0	-30.3	-31.3	-30.7	-31.1	-29.9	-30.7
0.6Q	1	-37.6	-39.1	-37.7	-39.6	-37.6	-40.2
	0.5	-38.0	-39.7	-38.1	-40.0	-38.0	-40.2
	0	-40.2	-41.1	-41.0	-41.0	-39.2	-40.5

当仅优化产量时,小麦总产量的减少幅度少于灌溉量的减少幅度 (即少于优化前小麦总产量的减少幅

度),这体现了总产量的优化潜力,其在河北为 2.3%~3.0%,在河南为 2.0%~3.1%,在山东为 1.2%~2.8%。当仅优化蒸散量时,小麦蒸散量的减少幅度多于灌溉的减少幅度 (即多于优化前小麦蒸散量的减少幅度),这体现了蒸散量耗水的优化潜力,其在河北为 0.1%~1.4%,在河南为 0.7%~1.1%、在山东为 0.4%~0.7%。此外,产量权重为 1 和 0.5 的 2 种权衡情景下,小麦总产量和蒸散量的变化比较接近。

不同灌溉水平和不同权重情景下,小麦种植面积优化结果的空间分布如图 3 所示 (以小麦种植面积相对于现状的变化比例表示,图中 Q 表示当前灌溉水平,0.9Q、0.8Q、0.7Q、0.6Q 分别表示减少了 10%、20%、30%和 40%的灌溉水平。所有子图共用同一个比例尺,下同。)。当仅优化产量时,当前灌溉水平下,河北沧州东部和山东滨州北部的小麦种植面积减少,河北石家庄和邢台西部的部分县域也需要减少,其他县可以保留较高的小麦种植面积。当灌溉逐渐减少时,小麦种植面积减少区域主要分布在河北西部、河北东北部、河南北部以及山东的聊城和滨州地区,河北山东交界处县域均能维持较高的小麦种植规模。

在相同灌溉水平下,当产量权重减少、蒸散量权重增加时,可以维持较高小麦种植面积的区域呈现规律性的空间转移,其中以河北省最为明显。以情景“0.8Q”为例,产量权重为 1 时,能保持较高小麦种植面积的县域主要分布在邯郸、邢台和衡水,而蒸散量权重为 1 时则主要分布在石家庄和保定地区。山东德州的县域在实现小麦总产量最大化方面的潜力最大,而滨州在减少小麦蒸散量耗水方面具有优势。小麦生产和耗水不同权衡情景下,可以维持较高小麦种植规模的县域及其空间变化,体现了充分发挥小麦区域生产优势的潜力和意义。



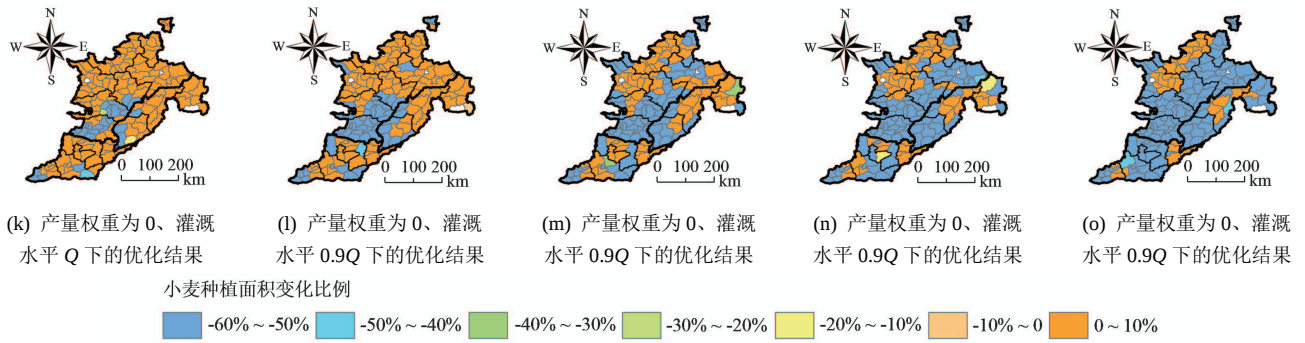


图 3 不同权重和灌溉水平下优化后的小麦种植面积变化比例（平均年，省级水平）

Fig.3 Change proportions of optimized wheat planting area under different weights and irrigation levels (average year, provincial level)

3.3 市级水平小麦种植面积优化

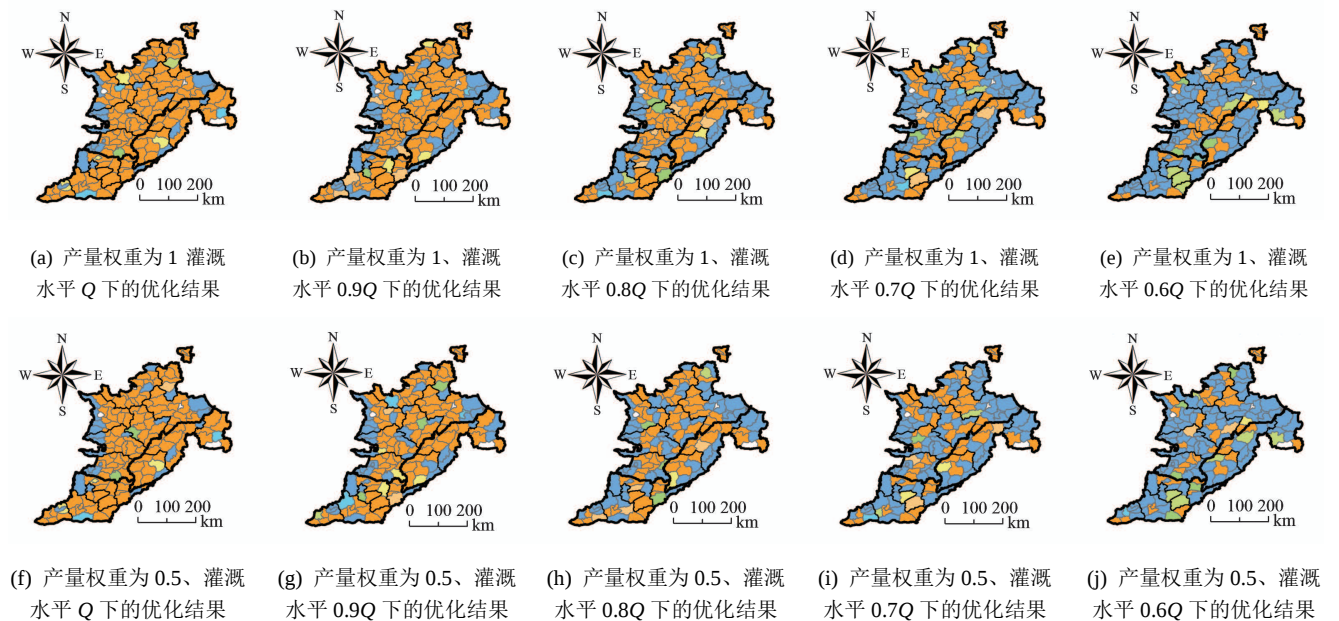
图 4 展示了市级水平下小麦种植面积优化结果的空间分布（平均年）。表 4 为不同灌溉水平和不同权重情景下，市级水平上的小麦总产量和蒸散量耗水优化结果。当前灌溉水平下，河北、河南、山东的小麦总产量最多分别可提高 1.4%、1.6%、0.7%，蒸散量最少可分别减少 0.5%、0.4%、0.3%。在灌溉约束水平下，小麦总产量的减少幅度可以低于灌溉量的减少幅度，这个“低”的变化范围在河北为 1.9%~2.3%，在河南为 1.9%~2.7%，在山东为 1.0%~1.2%，此外，小麦蒸散量、耗水量的减少幅度也可以高于灌溉的减少幅度，这个“高”的变化范围在河北为 0.6%~0.8%，在河南为 0.6%~0.8%，在山东为 0.3%~0.5%。

与省级水平下的优化结果相比，市级水平优化情景下小麦总产量和蒸散量、耗水量的变化幅度均较小：以河北省的情景“0.8Q”为例，省级水平下总产量最少可减少 17.0%，市级水平下则是 17.7%；省级水平下的蒸散量、耗水量最多可减少 21.4%，市级水平则是 20.8%。省级水平的优化结果从较大的地域层面反

映了小麦生产或耗水的管理优势，市级水平的优化结果进一步细化了这种优势的县域差异，可为地市级的小麦种植优化提供更多参考价值。

表 4 小麦总产量和蒸散量的优化结果（平均年，市级水平）

灌溉水平	产量权重	河北		河南		山东	
		总产量/%	蒸散量/%	总产量/%	蒸散量/%	总产量/%	蒸散量/%
Q	1	1.4	0	1.6	0.1	0.7	0.1
	0.5	1.3	-0.1	1.6	0.1	0.7	0.1
	0	-0.9	-0.5	0.3	-0.4	-0.9	-0.3
0.9Q	1	-8.0	-9.8	-7.6	-9.6	-9.0	-9.9
	0.5	-8.1	-10.0	-7.7	-9.8	-9.0	-10.0
	0	-11.1	-10.7	-9.9	-10.6	-10.8	-10.5
0.8Q	1	-17.7	-19.7	-17.3	-19.5	-18.8	-19.9
	0.5	-17.8	-20.1	-17.6	-19.8	-18.9	-19.9
	0	-20.9	-20.8	-20.5	-20.8	-20.8	-20.5
0.7Q	1	-27.7	-29.6	-27.5	-29.6	-28.8	-29.8
	0.5	-27.8	-29.9	-27.7	-29.8	-28.8	-29.9
	0	-30.6	-30.7	-31.0	-30.8	-30.8	-30.4
0.6Q	1	-38.1	-39.5	-38.1	-39.6	-38.9	-39.7
	0.5	-38.2	-39.8	-38.2	-39.7	-38.9	-39.8
	0	-40.3	-40.6	-40.5	-40.7	-40.5	-40.3



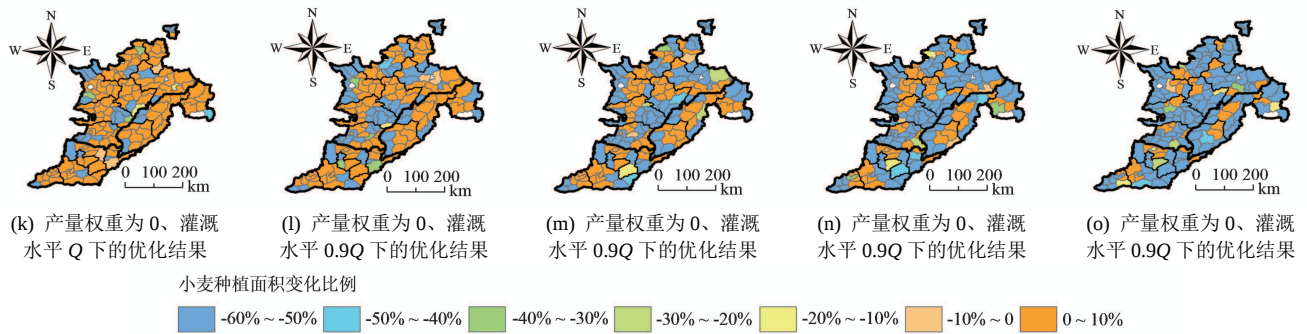


图 4 不同权重和灌溉水平下优化后的小麦种植面积变化比例 (平均年, 市级水平)

Fig.4 Change proportions of optimized wheat planting area under different weights and irrigation levels (average year, municipal level)

4 讨论

为了缓解地下水位下降、实现水资源的永续利用, 已有研究探讨了许多农业实践措施, 包括: ①采用可减少灌溉的农作物种植制度; ②优化灌溉时间、灌溉水量和灌溉方式, 减少无效水分损失, 提高灌溉水利用效率^[37]; ③农业节水措施的应用 (如地膜或秸秆覆盖等); ④以上措施的综合实践^[38-39]; ⑤其他措施, 如土壤耕作方法和作物基因型改进等^[40-41]。然而, 许多研究都是基于田间试验或模型模拟, 农业生产的空间异质性在一定程度上限制了研究结果的区域应用性。此外, 使用特定仪器 (如 TDR) 实时监测土壤水分、制定灌溉措施对农民来说也具有一定的挑战^[22]。研究指出, 在华北区域尺度上, 减少小麦种植面积是减少地下水开采的最直接有效途径之一^[42]。

合理的农作物种植结构是实现区域水土资源优化配置的基础, 国外已开展了许多农作物种植结构优化研究^[43-45]。在国内, 有学者在东北^[18]、西北^[46]、全国^[24]等不同尺度开展了研究。在华北地区的相关研究中^[27-29], 由于研究区相对较小、水资源的年际变异性, 已有研究结果在区域应用方面具有一定的局限。在华北区域层面上, Zhong 等^[47]提出通过调整农作物种植制度来维持区域粮食生产水平和恢复当地地下水位, 但河北地区小麦大面积休耕可能会对粮食安全带来影响, Zhong 等^[48]的研究结果也显示了类似的局限性。由于气候特征、土壤属性、农业生产、作物耗水等因素的空间异质性, 获取完善的区域尺度农作物种植优化具有一定的挑战, 基于田间试验寻找区域层面的最优解决方案也由于其耗时耗力而降低了可行性^[49]。本文聚焦于华北地区面临的“水粮”矛盾, 以生产和耗水为主要权衡目标, 以种植广泛、灌溉密集的小麦为研究对象, 建立面向种植面积和种植格局优化的目标规划模型, 通过综合考虑小麦生产、耗水和灌溉水资源等因素, 研究思路和研究结果可为区域农作物种植优化提供一定参考。

当前, 针对华北地区的水资源短缺现状, 多数地

区颁布了相关法律法规, 旨在通过制定地下水压采目标等实现水资源的可持续利用。从调整小麦种植面积压采地下水的角度出发, 本文中不同灌溉约束水平下的小麦种植面积优化结果为一定地下水压采目标 (即本文中的灌溉减少量) 下的小麦种植格局优化提供了优化方向和优化区域方面的参考。此外, 地下水压采目标通常是正常供水条件下或多年平均供水条件下的压采目标。丁跃元等^[50]指出, 枯水年灌溉会增加, 相应的压采目标应该降低; 反之, 丰水年灌溉需求会减少, 相应的压采目标应增加, 这也是地下水“调丰补枯”特点的具体表现。然而, 根据本文分析结果, “枯水年小麦蒸散量高、灌溉需求大, 丰水年小麦蒸散量低、灌溉需求小”, 从“适应降水种植”的角度考虑, 应该探讨“丰水年多种, 枯水年少种”的种植策略。此外, 当小麦生育期降水条件较好时 (如平水年和丰水年), 较高的灌溉节水目标会带来较大的小麦减产, 尽管作物蒸散量耗水也会减少, 但从“适水种植”的角度考虑, 也应该考虑“多水年多种, 少水年少种”, 并根据各年降水情况确定地下水压采目标。

本文也存在一些不足之处, 例如, 在没有精确小麦空间分布数据的情况下, 提取旱地像元的蒸散量来代表小麦蒸散量, 尽管华北地区的小麦生长季基本没有其他作物生长, 但后续研究中规划模型的数据输入需要进一步优化。

5 结论

无论是现状灌溉水平还是灌溉约束下, 华北地区的小麦总产量有进一步提升的潜力、小麦蒸散量有进一步减少的潜力, 其中在现状灌溉水平下, 优化后的小麦总产量最多可提升 1.2%~2.3%, 优化后的小麦蒸散量最多可减少 0.4%~0.8%, 在灌溉约束下, 小麦总产量减少量可以比灌溉减少量最多低 3.1%, 蒸散耗水量减少量可以比灌溉减少量最多高 1.4%。在同一灌溉水平下, 当产量权重降低、蒸散量权重增加时, 能维持较高小麦种植规模的区域呈现规律性的空间转移, 体现了不同县域在发挥小麦生产或耗水管理方

面的优势。此外, 由于小麦蒸散量和灌溉需水均呈“枯水年最多、平水年次之、丰水年最少”的显著性差异 ($p < 0.05$), 从“适应降水种植”的角度考虑, 应该探讨“多水年多种、少水年少种”的小麦种植策略。若从调整小麦种植面积以实现地下水压采的角度考虑, 地下水压采目标的设定应该考虑不同降水年型带来的影响。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] SHIFERAW B, SMALE M, BRAUN H J, et al. Crops that feed the world 10. Past successes and future challenges to the role played by wheat in global food security[J]. Food Security, 2013, 5(3): 291-317.
- [2] WU X C, XIAO X M, STEINER J, et al. Spatiotemporal changes of winter wheat planted and harvested areas, photosynthesis and grain production in the contiguous United States from 2008—2018[J]. Remote Sensing, 2021, 13(9): 1 735.
- [3] DARKO R O, YUAN S Q, HONG L, et al. Irrigation, a productive tool for food security: A review[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science, 2016, 66(3): 191-206.
- [4] MALEK K, REED P, ADAM J, et al. Water rights shape crop yield and revenue volatility tradeoffs for adaptation in snow dependent systems[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3 473.
- [5] KHEIR A M S, ALRAJHI A A, GHONEIM A M, et al. Modeling deficit irrigation-based evapotranspiration optimizes wheat yield and water productivity in arid regions[J]. Agricultural Water Management, 2021, 256: 107 122.
- [6] ZHAO Z, HUANG X, XU J. The effects of irrigation on wheat yield on a global scale[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(3): 335-342.
- [7] TACK J, BARKLEY A, HENDRICKS N. Irrigation offsets wheat yield reductions from warming temperatures[J]. Environmental Research Letters, 2017, 12(11): 114 027.
- [8] ZAVERI E, LOBELL D B. The role of irrigation in changing wheat yields and heat sensitivity in India[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4 144.
- [9] WANG X H, MÜLLER C, ELLIOT J, et al. Global irrigation contribution to wheat and maize yield[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 1 235.
- [10] LIANG H, QIN W, HU K L, et al. Modelling groundwater level dynamics under different cropping systems and developing groundwater neutral systems in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 732-741.
- [11] VAN OORT P A J, WANG G, VOS J, et al. Towards groundwater neutral cropping systems in the Alluvial Fans of the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2016, 165: 131-140.
- [12] WANG S Q, HU Y K, YUAN R Q, et al. Ensuring water security, food security, and clean water in the North China Plain—conflicting strategies[J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2019, 40: 63-71.
- [13] JIANG Y L, WANG X H, TI J S, et al. Assessment of winter wheat water-saving potential in the groundwater overexploitation district of the North China Plain[J]. Agronomy Journal, 2020, 112(1): 44-55.
- [14] SU G L, WU Y Q, ZHAN W, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of land subsidence caused by groundwater depletion in the North China plain during the past six decades[J]. Journal of Hydrology, 2021, 600: 126 678.
- [15] BANJARA T R, BOHRA J S, KUMAR S, et al. Sustainable alternative crop rotations to the irrigated rice-wheat cropping system of Indo-Gangetic Plains of India[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2022, 68(11): 1 568-1 585.
- [16] XIAO D P, LIU D L, FENG P Y, et al. Future climate change impacts on grain yield and groundwater use under different cropping systems in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2021, 246: 106 685.
- [17] EMAMI F, KOCH M. Agricultural water productivity-based hydro-economic modeling for optimal crop pattern and water resources planning in the zarrine river basin, Iran, in the wake of climate change[J]. Sustainability, 2018, 10(11): 3 953.
- [18] LIU X, GUO P, LI F H, et al. Optimization of planning structure in irrigated district considering water footprint under uncertainty[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 210: 1 270-1 280.
- [19] OSAMA S, ELKHOLY M, KANSO R M. Optimization of the cropping pattern in Egypt[J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, 56(4): 557-566.
- [20] LUO J M, SHEN Y J, QI Y Q, et al. Evaluating water conservation effects due to cropping system optimization on the Beijing-Tianjin-Hebei plain, China[J]. Agricultural Systems, 2018, 159: 32-41.
- [21] XIAO D P, SHEN Y J, QI Y Q, et al. Impact of alternative cropping systems on groundwater use and grain yields in the North China Plain Region[J]. Agricultural Systems, 2017, 153: 109-117.
- [22] SUN Q P, KRÖBEL R, MÜLLER T, et al. Optimization of yield and water-use of different cropping systems for sustainable groundwater use in North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(5): 808-814.
- [23] REN D D, YANG Y H, HU Y K, et al. Evaluating the potentials of cropping adjustment for groundwater conservation and food production in the piedmont region of the North China Plain[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021, 35(1): 117-128.
- [24] ZHANG L J, YIN X A, XU Z H, et al. Crop planting structure optimization for water scarcity alleviation in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2016, 20(3): 435-445.
- [25] GONG X H, ZHANG H B, REN C F, et al. Optimization allocation of irrigation water resources based on crop water requirement under considering effective precipitation and uncertainty[J]. Agricultural Water Management, 2020, 239: 106 264.
- [26] PEI W, GUO X Y, REN Y T, et al. Study on the optimization of staple crops spatial distribution in China under the influence of natural disasters[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123 548.
- [27] 王璐, 杜雄, 王荣, 等. 基于 NSGA-II 算法的白洋淀上游种植结构优化[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1 370-1 383.
- [28] WANG Lu, DU Xiong, WANG Rong, et al. Optimization of the planting structure in the upstream region of Baiyangdian Lake based on the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II)[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(8): 1 370-1 383.
- [29] 胡洪静, 吴鑫淼, 齐成伟, 等. 节水压采区农业种植结构多目标优化研究: 以衡水市为例[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 95-99.
- [30] HU Hongjing, WU Xinmiao, QI Chengwei, et al. Using multi-objective optimization to restructure agriculture with consideration of the constraints on groundwater extraction: Taking Hengshui as an example[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(10): 95-99.
- [31] ZHANG Z Y, MA H Y, LI Q G, et al. Agricultural planting structure optimization and agricultural water resources optimal allocation of Yellow River Irrigation Area in Shandong Province[J]. Desalination and Water Treatment, 2014, 52(13/14/15): 2 750-2 756.
- [32] KONG X B, ZHANG X L, LAL R, et al. Groundwater depletion by agricultural intensification in China's HHH Plains, since 1980s[J]. Advances in Agronomy, 2016, 135: 59-106.
- [33] REN P P, HUANG F, LI B G. Spatiotemporal patterns of water consumption and irrigation requirements of wheat-maize in the Huang-Huai-Hai Plain, China and options of their reduction[J]. Agricultural Water Management, 2022, 263: 107 468.
- [34] SU Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6(1): 85-100.
- [35] ZHANG X Y, CHEN S Y, SUN H Y, et al. Changes in evapotranspiration over irrigated winter wheat and maize in North China Plain over three decades[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6): 1 097-1 104.
- [36] ZHAO J, ZHANG X P, YANG Y D, et al. Alternative cropping systems for groundwater irrigation sustainability in the North China Plain[J].

- Agricultural Water Management, 2021, 250: 106-867.
- [35] 牛凯. 中国农业结构调整的多目标线性规划模型研究[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(4): 840-846.
- NIU Kai. Studies of multi-objective linear programming model on Chinese agricultural structure adjustment[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(4): 840-846.
- [36] 王涛, 吕昌河. 基于合理膳食结构的人均食物需求量估算[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 273-277.
- WANG Tao, LYU Changhe. Estimation of food grain demand per capita based on rational dietary pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 273-277.
- [37] UMAIR M, HUSSAIN T, JIANG H B, et al. Water-saving potential of subsurface drip irrigation for winter wheat[J]. Sustainability, 2019, 11(10): 2 978.
- [38] MENG Q F, SUN Q P, CHEN X P, et al. Alternative cropping systems for sustainable water and nitrogen use in the North China Plain[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012, 146(1): 93-102.
- [39] SUN H Y, ZHANG X Y, LIU X J, et al. Impact of different cropping systems and irrigation schedules on evapotranspiration, grain yield and groundwater level in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2019, 211: 202-209.
- [40] KATO Y, HENRY A, FUJITA D, et al. Physiological characterization of introgression lines derived from an indica rice cultivar, IR64, adapted to drought and water-saving irrigation[J]. Field Crops Research, 2011, 123(2): 130-138.
- [41] REN Y J, GAO C, HAN H F, et al. Response of water use efficiency and carbon emission to no-tillage and winter wheat genotypes in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2018, 635: 1 102-1 109.
- [42] WANG X, LI X B, XIN L J, et al. Ecological compensation for winter wheat abandonment in groundwater over-exploited areas in the North China Plain[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(10): 1 463-1 476.
- [43] KARAMOUIZ M, AHMADI B, ZAHMATKESH Z. Developing an agricultural planning model in a watershed considering climate change impacts[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(4): 349-363.
- [44] RAFIEE V, SHOURIAN M. Optimum multicrop-pattern planning by coupling SWAT and the harmony search algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2016, 142(12): 4 016 063.
- [45] SINGH A. Optimal allocation of resources for increasing farm revenue under hydrological uncertainty[J]. Water Resources Management, 2016, 30(7): 2 569-2 580.
- [46] ZHANG F, LI M, GUO S S, et al. Integrated uncertain models for runoff forecasting and crop planting structure optimization of the Shiyang River Basin, North-West China[J]. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 2018, 5(2): 177-187.
- [47] ZHONG H L, SUN L X, FISCHER G, et al. Mission Impossible? Maintaining regional grain production level and recovering local groundwater table by cropping system adaptation across the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2017, 193: 1-12.
- [48] ZHONG H L, SUN L X, FISCHER G, et al. Optimizing regional cropping systems with a dynamic adaptation strategy for water sustainable agriculture in the Hebei Plain[J]. Agricultural Systems, 2019, 173: 94-106.
- [49] XU L F, HUANG Z S, YANG Z Z, et al. Optimization study on spatial distribution of rice based on a virtual plant approach[J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0 243 717.
- [50] 丁跃元, 陈飞, 李原园, 等. 华北地区地下水超采综合治理行动方案编制背景及思路[J]. 中国水利, 2020(13): 22-25.
- DING Yueyuan, CHEN Fei, LI Yuanyuan, et al. Compiling background and ideas of the action plan for comprehensive treatment of groundwater overexploitation in North China[J]. China Water Resources, 2020(13): 22-25.

Optimizing Wheat Planting Pattern to Balance Wheat Production and Its Water Consumption

REN Pinpin¹, LI Baoguo^{1,2,3}, HUANG Feng^{1,2,3*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China;

3. Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, Beijing 100193, China)

Abstract: 【Objective】 Wheat is the most important crop in North China. However, the scarcity of freshwater resources in this region cannot sustain its production. Optimizing wheat planting area to balance wheat production and its water requirement is hence essential to conserving irrigation water and alleviating water shortage pressure .

【Method】 Evapotranspiration and wheat yield were used as indicators to establish the objective of the wheat planting areas at county scale in the region. Optimization for wheat production was established from the trade-off between wheat production and its water consumption. **【Result】** From 2001 to 2009, evapotranspiration in the wheat season exhibited an increasing trend, followed by a significant decrease from 2010 to 2018 ($p<0.05$). Moreover, evapotranspiration in the wheat season showed significant variation among different hydrological years, characterized by the highest level in dry years, followed by normal years, and the lowest level was in wet years. Under current irrigation levels, keeping wheat production weight and evapotranspiration weight both at 1 can increase wheat yield by 1.2% to 2.3% and reduce evapotranspiration by 0.4% to 0.8% across the province. Similar results were also obtained at municipal scale, with the yield increasing by 0.7% to 1.6% and evapotranspiration reduced by 0.3% to 0.5%, under the same production and evapotranspiration level. It was found that under the same irrigation levels, reducing production weight combined with an increase in evapotranspiration weight shifts the regions that can maintain high wheat production from the south to the north in Hebei province. This reflects the variations in wheat production and its water consumption between different counties. **【Conclusion】** Under current irrigation level or imposing constraint to irrigation, optimizing wheat planting area at county scale in North China can increase yield and reduce evapotranspiration. Our results provide valuable insights into optimization of wheat planting patterns to balance the trade-off between wheat production and water consumption.

Key words: wheat planting; regional optimization; trade-off between production and water consumption; irrigation constraint

责任编辑: 赵宇龙