

中国主要作物格局优化下的水资源效应分析

刘子源^{1,2}, 赵晓丽¹, 左丽君¹, 张增祥¹, 汪 潇¹, 徐进勇¹, 易 玲¹

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水土资源是农业生产发展不可或缺的重要资源。然而, 水资源时空分布不均匀、与耕地分布不匹配已成为影响中国农业可持续发展的关键问题。本文基于现有耕地, 面向粮食生产保障与水资源可持续利用的协同, 以保障粮食产量的同时减少水资源消耗、降低区域水资源压力为目标, 基于像元尺度作物产量、用水量、区域水资源压力等数据, 采用CPLEX优化模型, 开展中国主要作物(大豆、水稻、玉米、小麦)格局优化, 并从作物用水效率和水资源压力两方面分析其水资源效应。结果表明: ① 保证产量不变的前提下进行分省作物格局优化, 最多可减少用水总量 $3.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (降幅为 9.60%), 平均基线水压力从 1.42 降至 0.90, 播种面积可缩减 $3.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (降幅为 3.29%); ② 不同作物优化方向不一, 大豆在东北区北部和黄淮海区南部应调减, 水稻主要在长江中下游区和华南区中部进行格局调整, 玉米整体向东北方向转移, 主要在东北区和黄淮海区内部调整, 而小麦主要在黄淮海区与长江中下游区北部进行调整; ③ 作物协同优化下, 小麦灌溉耗水可减少 3.08%, 其余 3 种作物减少幅度在 20%~30%, 水稻灌溉耗水减少量最大 ($8.52 \times 10^9 \text{ m}^3$); ④ 不同省份作物格局优化对区域水资源的影响有所不同, 黑龙江、新疆、内蒙古和安徽四省(区)作物格局优化对灌溉耗水减少量的贡献最大, 四川、甘肃和山东则主要体现为作物向水资源压力更小的区域转移, 但灌溉总耗水量有小幅增加。本文可为农业生产中的水土资源可持续利用提供决策建议和技术支撑。

关键词: 水资源; 主要作物; 格局优化; 优化尺度

DOI: 10.11821/dlxb202303015

1 引言

水资源是农业发展的基本生产资料^[1-4], 统计数据显示, 中国农业用水占总用水量的 62.5%^[5]。然而, 中国水土资源匹配状况不容乐观, 80%的水资源服务约 23%的耕地, 水土资源本底匹配基尼系数达 0.712, 空间分布严重错位^[1]。“北方地多水少、南方地少水多”的实际情况, 使水资源与粮食生产格局严重不匹配^[6-8], 成为中国农业发展的限制性因素^[9]。近年来, 中国粮食生产重心不断北移^[10-12], 水土资源不匹配问题日趋严重^[13-15]。在现有水土资源状态下, 如何改进农业生产管理, 促进水资源合理使用, 提高粮食生产用水效率, 对于保障粮食安全和水资源可持续利用至关重要^[16-17]。

提高田块灌溉用水利用效率和优化作物整体空间格局, 是提升粮食生产用水效率的两个主要途径^[18]。前者已在节水灌溉技术改进^[19-20]、地膜覆盖^[21]、氮肥^[22-23]和生物炭^[24]的适

收稿日期: 2022-06-09; 修订日期: 2023-02-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19090119) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA19090119]

作者简介: 刘子源(1998-), 男, 黑龙江大庆人, 硕士生, 主要从事作物格局优化研究。

E-mail: liuziyuan20@mailsucas.ac.cn

通讯作者: 左丽君(1982-), 女, 江西上高人, 博士, 副研究员, 主要从事土地利用变化遥感监测、土地利用变化对粮食安全和生态系统的影响等研究。E-mail: zuolj@aircas.ac.cn

度添加等方面进行探索，研究较为丰富^[25-27]；后者则相对较少，虽然有大量开展作物格局优化的相关研究，但其如何对区域水资源产生影响的相关研究几乎没有。目前，国内外学者针对作物格局优化的研究主要分为基于适宜性评价和基于历史时空动态变化规律。基于适宜性评价方面，Branco等^[28]根据农业发展潜力评价结果，应用网络平衡模型对巴西新增大豆和玉米种植面积总量在相关州进行优化分配，以实现经济利益最大化和温室气体排放最小化的目标。柯新利等^[29]基于耕地适宜性评价结果，采用元胞自动机模型对武汉城市圈耕地进行格局优化，以实现保障粮食安全同时释放耕地非农化压力的目的。基于历史时空动态变化方面，王秋香^[30]对佛山市耕地利用变化驱动机制进行分析，并引入SLEUTH模型对建设用地发展优先、耕地保护优先以及两者兼顾的3种情景进行耕地格局优化模拟，以求在“吃饭”和“建设”中寻求平衡。

总体来说，现有关于作物格局或粮食生产格局优化的研究多面向粮食增产或综合社会经济效益，尺度多聚焦于市级与省级，全国视角下作物格局优化对区域水资源的影响仍不清楚。此外，已有研究多是基于耕地现有状况，而未考虑作物生产过程中因种类不同带来的差异，少数研究即使考虑作物类型，使用的也多以行政单元为单位而非像元尺度，对格局优化的阐述作用有限。基于上述考虑，本文面向粮食生产保障与水资源可持续利用的协同，在现有耕地上，以保障粮食产量同时减少水资源消耗、降低区域水资源压力为目标，采用像元尺度作物产量、用水量、区域水资源压力等数据，对中国主要作物（大豆、水稻、玉米、小麦）进行格局优化，并从作物用水效率和水资源压力两方面开展水资源效应分析。本文通过采用区分作物种类的差异化评估，充分考虑因作物种类不同而导致的环境需求和影响不同，使研究更具针对性；同时，讨论了不同优化实施尺度（全国统一优化、分农业区优化、分省优化）对结果的影响，为探讨作物格局优化下水资源效应分析提供了较为全面的视角。

2 数据与方法

2.1 研究对象与数据来源

本文以中国省级行政区（由于数据缺失，暂未含港澳台地区）为研究对象，主要作物种类包括大豆、水稻、玉米和小麦4种。研究数据主要包括2015年的耕地面积^[31]、作物播种面积^[31]、复种空间分布^[32]、作物单位产量^[31]、基线水压力^[33]、作物用水量、灌溉耗水量^[31]、分县作物灌溉面积比例^[31]（表1）。

表1 数据来源
Tab. 1 Data sources

数据	类型	精度	来源
耕地面积	栅格数据	10 km	中国科学院空天信息创新研究院 中国1:10万土地利用遥感监测数据库
基线水压力	矢量数据		World Resources Institute
复种空间分布	矢量数据		Zuo等方法 ^[32]
作物单位产量(4种)	栅格数据	10 km	Zuo等方法 ^[31]
作物播种面积(4种)	栅格数据	10 km	Zuo等方法 ^[31]
分县作物灌溉面积比例(4种)	矢量数据		Zuo等方法 ^[31]
作物用水量、灌溉耗水量(4种)	栅格数据	10 km	Zuo等方法 ^[31]

2.2 水资源影响评估体系建立

本文基于现有耕地,考虑粮食生产保障和水资源可持续利用的协同,从水资源本底情况、粮食生产的水资源利用情况和水资源利用与粮食产量的关系3个方面考虑,采用基线水压力(总取水量与可用可再生地表水量的比率^[33])和作物用水效率(作物单位产量用水量)两个指标来评估粮食生产与水资源利用的协同。使用基线水压力数据作为环境本底确定权重,使用作物用水效率作为粮食生产保障和水资源利用协同的评价指标。为解决指标之间数量级、量纲和正负差异问题,本文用线性模糊隶属度函数对数据进行无量纲化处理^[34-36],然后加权求和计算各作物在各像元种植时对水资源的影响。

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

$$E_{ij} = K_{ij} W_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: X' 为标准化得分值; X 为指标统计值; X_{\max} 和 X_{\min} 分别为指标统计值 X 的 5% 和 95% 分位数; E_{ij} 为 j 作物在第 i 个像元水资源影响评价得分值; K_{ij} 为 j 作物在第 i 个像元参评指标得分值; W_{ij} 为 j 作物在第 i 个像元参评指标的权重值; n 为参评的像元总数。

作物的总用水量分为灌溉农田灌溉用水量和降雨使用量,以及雨养农田用水量,计算表达式如下:

$$TW_j = IW_j + IRrain_j + NIRrain_j \quad (3)$$

$$IRrain_j = IrriRain_j \times HA_j \times IrriRate_j \quad (4)$$

$$NIRrain_j = NIrriRain_j \times HA_j \times (1 - IrriRate_j) \quad (5)$$

式中: TW_j 为 j 作物的总用水量; IW_j 为 j 作物的灌溉农田灌溉用水量; $IRrain_j$ 为 j 作物的灌溉农田降雨使用量; $NIRrain_j$ 为 j 作物的雨养农田用水量; $IrriRain_j$ 为 j 作物的灌溉农田单位播种面积降雨使用量; HA_j 为 j 作物播种面积; $IrriRate_j$ 为 j 作物灌溉面积比例; $NIrriRain_j$ 为 j 作物的雨养农田单位播种面积降雨使用量。

$$TW_yield_j = \frac{TW_j}{Pro_j} \quad (6)$$

式中: TW_yield_j 为 j 作物单位产量用水量; TW_j 为 j 作物总用水量; Pro_j 为 j 作物总产量。

2.3 基于规划目标优化作物的格局方法

CPLEX 是一种用于提高效率、快速实现策略的数学优化技术^[37],能提供灵活的高性能优化程序,解决线性规划、二次方程规划、二次方程约束规划和混合整数规划问题。本文利用 Python 语言调用 CPLEX 优化模型,对全国、农业区和省域三种优化实施尺度下依次进行作物格局优化模拟。考虑到作物种植的地域化特点,局地格局调整更具现实意义,因此本文以作物的分省格局优化结果为主进行分析讨论,并对不同优化实施尺度的模拟结果进行对比。优化过程中,将产量不降低且高效利用耕地作为约束条件,水资源影响最小化作为目标条件。

2.3.1 目标函数的确定 本文以作物生产的水资源消耗和区域水资源压力最小化为优化目标,函数表达式如下:

$$\text{Max} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n C_{ij} E_{ij} P_{ij} \quad (7)$$

式中: C_{ij} 表示 j 作物第 i 个像元的决策结果(是否选择); E_{ij} 表示 j 作物第 i 个像元的

水资源影响评价得分值； P_{ij} 表示 j 作物在第 i 个像元种植时的产量； n 为区域内像元总数； m 为作物种数。

2.3.2 约束函数的选取 本文是基于作物产量不降低、高效利用现有耕地的前提下进行的优化，因此约束条件分别为各作物产量不降低和复种合理并最大化；

(1) 各作物产量不降低：

$$\sum_i^n C_{ij}P_{ij} \geq Pro_j, \quad j=1, 2, 3, 4 \tag{8}$$

式中： C_{ij} 为 j 作物第 i 个像元的决策结果（是否选择）； P_{ij} 为 j 作物在第 i 个像元种植时的产量； Pro_j 为区域内 j 作物的原有产量； n 为区域内像元总数。

(2) 复种合理并最大化：

基于各种植区域内作物的可复种模式^[38]，采取复种最大化的方式分配作物种植面积。

2.4 优化效应评价指标

2.4.1 水资源利用情况 本文使用总用水量、单位产量总用水量、灌溉耗水和平均基线水压力4个指标分析作物水资源利用情况，并以此描述优化效果。平均基线水压力的计算表达式如下：

$$\overline{BWS}_j = \frac{\sum_{i=1}^n BWS_{ij} \times P_{ij}}{\sum_{i=1}^n P_{ij}} \tag{9}$$

式中： \overline{BWS}_j 为 j 作物的平均基线水压力； BWS_{ij} 为 j 作物第 i 个像元的基线水压力值； P_{ij} 为 j 作物在第 i 个像元种植时的产量； n 为区域内像元总数。

2.4.2 作物种植最小耕地面积 本文的作物格局优化是在有限的耕地上，以粮食产量不降低的同时作物生产水资源影响最小化为原则开展，力求提高复种来减小耕地使用面积。因此在相应复种区域内充分考虑4种作物的复种模式，以计算现有状况作物种植的最小耕地面积（表2）并在后续计算其优化效果。

表2 现状耕地面积计算公式
Tab. 2 Calculation formula of cropland area in current situation

种植区划 ^[38]	计算表达式
单作区	SUM(所有作物)
北方双熟区1	Max(冬小麦, 中稻+玉米)+其余作物
北方双熟区2	Max(冬小麦, 大豆+玉米)+其余作物
南方双熟区	Max(冬小麦, 大豆+早稻+中稻+晚稻+玉米)+其余作物
南方三熟区1	Max(冬小麦, 中稻+Max((大豆+玉米+早稻+晚稻)/2), Max(大豆, 玉米, 早稻, 晚稻))+其余作物
南方三熟区2	Max(冬小麦, 中稻+Max((大豆+玉米+早稻+晚稻)/2), Max(大豆, 玉米, 早稻, 晚稻))+其余作物

3 结果与分析

3.1 优化概况

分省对4种主要作物进行格局优化，优化使得作物普遍从水压力大的区域向水压力小的区域转移，作物平均水压力降低36.38%（表3）。优化后总用水量减少 $3.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （降幅为9.60%）；灌溉耗水量减少 $1.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （降幅为19.01%）；平均基线水压力从1.42降至0.90。播种面积变化幅度较小，由优化前 $9.35 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 降至 $9.05 \times 10^7 \text{ hm}^2$ （降幅为

表3 优化前后各指标变化情况

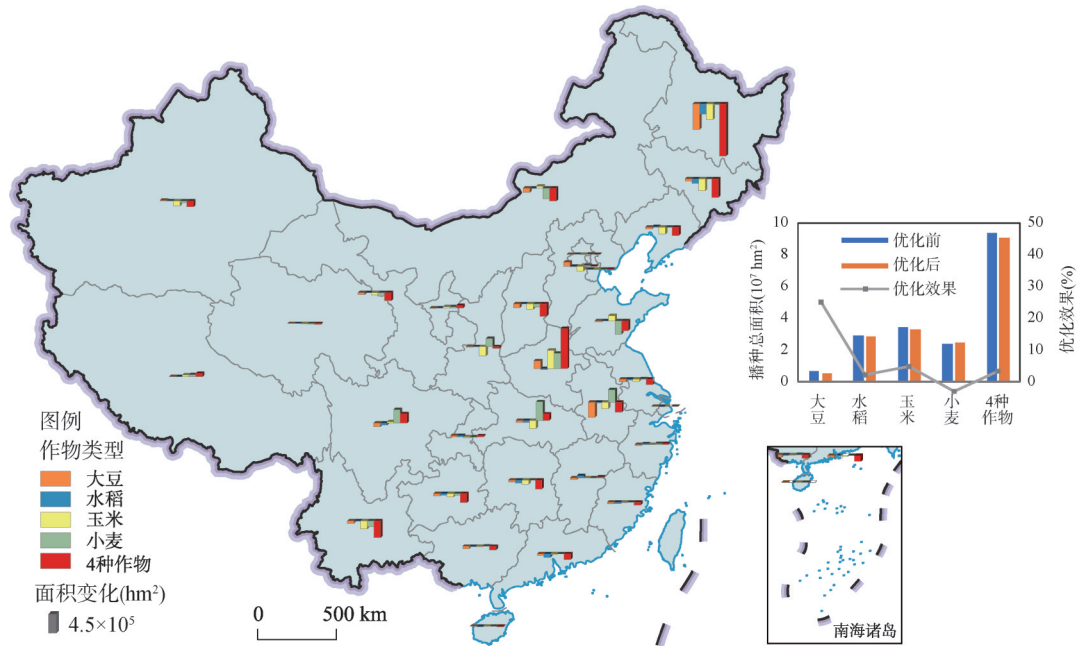
Tab. 3 Changes of each indicator before and after optimization

	用地总面积(hm ²)	播种总面积(hm ²)	总用水量(m ³)	总灌溉耗水量(m ³)	平均基线水压力
优化前	7.04×10 ⁷	9.35×10 ⁷	3.78×10 ¹¹	8.19×10 ¹⁰	1.42
优化后	6.11×10 ⁷	9.05×10 ⁷	3.42×10 ¹¹	6.63×10 ¹⁰	0.90
优化效果(%)	13.14	3.29	9.60	19.01	36.38

3.29%)。理想情况下,4种作物用地总面积由7.04×10⁷ hm² (优化前后均假设4种作物以最大复种模式种植时所占用的最小耕地面积)降至6.11×10⁷ hm²,降幅13.14%。

3.2 作物格局优化方向

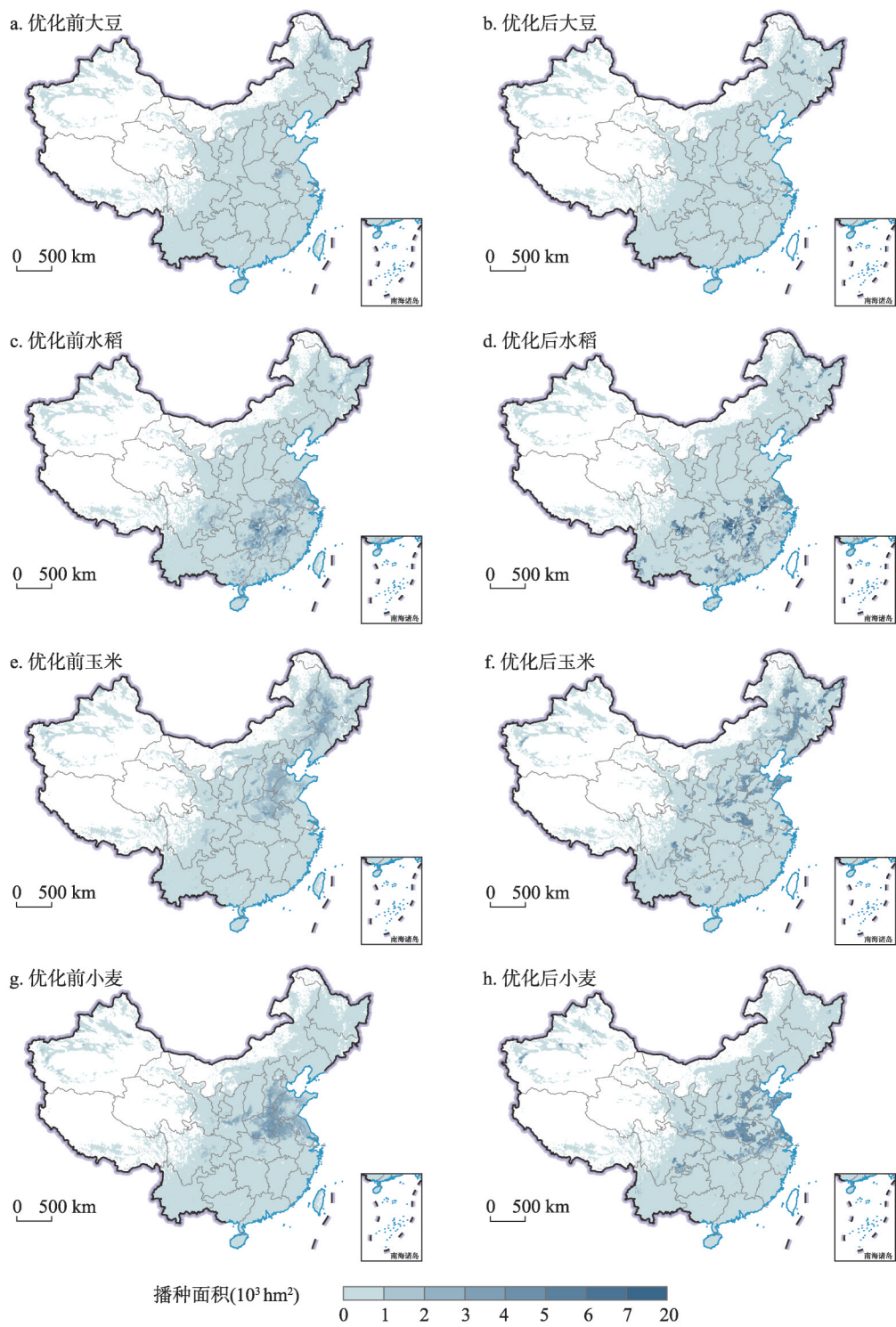
在保证已有产量同时提升水资源效应的前提下,4种作物中,大豆的优化幅度最大,有1.57×10⁶ hm²的缩减空间(图1),占现有大豆播种总面积的24.89%。大豆在东北区北部和黄淮海区南部可适当调减,其缩减空间最大的黑龙江省(6.06×10⁵ hm²)和安徽省(3.60×10⁵ hm²)分别由松嫩平原北部、华北平原南部向三江平原北部、松嫩平原中部和长江中下游平原中部转移(图2)。水稻主要在长江中下游区和华南区进行格局调整,即长江中下游区的江苏、安徽、湖北省向长江两侧聚集,湖南省的洞庭湖平原和沅江流域分布增多,江西省则转移至赣江两侧,华南区多向两广丘陵中部聚拢,水稻布局优化可缩减播种面积6.70×10⁵ hm² (降幅为2.29%)。玉米整体向东北方向转移,主要在东北区和黄淮海区进行调整,优化可缩减播种空间1.60×10⁶ hm² (降幅为4.65%),播种面积优化空间最大的黑龙江省(3.72×10⁵ hm²)和吉林省(2.85×10⁵ hm²)主要向松嫩平原中部和三江平原北部转移。小麦在维持现有产量的前提下,基于区域水压力和作物产量间的权



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号标准地图制作,底图边界无修改;港澳台数据暂缺;柱状图向上表示面积增加,向下表示面积减少。

图1 优化后各省份主要作物播种面积变化

Fig. 1 Changes of sown area in each province after optimization



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改；港澳台数据暂缺。

图2 优化前后作物播种面积空间分布

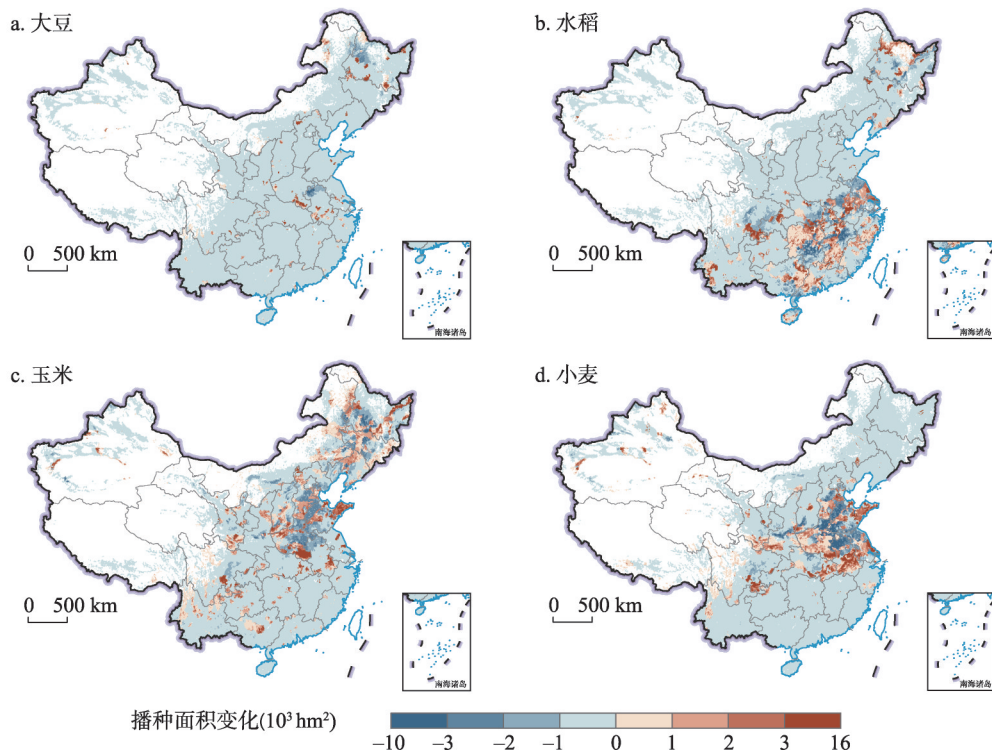
Fig. 2 Distribution of crop sown area before and after optimization

衡, 播种面积需增加 $7.62 \times 10^5 \text{ hm}^2$ (增幅为 3.25%)。布局调整使得小麦在湖北、安徽、河南、四川省的播种面积较优化前轻微上升 (增幅为 4.29%), 与优化前相比, 总用水量下降 4.25%, 平均单位产量基线水压力降低 59.09%, 水资源状况得到显著改善。

3.3 作物格局优化的水资源效应分析

3.3.1 作物总用水量影响分析 作物格局优化使得 25 个省份总用水量减少 (图 4), 6 个省份总用水量增加, 总用水量净减少 $3.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (降幅达 9.60%)。25 个省份总用水量共减少 $3.71 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 其中黑龙江、安徽和云南三省的总用水量减少最多, 可减少 $1.73 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 占总减少量的 46.56%。其余 6 个省份总用水量共增加 $8.15 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河南、湖北和重庆三省份的总用水量变化明显, 占总增加量的 93.46%。4 种作物中, 格局优化使得水稻总用水量减少最多, 为 $1.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (占总降幅的 48.21%); 小麦总用水量不减反增, 约增加 $4.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ (增幅为 0.59%), 主要因为本文采用 4 种作物协同优化, 优化过程中存在其他作物与小麦的权衡以保障整体水资源效应最优。

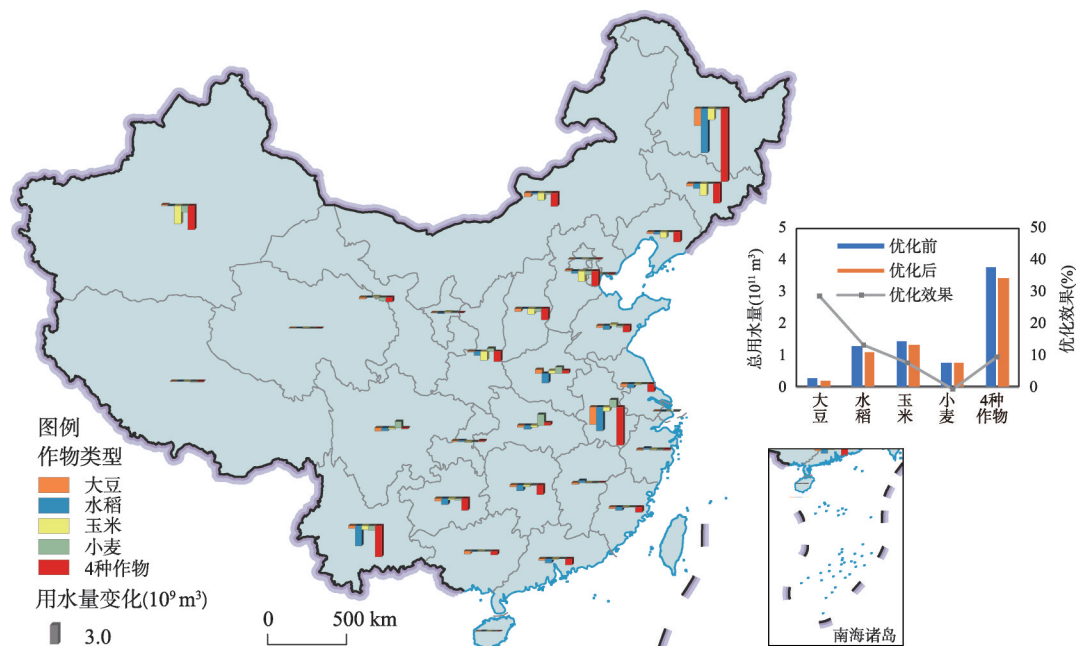
东北区的总用水量主要集中在三江平原北部 (水土资源优良)、松嫩平原中部, 松嫩平原北部工业和生活用水量大^[33], 因此将作物适当迁移可缓解局部区域用水紧张的问题。黄淮海区虽是中国重要的粮仓^[39-40], 但存在水资源短缺^[41]、小麦需水关键期与降水不匹配等多种问题, 导致其地下水采补失衡并面临严重的地下水位下降问题^[42], 优化后作物总用水量向山东半岛 (降雨量大, 生活、工业用水量小) 和黄河流域附近 (水压力较小) 集中^[43], 通过格局调整将使作物转移至水资源丰富区域, 减少地下水灌溉量, 缓解地下水位下降。长江中下游区北部的安徽和江苏等省份, 优化后作物总用水量南移, 集



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1823 号标准地图制作, 底图边界无修改; 港澳台数据暂缺。

图 3 优化后播种面积空间变化

Fig. 3 Spatial variation of sown area after optimization



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改；港澳台数据暂缺；柱状图向上表示用水量增加，向下表示用水量减少。

图4 优化后各省份总用水量变化

Fig. 4 Changes of total water consumption in each province after optimization

中在长江流域周边（作物单产用水量低，区域水压力较小）。整体来看，作物在优化后普遍从低密度的广覆盖模式转为多点聚集状态，即向该作物用水效率较高且水资源压力较小的地方聚集。

格局优化将提升作物生产的总体水分利用效率，使作物的平均单位产量总用水量从 $49.46 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 降至 $44.72 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 。若将作物单位产量总用水量分成6个等级（图5），大豆在布局调整的过程中有27.22%产量的用水量从 $\geq 75 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 向 $45\sim 75 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 的地块转移，总用水量大幅减少。14.47%水稻的用水量从 $\geq 45 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 向 $0\sim 45 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 的地块转移，玉米则有7.65%的产量从 $30 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 以上的地块向 $0\sim 30 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 地块转移。小麦用水量在 $0\sim 15 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 的地块有3.64%的提升，但有7.47%的产量向 $\geq 45 \text{ m}^3/\text{GJ}$ 的地块转移，因此小麦整体的总用水量呈小幅增加状况。总体来说，大豆单位产量总用水量最高，为 $131.81 \text{ m}^3/\text{GJ}$ ，优化后降至 $93.73 \text{ m}^3/\text{GJ}$ ，但仍为其余作物两倍之多。

3.3.2 作物灌溉耗水量影响分析 作物格局优化使得灌溉耗水量在25个省份有所减少，减量为 $1.65 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （图6），其中黑龙江、新疆、内蒙古和安徽四省的灌溉耗水总量减少最多，为 $9.73 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占减少总量的58.98%。其余6个省份优化后灌溉耗水总量有所增加，约为 $9.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，主要分布在四川、甘肃和山东三省，占88.10%；其中甘肃和山东省总体属于较为缺水地区，优化后灌溉耗水量在数值上虽有小幅增加，但作物更多分布于区域水压力较低的地块（灌溉耗水量较优化前分别增加13.64%与1.19%；基线水压力分别降低35.98%和58.46%），综合来看优化仍具有积极意义。

总体来看，播种面积分布广且灌溉耗水量大的区域，格局优化带来的耗水减量也最大（图7）。大豆在播种最广的安徽和黑龙江境内优化效果最显著，可减少灌溉耗水 $4.47 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占大豆优化后减少总量的49.89%。水稻在灌溉耗水量消耗最大的黑龙江省减量

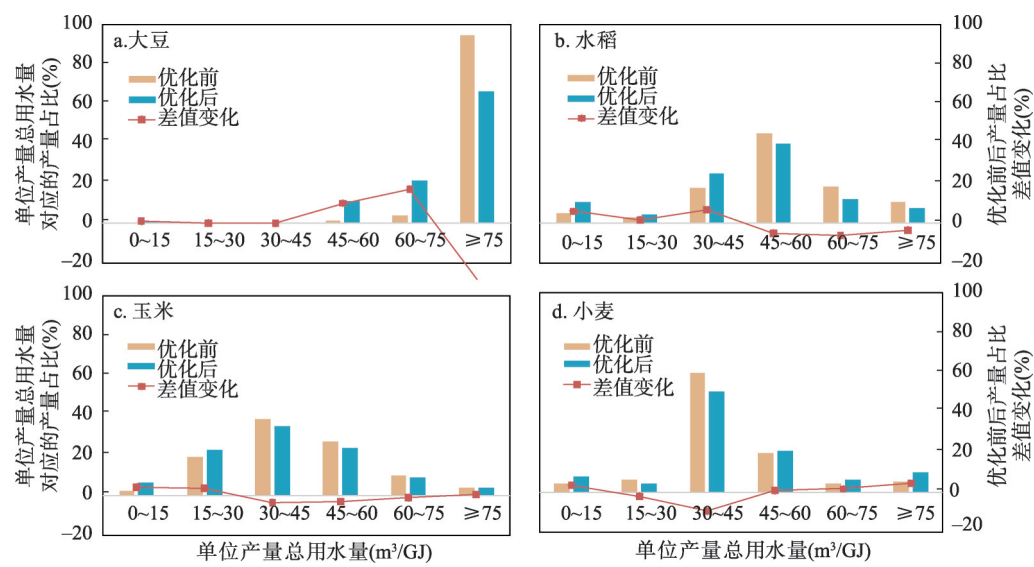
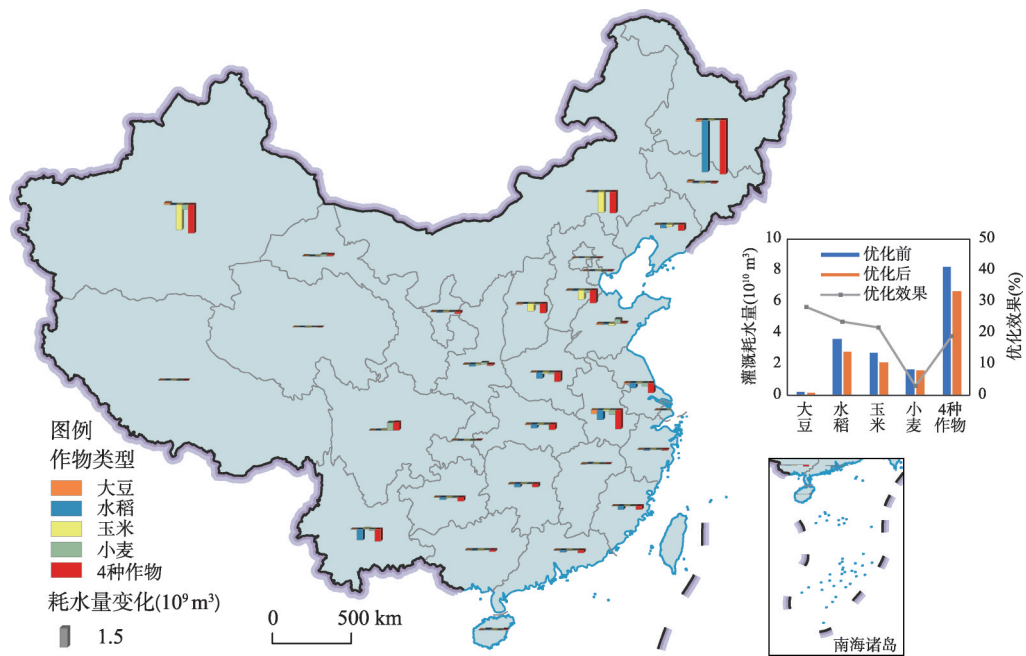


图5 优化前后作物单位产量总用水量分级统计

Fig. 5 Grading statistics of total water consumption per unit yield of crops before and after optimization

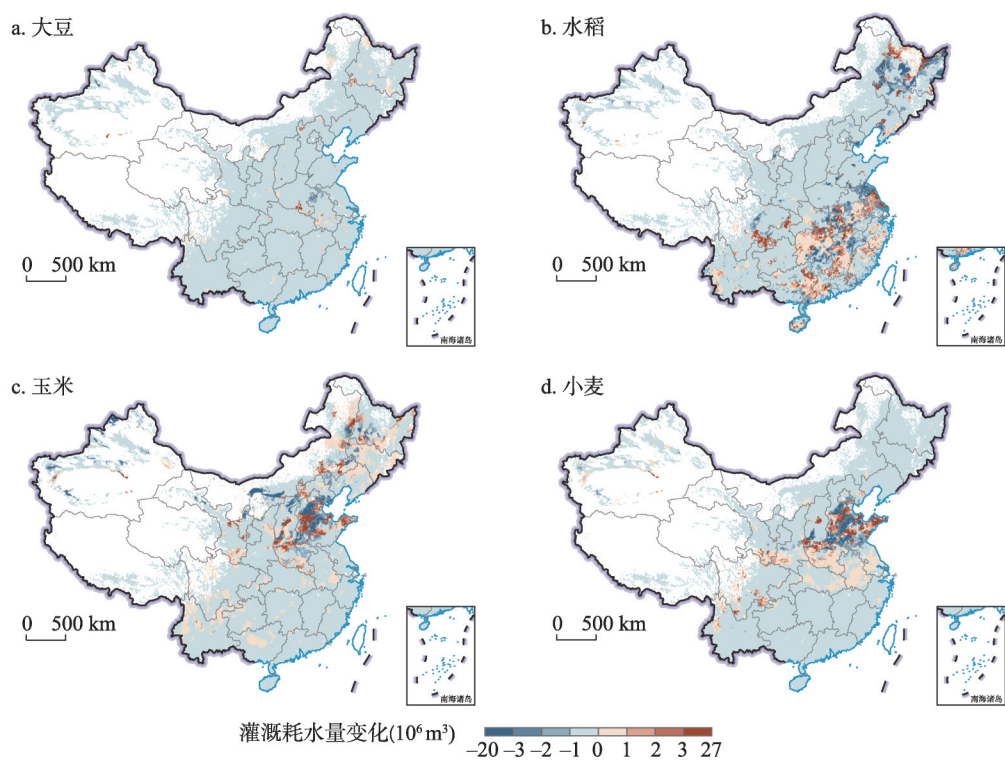


注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改；港澳台数据暂缺；柱状图向上表示耗水量增加，向下表示耗水量减少。

图6 优化后各省份灌溉耗水量变化

Fig. 6 Changes of irrigation water consumption in each province after optimization

突出，占水稻灌溉耗水减少总量的47.42%，此外，云南、安徽、河南、江苏省北部水稻的灌溉耗水减少效果也较为明显。玉米的灌溉耗水在内蒙古和新疆减少最多（两省水稻单位产量所需灌溉耗水量多且播种区域较为广阔，改善空间大），可减少 $3.61 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，占玉米灌溉耗水减少总量的60.75%；山东、河北、河南三省玉米呈现灌溉耗水增减共存的



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1823号标准地图制作，底图边界无修改；港澳台数据暂缺。

图7 优化后灌溉耗水量空间变化

Fig. 7 Spatial variation of irrigation water consumption after optimization

布局变动，但综合来看，灌溉耗水在各省内仍呈减少趋势。优化使得小麦在分布集中的新疆、安徽、江苏和河北省内灌溉耗水净减少量较大，存在 $1.19\times10^9\text{ m}^3$ 的减量空间。

3.3.3 区域水压力影响分析 作物优化能够显著缓解作物播种区域的水压力情况。布局调整使得4种作物种植区域内的平均单位产量基线水压力从1.42降至0.90（图8），优化前后每种作物分布区域的基线水压力值降低均在30%以上，在一定程度上说明作物通过优化从相对缺水的地块移向水资源相对充足的地块。

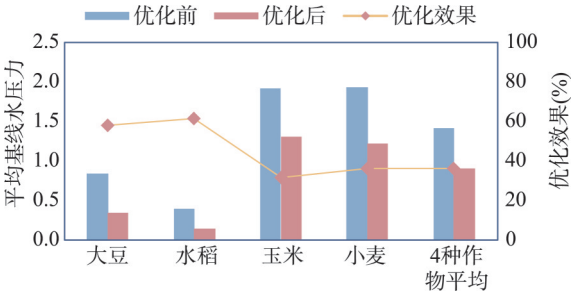


图8 作物平均基线水压力变化情况

Fig. 8 Changes in average baseline water stress for crops

4 讨论

4.1 优化后作物分布格局的合理性

本文对作物优化主要是在区域内部进行微调，优化后的大体格局与现有粮食生产格局基本一致^[44]。优化将缩减作物在内蒙古高原、华北平原和四川盆地北部的分布，而使其向东北平原、长江中下游平原和四川盆地南部聚集。其中，大豆优化后主要分布在东

北区黑龙江省的松花江、嫩江、黑龙江流域附近,以及长江中下游区北部的河南、安徽和江苏省境内^[45]。水稻则主要分布在东北区黑龙江省北部,四川盆地南部、东南丘陵和长江中下游平原境内,这与《中国的粮食安全》^[46]中“加强建设东北稻谷优势产业带”、“打造长江经济带双季稻生产核心区”相吻合。玉米优化后主要分布在东北平原、华北平原、四川盆地南部及周边区域,与《全国优势农产品区域布局规划(2008—2015)》^[47]中“着力建设北方、黄淮海和西南3个优势区”基本一致。小麦优化后主要分布在华北平原、长江中下游平原、黄土高原南部和四川盆地南部,与《中国的粮食安全》^[46]中“形成黄淮海平原小麦、打造长江经济带优质专用小麦生产核心区、发展西南小麦种植”相契合。

4.2 不同尺度作物格局优化下水资源效应的对比分析

为明确不同优化实施尺度对水资源效应的影响差异,研究分别开展了全国、农业区和省域的3种实施尺度作物格局优化模拟。发现全国范围统一进行的作物格局优化中,4种作物的平均单位产量基线水压力都有明显降低(表4),且均优于其余两级的优化效果;一定程度上可以说明以全国为优化单元的作物布局能够更为有效的缓解水压力问题,使作物从需水量压力较高的地块转向水资源丰富的地块。从总用水量来看,玉米在全国的优化模拟中减少最多,而大豆、水稻和小麦则是在农业分区优化中更胜一筹。从灌溉耗水量看,全国尺度优化的灌溉耗水量数值小于农业分区和分省的优化模拟结果。综合来看,以全国为优化单元的作物格局在区域水资源压力和作物用水效率方面均是最优选择,但其优化结果存在作物调整调度大的问题,也未考虑各地区已形成的作物种植

表4 全国、农业区、省域优化结果对比
Tab. 4 Comparison of optimization results across the country, agricultural regions, and provinces

	优化前	全国优化	农业分区优化	分省优化
播种总面积(hm ²)	9.35×10 ⁷	1.09×10 ⁸	8.88×10 ⁷	9.05×10 ⁷
播种面积大豆(hm ²)	6.29×10 ⁶	4.06×10 ⁶	3.27×10 ⁶	4.73×10 ⁶
播种面积水稻(hm ²)	2.93×10 ⁷	2.86×10 ⁷	2.83×10 ⁷	2.86×10 ⁷
播种面积玉米(hm ²)	3.45×10 ⁷	3.96×10 ⁷	3.31×10 ⁷	3.29×10 ⁷
播种面积小麦(hm ²)	2.35×10 ⁷	3.67×10 ⁷	2.41×10 ⁷	2.43×10 ⁷
总用水量(m ³)	3.78×10 ¹¹	3.20×10 ¹¹	3.13×10 ¹¹	3.42×10 ¹¹
总用水量大豆(m ³)	2.77×10 ¹⁰	1.96×10 ¹⁰	1.49×10 ¹⁰	1.97×10 ¹⁰
总用水量水稻(m ³)	1.30×10 ¹¹	1.12×10 ¹¹	1.07×10 ¹¹	1.12×10 ¹¹
总用水量玉米(m ³)	1.44×10 ¹¹	9.57×10 ¹⁰	1.19×10 ¹¹	1.33×10 ¹¹
总用水量小麦(m ³)	7.66×10 ¹⁰	9.27×10 ¹⁰	7.19×10 ¹⁰	7.71×10 ¹⁰
灌溉耗水总量(m ³)	8.19×10 ¹⁰	4.40×10 ¹⁰	6.18×10 ¹⁰	6.63×10 ¹⁰
灌溉耗水量大豆(m ³)	2.35×10 ⁹	1.02×10 ⁹	1.06×10 ⁹	1.69×10 ¹⁰
灌溉耗水量水稻(m ³)	3.61×10 ¹⁰	2.39×10 ¹⁰	2.89×10 ¹⁰	2.76×10 ¹⁰
灌溉耗水量玉米(m ³)	2.70×10 ¹⁰	8.20×10 ⁹	1.75×10 ¹⁰	2.12×10 ¹⁰
灌溉耗水量小麦(m ³)	1.64×10 ¹⁰	1.09×10 ¹⁰	1.44×10 ¹⁰	1.59×10 ¹⁰
单产平均基线水压力	1.42	0.33	0.91	0.90
单产基线水压力大豆	0.84	0.07	0.49	0.35
单产基线水压力水稻	0.40	0.08	0.13	0.15
单产基线水压力玉米	1.92	0.18	1.34	1.31
单产基线水压力小麦	1.93	1.00	1.19	1.22
用地总面积(hm ²)	7.04×10 ⁷	6.06×10 ⁷	6.04×10 ⁷	6.11×10 ⁷

习惯, 因此可行性较差。分省优化的效果虽然略差, 但作物调整规模较小, 与实际种植习惯相符, 易于实现。农业分区优化模拟的优化效果和可实现性则位于上述两种优化之间。后续可将格局调整与已有的饮食习惯和生产习惯等加以考量^[48], 深入研究不同优化方案的水资源效应和可行性。

4.3 格局优化方法的不确定性分析与改进

本文基于像元尺度数据, 采用区分作物种类的差异化评估对中国4种主要作物进行格局优化, 并对其水资源效应进行研究, 后续仍有一些关键点有待深入探讨。首先, 本文未考虑灌溉用水的来源, 比如区分地下水灌溉和地表水灌溉^[49-50], 优化结果中部分灌区也进行了较大幅度调整, 后续可分别考虑两种水资源的特征, 进一步完善作物格局优化方法与水资源效应分析。此外, 研究主要对作物现有产量的情况进行格局优化和分析, 未来可调整作物产量与耗水量的最值以得到 Pareto 最优解集^[51], 分析作物在不同产量时格局优化下的水资源效应情况^[52]。

5 结论

本文基于现有耕地, 面向粮食生产保障与水资源可持续利用的协同, 以保证粮食产量的同时减少水资源消耗、降低区域水资源压力为目标, 基于像元尺度作物产量、用水量、区域水资源压力等数据, 开展中国主要作物(大豆、水稻、玉米、小麦)格局优化, 并从作物用水效率和水资源压力两方面分析其水资源效应, 研究发现:

(1) 通过合理的作物布局调整可在保障粮食产量的同时, 降低水资源消耗和水资源压力, 并减少播种面积和耕地使用面积。优化可减少总用水量约 $3.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (降幅为 9.60%); 降低灌溉耗水量约 $1.56 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (降幅为 19.01%); 平均基线水压力可从 1.42 降至 0.90。缩减播种面积 $3.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (降幅为 3.29%); 最小耕地使用面积可由 $7.04 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 降至 $6.11 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 平均复种指数提高 0.15。

(2) 不同作物的优化方向并不一致, 大豆在东北区北部和黄淮海区南部应调减, 水稻主要在长江中下游区和华南区中部进行格局调整, 玉米整体向东北方向转移, 主要在东北区和黄淮海区进行调整, 而小麦主要在黄淮海区与长江中下游区北部进行调整;

(3) 作物协同优化下, 小麦灌溉耗水可降低 3.08% 为 $5.05 \times 10^8 \text{ m}^3$, 大豆、水稻、玉米 3 种作物的减少幅度均在 20%~30%, 分别减少 $6.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $8.52 \times 10^9 \text{ m}^3$ 、 $5.88 \times 10^9 \text{ m}^3$;

(4) 不同省份优化后的水资源效应有所不同, 黑龙江、新疆、内蒙古、安徽四省(区)作物格局优化对灌溉耗水的减少量贡献最大, 共减少 $9.73 \times 10^9 \text{ m}^3$, 占灌溉耗水减少总量的 58.98%; 四川、甘肃和山东则主要体现为作物向水资源压力更小的区域转移, 但灌溉耗水量有小幅增加。

参考文献(References)

- [1] Sun Zhen, Jia Shaofeng, Yan Jiabao, et al. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(12): 2057-2066. [孙侦, 贾绍凤, 严家宝, 等. 中国水土资源本底匹配状况研究. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2057-2066.]
- [2] Mrad A, Katul G G, Levia D F, et al. Peak grain forecasts for the US High Plains amid withering waters. *PNAS*, 2020, 117(42): 26145-26150.
- [3] Zhang J W, Guan K Y, Peng B, et al. Sustainable irrigation based on co-regulation of soil water supply and atmospheric evaporative demand. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 5549. DOI: 10.1038/s41467-021-25254-7.
- [4] Lin Zhihui, Liu Xianfeng, Chen Ying, et al. Water-food-energy nexus: Progress, challenges and prospect. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1591-1604. [林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 等. 水—粮食—能源纽带关系研究进展与展望.]

地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604.]

- [5] Water Resources Department of the People's Republic of China. China Water Resources Bulletin. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2021. [中华人民共和国水利部. 中国水资源公报. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.]
- [6] Liu Yansui, Wu Chuanjun. Situation of land-water resources and analysis of sustainable food security in China. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 270-275. [刘彦随, 吴传钧. 中国水土资源态势与可持续食物安全. 自然资源学报, 2002, 17(3): 270-275.]
- [7] Liu Yansui, Gan Hong, Zhang Fugang. Analysis of the matching patterns of land and water resources in Northeast China. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 847-854. [刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局. 地理学报, 2006, 61(8): 847-854.]
- [8] Liu Yujie, Yang Yanzhao, Feng Zhiming. The change of the main regions for China's foodgrain production and its implications. Resources Science, 2007, 29(2): 8-14. [刘玉杰, 杨艳昭, 封志明. 中国粮食生产的区域格局变化及其可能影响. 资源科学, 2007, 29(2): 8-14.]
- [9] Liu Xianfeng, Fu Bojie. Drought impacts on crop yield: Progress, challenges and prospect. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2632-2646. [刘宪锋, 傅伯杰. 干旱对作物产量影响研究进展与展望. 地理学报, 2021, 76(11): 2632-2646.]
- [10] Hu Tian, Ju Zhengshan, Zhou Wei. Regional pattern of grain supply and demand in China. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(8): 1372-1383. [胡甜, 鞠正山, 周伟. 中国粮食供需的区域格局研究. 地理学报, 2016, 71(8): 1372-1383.]
- [11] Xiang W L, Tan M H, Yang X, et al. The impact of cropland spatial shift on irrigation water use in China. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 97: 106904. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106904.
- [12] Li Y Y, Li X B, Tan M H, et al. The impact of cultivated land spatial shift on food crop production in China, 1990-2010. Land Degradation & Development, 2018, 29(6): 1652-1659.
- [13] Jin Tao. The adjustment of China's grain cropping structure and its effect on the consumption of water and land resources. Journal of Natural Resources, 2019, 34(1): 14-25. [金涛. 中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应. 自然资源学报, 2019, 34(1): 14-25.]
- [14] Guo S, Shen G Q. Multiregional input-output model for China's farm land and water use. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 403-414.
- [15] Cai B M, Hubacek K, Feng K S, et al. Tension of agricultural land and water use in China's trade: Tele-connections, hidden drivers and potential solutions. Environmental Science & Technology, 2020, 54(9): 5365-5375.
- [16] Liu Z T, Ying H, Chen M Y, et al. Optimization of China's maize and soy production can ensure feed sufficiency at lower nitrogen and carbon footprints. Nature Food, 2021, 2(6): 426-433.
- [17] Davis K F, Rulli M C, Seveso A, et al. Increased food production and reduced water use through optimized crop distribution. Nature Geoscience, 2017, 10(12): 919-924.
- [18] Kang S Z, Hao X M, Du T S, et al. Improving agricultural water productivity to ensure food security in China under changing environment: From research to practice. Agricultural Water Management, 2017, 179: 5-17.
- [19] Yang P G, Bai J J, Yang M, et al. Negative pressure irrigation for greenhouse crops in China: A review. Agricultural Water Management, 2022, 264: 107497. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107497.
- [20] Chu Guang, Xu Ran, Chen Song, et al. Effects of alternate wetting and soil drying on the grain yield and water use efficiency of indica-japonica hybrid rice and its physiological bases. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(7): 1499-1511. [褚光, 徐冉, 陈松, 等. 干湿交替灌溉对籼粳杂交稻产量与水分利用效率的影响及其生理基础. 中国农业科学, 2021, 54(7): 1499-1511.]
- [21] Quan H, Wu L H, Ding D Y, et al. Interaction between soil water and fertilizer utilization on maize under plastic mulching in an arid irrigation region of China. Agricultural Water Management, 2022, 265: 107494. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107494.
- [22] Ye T Y, Ma J F, Zhang P, et al. Interaction effects of irrigation and nitrogen on the coordination between crop water productivity and nitrogen use efficiency in wheat production on the North China Plain. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107787. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107787.
- [23] Wu Y, Yan S C, Fan J L, et al. Combined effects of irrigation level and fertilization practice on yield, economic benefit and water-nitrogen use efficiency of drip-irrigated greenhouse tomato. Agricultural Water Management, 2022, 262: 107401. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107401.
- [24] Wang H, Shao D G, Ji B, et al. Biochar effects on soil properties, water movement and irrigation water use efficiency of

- cultivated land in Qinghai-Tibet Plateau. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154520. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.154520.
- [25] Cao X C, Li Y Y, Wu M Y. Irrigation water use and efficiency assessment coupling crop cultivation, commutation and consumption processes. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107370. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.107370.
- [26] Cao X C, Zeng W, Wu M Y, et al. Hybrid analytical framework for regional agricultural water resource utilization and efficiency evaluation. *Agricultural Water Management*, 2022, 231: 106027. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106027.
- [27] Lyu H Y, Dong Z C, Pande S. Interlinkages between human agency, water use efficiency and sustainable food production. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124524. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124524.
- [28] Branco J E H, Bartholomeu D B, Alves P N Jr, et al. Mutual analyses of agriculture land use and transportation networks: The future location of soybean and corn production in Brazil. *Agricultural Systems*, 2021, 194: 103264. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103264.
- [29] Ke Xinli, Ma Caixue. Interregional farmland layout optimization on the constraint of natural resources and social-economical condition: A case study of Wuhan city circle. *Economic Geography*, 2013, 33(11): 136-141, 148. [柯新利, 马才学. 基于资源禀赋和经济发展区域差异的耕地优化布局: 以武汉城市圈为例. *经济地理*, 2013, 33(11): 136-141, 148.]
- [30] Wang Qiuxiang. Study on cultivated land change driving mechanism and spatial distribution optimization of Foshan [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011. [王秋香. 佛山市耕地变化驱动机理及空间布局优化研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.]
- [31] Zuo L J, Zhang Z X, Carlson K M, et al. Progress towards sustainable intensification in China challenged by land-use change. *Nature Sustainability*, 2018, 1(6): 304-313.
- [32] Zuo L J, Wang X, Liu F, et al. Spatial exploration of multiple cropping efficiency in China based on time series remote sensing data and econometric model. *Journal of Integrative Agriculture*, 2013, 12(5): 903-913.
- [33] World Resources Institute. Baseline Water Stress: China. <https://www.wri.org/research/baseline-water-stress-china>, 2016-06-17/2022-12-03.
- [34] Liu Jiajun, Dong Suocheng, Li Zehong. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(2): 258-269. [刘佳俊, 董锁成, 李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究. *自然资源学报*, 2011, 26(2): 258-269.]
- [35] Xu Zhibo, Luo Tingwen, Wen Chujun, et al. Potentiality evaluation of three-dimensional urban land use based on improved polygon area method: A case study of Shenzhen. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(3): 504-514. [徐志博, 罗婷文, 文楚君, 等. 基于改进多边形面积法的城市土地立体化利用潜力评价: 以深圳市为例. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 504-514.]
- [36] Yu Huiqian, Zhang Qiang, Sun Peng, et al. Impacts of drought intensity and drought duration on winter wheat yield in five provinces of North China plain. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(1): 87-102. [余慧倩, 张强, 孙鹏, 等. 干旱强度及发生时间对华北平原五省冬小麦产量影响. *地理学报*, 2019, 74(1): 87-102.]
- [37] Pohjanmies T, Eyvindson K, Trivino M, et al. More is more? Forest management allocation at different spatial scales to mitigate conflicts between ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2017, 32(12): 2337-2349.
- [38] Wang Y, Zhang Z X, Zuo L J, et al. Mapping crop distribution patterns and changes in China from 2000 to 2015 by fusing remote-Sensing, statistics, and knowledge-based crop phenology. *Remote Sensing*, 2022, 14(8): 1800. DOI: 10.3390/rs14081800.
- [39] Lei Ming, Kong Xiangbin. Optimization of land use structure in Huang-Huai-Hai Plain under water resources constraint. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(6): 27-37. [雷鸣, 孔祥斌. 水资源约束下的黄淮海平原区土地利用结构优化. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6): 27-37.]
- [40] Zhang Xueliang, Kong Xiangbin. Cropland sustainable use impacted by groundwater depletion in China's HHH plains. *China Land Sciences*, 2014, 28(5): 90-96. [张雪靓, 孔祥斌. 黄淮海平原地下水危机下的耕地资源可持续利用. *中国土地科学*, 2014, 28(5): 90-96.]
- [41] Su Xijun, Ji Dehong, He Huishuang. Study on spatial and temporal differences and affecting factors of agricultural water resources green efficiency in Huang-Huai-Hai Plain. *Ecological Economy*, 2021, 37(3): 106-111. [苏喜军, 纪德红, 何慧爽. 黄淮海平原农业水资源绿色效率时空差异与影响因素研究. *生态经济*, 2021, 37(3): 106-111.]
- [42] Wang Xue, Li Xiubin, Xin Liangjie, et al. Ecological compensation for winter wheat abandonment in groundwater over-exploited areas in the North China Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 829-839. [王学, 李秀彬, 辛良杰, 等. 华北地下水超采区冬小麦退耕的生态补偿问题探讨. *地理学报*, 2016, 71(5): 829-839.]

- [43] Dong Xuguang, Gu Weizong, Qiu Can, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in Shandong Province in flood season. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(8): 1063-1072. [董旭光, 顾伟宗, 邱璨, 等. 山东省汛期小时降水过程时空分布特征. *气象*, 2018, 44(8): 1063-1072.]
- [44] Wang Songnan, Mu Yueying. Spatial pattern evolution of grain production and its impact on grain-land matching in China. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(9): 1-11. [王松南, 穆月英. 我国粮食生产格局演变下的粮地匹配. *中国农业大学学报*, 2022, 27(9): 1-11.]
- [45] Zhao J C, Wang C, Shi X, et al. Modeling climatically suitable areas for soybean and their shifts across China. *Agricultural Systems*, 2021, 192: 103205. DOI: 10.1016/j.agsy.2021.103205.
- [46] State Council Information Office of the People's Republic of China. White Paper on Food Security in China. 2019-10-14. [中华人民共和国国务院新闻办公室. 中国的粮食安全(白皮书). 2019-10-14.]
- [47] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Regional Layout Plan of National Advantageous Agricultural Products (2008- 2015). http://www.moa.gov.cn/nybg/2008/djiuq/201806/t20180611_6151652.htm, 2008-08-22. [中华人民共和国农业农村部. 全国优势农产品区域布局规划(2008—2015). http://www.moa.gov.cn/nybg/2008/djiuq/201806/t20180611_6151652.htm, 2008-08-22.]
- [48] Tu Shuangshuang, Jian Daifei, Long Hualou, et al. Evolution characteristics and mechanism of major crops production patterns in Guangxi. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2322-2337. [屠爽爽, 简代飞, 龙花楼, 等. 广西主要农作物生产格局演变特征与机制研究. *地理学报*, 2022, 77(9): 2322-2337.]
- [49] Aliyari F, Bailey R T, Arabi M. Appraising climate change impacts on future water resources and agricultural productivity in agro-urban river basins. *Science of the Total Environment*, 2021, 788: 147717. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147717.
- [50] Lei Ming, Kong Xiangbin, Wang Jianing. Estimation of sustainable grain productivity for arable land under water balance in the Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(3): 535-549. [雷鸣, 孔祥斌, 王佳宁. 水平衡下黄淮海平原区耕地可持续生产能力测算. *地理学报*, 2018, 73(3): 535-549.]
- [51] Li J, Jiao X Y, Jiang H Z, et al. Optimization of irrigation scheduling for maize in an arid oasis based on simulation-optimization model. *Agronomy*, 2020, 10(7): 935. DOI: 10.3390/agronomy10070935.
- [52] Strassburg B B N, Iribarrem A, Beyer H L, et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, 2020, 586 (7831): 724-729.

Analysis of water resources effect under the pattern optimization of major crops in China

LIU Ziyuan^{1,2}, ZHAO Xiaoli¹, ZUO Lijun¹, ZHANG Zengxiang¹,
WANG Xiao¹, XU Jinyong¹, YI Ling¹

(1. Aerospace Information Research Institute, CAS, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water and soil resources are indispensable for the development of agricultural production. However, the uneven spatial and temporal distribution of water resources and the mismatch of arable land distribution have emerged as critical issues affecting the sustainable development of agriculture in China. Based on the existing arable land, this study focuses on the synergy between grain production security and sustainable water resource utilization, with the objective of securing grain production while reducing water consumption and regional water stress, and uses the CPLEX optimization model to optimize the pattern of major crops (soybean, rice, maize, and wheat) in China based on data such as pixel-scale crop yield, water consumption, and regional water stress. Furthermore, this study analyzes the water resource effects of crops in terms of their water use efficiency and water resource stress. The results indicate that: (1) Under the premise of guaranteeing the crop yield remains unchanged, the pattern optimization of crops by province can reduce the total water consumption by up to $3.63 \times 10^{10} \text{ m}^3$ (a decrease of 9.60%), the average baseline water stress falls from 1.42 to 0.90, and the sown area can be reduced by $3.08 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (a decrease of 3.29%). (2) Distinct crops have a different optimization direction. Soybeans should be reduced in the northern part of the Northeast Region and the southern part of the Huang-Huai-Hai Region, the pattern adjustment of rice should be made mainly in the Middle and Lower Yangtze River Region and the central part of the South China Region, the maize should be moved to the northeast as a whole and adjusted mainly within the Northeast Region and the Huang-Huai-Hai Region, while the wheat should be adjusted mainly in the Huang-Huai-Hai Region and the northern part of the Middle and Lower Yangtze River Region. (3) Under crop collaborative optimization, the irrigation water consumption of wheat can be decreased by 3.08%, while the reductions of the remaining three crops range from 20% to 30%, with the largest reduction for rice ($8.52 \times 10^9 \text{ m}^3$). (4) The impact of crop pattern optimization on regional water resources varies among provinces. More specifically, crop pattern optimization in Heilongjiang, Xinjiang, Inner Mongolia and Anhui contributed the most to the reduction in irrigation water consumption, while Sichuan, Gansu and Shandong mainly manifested a shift of crops to areas with less water resource stress, but with a slight increase in total irrigation water consumption. This study can provide decision-making suggestions and technical support for the sustainable use of water and land resources in agricultural production.

Keywords: water resources; major crops; pattern optimization; optimized scale