引文格式：王嘉宁,唐谊娟,眭颖菲,等. 基于生境适宜性和水资源约束的宁夏稻改旱研究[J]. 地理空间信息, 2024, 22(8): 50-53. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2024.08.011

基于生境适宜性和水资源约束的宁夏稻改旱研究

王嘉宁[1]，唐谊娟[2*]，眭颖菲[1]，张露文[1]，包玉斌[2]，顾继升[2]
(1. 北京师范大学 地理科学学部，北京 100875；2.宁夏回族自治区遥感调查院，宁夏 银川 750021)

摘　要：从气候条件、立地条件、土壤条件、灌排条件4个方面综合筛选土地适宜性评价因子，使用多指标综合评价方法测算水稻、小麦、春玉米土地适宜性，进而考虑水资源约束和水稻对于盐碱化耕地的改良作用，进行水稻种植布局优化。结果显示：①适宜种植水稻、小麦、春玉米的耕地分别占各种植面积的71.01%、80.81%和38.85%。②假设缩减的水稻面积全部改为玉米，至少需要缩减1 005.23 km^2，此时能够节省水资源8.93亿m^3，达到最低节水要求。若缩减的水稻面积全部改种小麦，则缩减的水稻面积至少为1 129.47 km^2。当缩减面积介于1 005.23 km^2与1 129.47 km^2之间时，缩减的水稻必须部分转为小麦，部分转为玉米。无论哪种情况，转换为玉米的面积越多，节约的水资源量最大。

关键词：宁夏；稻改旱；土地适宜性评价；种植结构优化；水资源约束
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）08-0050-04

Paddy Land-to-Dry Land Program of Ningxia Based on Ecological Environment Suitability and Water Resource Constraints

WANG Jianing[1], TANG Yijuan[2], SUI Yingfei[1], ZHANG Luwen[1], BAO Yubin[2], GU Jisheng[2]
(1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Institute of Remote Sensing & Mapping, Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750021, China)

Abstract: We comprehensively screened land suitability evaluation factors for rice, wheat and spring maize from four aspects, such as climate conditions, terrain conditions, soil conditions and irrigation and drainage conditions. Then, we used the multi-indicator comprehensive evaluation method to calculate the land suitability of rice, wheat and spring maize. Finally, considering water resource constraints and the improvement effect of rice on saline alkali cultivated land, we optimized the rice planting layout. The main research conclusions show that ①the arable land suitable for planting rice, wheat and spring maize accounted for 71.01%, 80.81% and 38.85% of the respective planting areas. ②Assuming that all the reduced rice is converted to corn, at least 1 005.23 km^2 of rice need to be reduced, which can save 893 million m^3 of water resources and meet the minimum water-saving requirements. If all the reduced rice is converted to wheat, the reduced rice area will be at least 1 129.47 km^2. When the reduced area is between 1 005.23 km^2 and 1 129.47 km^2, the reduced rice must be partially converted to wheat and partially converted to corn. Regardless of the scenario, the more area converted to corn, the greatest amount of water resources saved.

Key words: Ningxia, paddy land-to-dry land, land suitability evaluation, planting structure optimization, water resource restriction

稻改旱研究属于农业产业结构调整优化的问题。目前水资源约束下种植业结构优化分为定性研究和定量研究。定性研究一般是根据研究区域具体情况从农业灌溉、农业结构调整等方面定性地提出建议[1]。定量研究方面，大部分研究采用设定目标函数，在一定限制条件下，计算最优方案的方法。具体方法有单目标优化模型和多目标优化模型。单目标优化模型如线性规划等方法[3-5]具有简单便捷的优点。多目标优化模型不仅注重水资源约束下的农业结构，涵盖农作物种类较多，还关注与社会经济、农业生态、粮食安全的关系，提出用水潜力大、经济效益高、生态效益高、保证粮食安全的优化方案[6]。传统的多目标模型应用广泛，但存在将多目标转换为单目标时，权重参数有可能受到决策者偏好的影响导致模型可靠性降低的问题，于是出现了根据模糊集理论建立的多目标配置模型等[7-9]。

有关水资源约束下种植业结构优化的研究已有大量的丰富的研究成果，为宁夏水稻种植布局优化提供了理论和方法基础，然而现有关于宁夏稻改旱的研究多为定性研究[10-12]，尚无有关综合考虑水资源约束、

收稿日期：2023-07-08。
项目来源：宁夏自然科学基金资助项目（2022AAC03668）。
第一作者简介：王嘉宁（2001—），本科，主要从事遥感应用等方面的工作，E-mail：201911051918@mail.bnu.edu.cn。
通信作者：唐谊娟（1990—），硕士，工程师，主要从事遥感测绘应用等方面的工作，E-mail：790904462@qq.com。

主要粮食作物土地适宜性情况和水稻洗盐碱作用的宁夏水稻种植布局优化研究。为此，本文使用多指标综合评价方法测算水稻、小麦、春玉米种植适宜性，得到相应的适应性指数分布图。基于适宜性评价结果和水资源约束条件，考虑水稻对于盐碱化耕地的改良作用，进行水稻种植布局优化。

1　研究区与数据来源

1.1　研究区概况

宁夏深居内陆，按照地域差异，分为3个自然类型区，北部引黄灌区，中部干旱区以及南部山区。年平均气温为6.9 ~11.5 ℃，年降水量介于175~750 mm之间，蒸发旺盛，平原地区地势低洼，地下水位浅，矿化度高，有土壤盐渍化现象。全区耕地12 144.6 km^2，灌溉面积占总耕地面积的45%。其水资源分布不均，人均占有量少，北部引黄灌区分布有大部分水资源，中部水资源缺乏，南部山区有大量水系分布，水资源较为丰富[1]。宁夏大力发展种植业，水稻、玉米、小麦等粮食作物都有种植，其中水稻主要分布在引黄灌区，自2000—2019年水稻种植面积有所缩小，将2000—2019年水稻种植分布区取并集可得稻改旱研究区域。

1.2　数据来源

本研究所用数据包括：①来源于资源环境科学与数据中心的2020年1 km分辨率的中国土地利用遥感监测数据集(http://www.resdc.cn/)，用于确定研究区的耕地范围；②来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn/plus/index.html)的中国地面气候资料日值数据集，包括1980—2019年期间的气温和降水日值数据，用于计算≥10℃积温均值和年均降水；③来自资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)的空间分辨率为90 m的DEM数据，用于提取高程和计算坡度；④来源于ISRIC-World Soil Information的WISE30sec数据集，空间分辨率为30弧秒，包括土壤有机碳储量、总氮含量、土壤pH值、土壤质地相关数据以及排水能力数据；⑤来源于国家生态科学数据中心（http://www.nesdc.org.cn/）的2000—2019年全国三大粮食作物1 km种植分布数据集，用于确定宁夏现水稻种植空间分布数据。

2　研究方法与技术路线

本文的技术路线如图1所示。

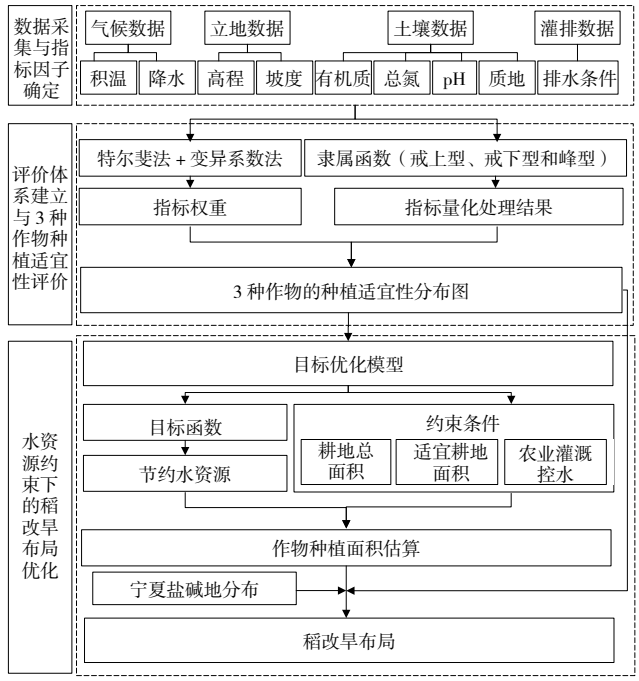


图1　研究技术路线图

2.1　三种作物的种植适宜性评价

从气候、立地、土壤、灌排4个方面选取土地评价因子，确定积温、降水、高程、坡度、土壤总氮、土壤有机质、土壤pH值、土壤质地、灌排条件为指标因子，构建宁夏土地适宜性评价体系，该指标体系由1个一级指标，4个二级指标和9个三级指标构成。根据指标因子特性和指标因子对3种作物的影响，使用柯西函数模型建立各个指标因子与3种作物种植适宜性的关系，具体使用到的隶属度函数包括戒上型（公式1）、戒下型（公式2）和峰型（公式3）3种，根据各指标因子对3种作物种植适宜性的影响以及数据特征确定具体参数。然后，利用变异系数法根据各三级指标的自身特性计算得到各三级指标因子的权重。利用特尔斐法和层次分析法，采用五级标度法两两比较各二级指标相对于一级指标的重要性，形成层次结构判断矩阵，并进行一致性检验，确定二级指标权重，最终得到的评价指标体系及其权重如表1所示。接着，采用综合评价法（公式4）计算适宜性指数。最后，绘制3种作物的适宜性综合指数累计频率曲线，根据曲线拐点确定适宜性等级划分的临界值：0.48、0.62、0.68，据此将适宜性等级划分高适宜区、中适宜区、较不适宜区、不适宜区4个等级区。最后确定2000—2019年3种作物在种植区的适宜等级。

$$A(x)=\begin{cases}1 & ,x\leqslant a\\ \dfrac{1}{1+c(x-a)^2}, & x>a\end{cases} \tag{1}$$

$$A(x)=\begin{cases}0 & ,x\leqslant a\\ \dfrac{1}{1+c(x-a)^{-2}} & ,x>a\end{cases} \tag{2}$$

$$A(x)=\frac{1}{1+c(x-a)^{2}} \tag{3}$$

$$\mathrm{RSI}=\sum_{i=1}^{n}(F_i\times W_i) \tag{4}$$

式中，c 和 a 为函数的参数；RSI为综合适宜指数；F_i 为第 i 个指标因子的隶属度；W_i 为第 i 个指标因子的权重。

表1 指标因子权重

一级指标	二级指标	二级指标权重	三级指标	三级指标权重
适宜性	气候	0.149 2	降水	0.110 0
			≥10℃积温	0.039 2
	立地	0.371 8	高程	0.054 2
			坡度	0.317 6
	土壤	0.405 0	有机质	0.182 5
			总氮	0.162 1
			pH	0.022 2
			质地	0.038 2
	灌排	0.074 1	排涝	0.074 1

2.2 不同情境下的稻改旱模拟

2.2.1 确定目标函数和约束条件

以节约水资源为目标，假设耕种面积不变进行3种作物种植，约束条件包括：3种作物的灌溉用水不超过3种作物农业灌溉用水定额、种植面积不超过适宜耕地面积，所有作物种植面积不为负数。待求解的变量是水稻减小的种植面积与其中要转化为小麦的面积。设 w 为灌溉需用水量，W 为灌溉定额，S 为种植面积，x 为水稻减小的种植面积，a 为压减的水稻面积中都改种小麦的面积，Y 为稻改旱后节省水资源量。则目标函数如式（5）所示，约束条件如式（6）所示。

$$xw_{水稻}-aW_{小麦}-(x-a)W_{玉米}=Y_{\max} \tag{5}$$

$$\begin{cases}Y\geqslant s_{水稻}w_{水稻}+s_{小麦}w_{小麦}+s_{玉米}w_{玉米}-\\ \left(s_{水稻}W_{水稻}+s_{小麦}W_{小麦}+s_{玉米}W_{玉米}\right)\\ s_{水稻}\geqslant 0;s_{玉米}\geqslant 0;s_{小麦}\geqslant 0\\ s_{水稻}\leqslant s_{水稻适宜};s_{小麦}\leqslant s_{小麦适宜};s_{玉米}\leqslant s_{玉米适宜}\\ 0\leqslant a\leqslant x\\ 0\leqslant x\leqslant 552.48\end{cases} \tag{6}$$

式中，3种作物的灌溉用水定额数据遵循《自治区人民政府办公厅关于印发宁夏回自治区有关行业用水定额的通知》中规定的灌溉用水定额[1]。各作物耕地面积数据由2000—2019年3种作物种植分布数据取并集得到20 a三种粮食作物分布规律并计算种植面积。

2.2.2 稻改旱面积优化

假设压缩的水稻全部改种玉米（a=0）时，x=1 005.23 km²，即至少压减水稻面积1 005.23 km²时才可以满足灌溉用水小于等于灌溉定额的要求，此时需要压减的水稻面积最少。随着 x 的增加，节约的水增加。当所有水稻（3 683.2 km²）转换为种植玉米时节水量最大。当 x 介于1 005.23 ~3 683.20 km²之间时，压缩的水稻转化为种植玉米和小麦均可以满足灌溉定额的要求，转换为玉米的比例越高，节水的量越大。当 $a\leqslant x$ 时，计算得到 $x\geqslant$1 129.47 km²，即如果压缩的水稻要全部转化为小麦时，需要压缩的水稻的面积至少为1 129.47 km²。

2.2.3 稻改旱分布确定

宁夏现有水稻主要分布在引黄灌区，在此基础上进行稻改旱模拟，确定要压减的水稻种植面积和改种的作物类型后，首先压减现有水稻种植区域不适合种植水稻的地块，同时考虑水稻耐盐碱的性质以及压盐洗碱的作用，压减盐碱化程度轻地区的水稻面积。对于一部分改种小麦另一部分改种玉米的情况，若要转换的水稻区域适合种植玉米而不合适种植小麦，则转为玉米；若适合种植小麦而不合适种植玉米，则转为小麦；若3种作物都不适合种植，则保留水稻种植面积；若转化为小麦和玉米即可，则优先转化为更节水的作物类型（玉米）。

3 结果分析

3.1 水稻耕地适宜性评价分区

采用完整模型从村、镇尺度分析农户搬迁意愿影响多层次性，宁夏水稻种植区中适宜区占比合计71.01%，其中高、中、较不适宜和不适宜区占耕地的比重分别为59.80%、11.22%、28.45%和0.54%。北部引黄灌区等黄河及其支流沿线的县市比较适宜种植水稻，适宜区域气候温暖，大部分≥10℃积温在3 600 ℃·d以上，都位于积温在2 200 ℃·d以上，得以保证水稻生长。在水分上，年均降水量在550~750 mm之间，分布在灌溉区域。关于地形方面，都分布在海拔较低、地形起伏程度不大的区域。高中适宜区土壤黏土含量较多，有机质、总氮等营养物质丰富，pH值5.5~7.5，排水适宜。不适宜或者较不适宜区所在区域海拔较高，有机质、总氮等营养物质较为贫瘠，土壤黏土含量小，土壤pH偏酸或者偏碱性。

宁夏小麦种植区中适宜区占比合计80.81%，其中高、中、较不适宜和不适宜区占耕地的比重分别为62.04%、18.77%、18.55%和0.64%。适宜区主要分布

在南部山区和北部地形较平坦区域，光热条件满足小麦生存，≥10℃积温在1 600~4 000 ℃·d之间，降水在450~750 mm之间。地形海拔较低，坡度较小。土壤有机质、总氮含量较高，中等质地，黏土含量较多，pH6.0~8.0，排水能力适中。不适宜或者较不适宜区零散分布在北部贺兰山区，中部各县如中卫市东西部、盐池县、同心县、海原县等都有分布，南部地势起伏程度过大的区域也分布有不适宜区，这些区域pH偏酸或者偏碱，土壤质地偏砂，排水不畅或排水程度太大。

宁夏春玉米种植区中适宜区占比合计38.85%，其中高、中、较不适宜和不适宜区占耕地的比重分别为15.05%、23.80%、44.08%和17.07%。北部引黄灌区等黄河及其支流沿线的县市比较适宜春玉米种植的发展。高中适宜区能够满足春玉米对于光热以及生长需水方面的需求，降水450~750 mm，≥10 ℃积温1 700~4 095 ℃·d。地势较低，地势起伏较平缓。土壤有良好的排水与通气性，有机质和总氮含量高，pH值6.5~7。不适宜或者较不适宜区主要分布在南部山区，不适宜区地势高，坡度大，土壤pH值偏酸，不适宜春玉米生长。

3.2　水资源约束条件下作物面积估算及布局模拟结果

在压缩的水稻面积一定的情况下，改种小麦的面积越少，省水越多。当压减水稻面积为1 005.23 km^2时，3种作物灌溉用水等于灌溉用水定额，达到节省水资源的最低要求。需要更改种植作物的耕地分布在平罗县、银川市、陶乐县、贺兰县、永宁县、吴忠市、中卫市、中宁县、同心县、青铜峡市。因为玉米较为省水，且现有水稻种植区的耕地都较为适宜种植玉米，所以这1 005.23 km^2需要全部改种玉米，此时省水8.93亿m^3。当压缩的水稻面积介于1 005.23~1 129.47 km^2之间，被压缩的水稻必须部分转为种植玉米部分转为种植小麦，由于小麦比玉米耗水，改种小麦面积占比越大，节水越少。当压缩水稻面积≥1 129.47 km^2时，改种的类型自由，可以全部或部分改种玉米或小麦。同样改种小麦面积占比越大，节水越少。当1 129.47 km^2均改种小麦时，为此种情况下节水最少的方案，此时节水9.56亿m^3。此方案下，先排除水稻种植区不适宜种植小麦的区域，再根据种植水稻的耕地适宜性进行布局在银北地区和灵武市，有386.42 km^2要压减的水稻耕地不适宜种植小麦，这部分改种玉米。其余需要更改种植作物的耕地改种小麦。压缩水稻面积为1 129.47 km^2且均改种玉米时，省水9.55亿m^3。若将3 683.20 km^2水稻全部转为种植玉米，省水最多，为32.73亿m^3。

4　结　语

本研究以宁夏回族自治区为研究区，综合考虑气候条件、立地条件、土壤条件和灌排条件构建3种作物的种植适宜性评价模型，得到3种作物种植的适宜性分布图，进一步结合目标优化模型，进行稻改旱的分布模拟。取得的主要结论如下：①宁夏水稻适宜区占水稻种植面积的71.01%，其中高适宜区占适宜区域的84.21%。种植小麦的适宜区占小麦总种植面积的80.81%，其中高适宜区占适宜区域的76.77%。春玉米的适宜区占玉米总种植面积的38.85%，其中高适宜区占适宜区域的64.48%。3种作物适宜分布区域都处在黄河以及黄河支流沿线等平坦且离灌溉水源较近的区域，但适宜区域并不完全重合，水稻主要分布在北部引黄灌区黄河沿线，小麦和春玉米适宜区主要分布在黄河支流沿线以及地势低平区域。②玉米较小麦更省水，至少压减水稻面积1 005.23 km^2且全部改种玉米时节省水资源才可以达到最低要求，为8.93亿m^3。若压缩的水稻全部改种小麦，至少需要压缩水稻面积为1 129.47 km^2。当压缩水稻面积在1 005.23~1 129.47 km^2之间时，必须部分改种小麦另一部分改种玉米。无论哪种情况，转换为玉米的面积越多，节水越多。

参考文献

[1] 宁夏回族自治区水利厅. 自治区人民政府办公厅关于印发宁夏回族自治区有关行业用水定额(修订)的通知[EB/OL]. (2021-12-15)[2023-04-24]. http://slt. nx. gov. cn/xxgk_281/fdzdgknr/wjk/zzqwj/202112/t20211215_3225337. html

[2] 赵雪雁. 水资源约束下的河西走廊农业结构优化与调整研究[J]. 干旱区资源与环境,2005,18(4):7-12

[3] David L,Debertin. Agricultural Production Economics[M]. USA:Macmillan Publishing,1986

[4] Afzal J,Noble D H,Weatherhead E K. Optimiza-tion Model for Alternative Use of Different Quality Irrigation Waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992,118(2): 218-223

[5] 彭茂林,铁柏清,刘敏. GIS在农业生态功能分区中的应用[J]. 地理空间信息,2015,13(2):117-119

[6] 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):1-13

[7] Ke W L,Sha J H,Yan J J,et al. A Multi-objective Input-output Linear Model for Water Supply,Economic Growth and Environmental Planning in Resource-based Cities[J]. Sus-

（下转第71页）