

中国广义农业水土资源匹配及利用状况动态评价

刘统兵¹, 方 瑜^{1*}, 黄 峰², 王素芬¹, 杜太生¹, 康绍忠¹

(1. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083; 2. 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘 要: 作为农业发展的核心要素, 水土资源匹配态势与利用程度决定着中国农业可持续发展及食物安全。为优化中国农业水土资源配置, 该研究基于 2000—2020 年 31 个省市的统计数据, 采用基尼系数评价农业水土匹配状况, 提出广义农业水土匹配系数揭示各省农业水土资源匹配状况及配比程度, 联合匹配特征与水土利用状况确定各省农业水土资源利用类型区。结果表明: 1) 研究期内, 中国灌溉水与耕地分布差距较大(基尼系数均值 0.424), 匹配情况变差; 广义农业水与耕地资源分布相对合理(基尼系数均值为 0.360), 无显著变化趋势。地理区及省际间农业水土匹配程度存在较大差异。华北、西北和东北地区匹配状况为“土多水少”, 华东、华中和西南地区匹配状况为“水多土少”, 广东(广义农业水土匹配系数均值为 2.06)和云南(广义农业水土匹配系数均值为 1.02)匹配程度分别为各省市最低和最高, 匹配状况均为“水多土少”; 2) 农业水土资源利用程度空间异质性明显, 垦殖率东南高西北低, 农业水与耕地资源利用程度北高南低; 3) 吉林、新疆、江苏水土资源配置情况变差(转为低匹配高开发区), 北京水土资源配置情况有所好转(转为高匹配低开发区)。研究结果能够为国家农业水土资源优化配置相关决策提供支撑, 对实现国家食物安全及农业可持续发展具有重要意义。

关键词: 农业; 水; 土壤; 广义农业水土资源匹配; 水土资源开发利用; 可持续发展; 中国

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302136

中图分类号: S271; TV213.4; S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-10-0056-10

刘统兵, 方瑜, 黄峰, 等. 中国广义农业水土资源匹配及利用状况动态评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(10): 56-65.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302136 <http://www.tcsae.org>

LIU Tongbing, FANG Yu, HUANG Feng, et al. Dynamic evaluation of the matching degree and utilization condition of generalized agricultural water and arable land resources in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(10): 56-65. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202302136 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

水土资源是人类生存发展的物质基础, 是农业可持续发展的基础, 水、土资源的稀缺性决定了农业生产必须合理开发利用水土资源。现阶段制约中国农业发展的根本问题不仅是水土资源的数量紧缺, 也包括水土资源的匹配状况不合理^[1]。中国水、土资源空间分布不均, 64% 的耕地分布在秦岭—淮河以北, 而北方 6 个水资源一级区的水资源总量仅占 19.3%^[2]。中国粮食主产区日益向东北、西北等水土资源并不占优势的北方核心区集中^[3], 粮食作物综合灌溉定额上升, 粮食结构布局向耗水型发展, 农业用水用地比例不断加大, 对中国的食物安全提出了新的挑战^[4]。在水、土资源两大刚性约束下, 水土匹配的优劣程度及开发利用情况将直接影响国家农业可持续发展与食物安全。直观区域水资源与耕地资源的禀赋差异, 客观分析农业水土资源空间匹配及开发利

用状况, 是确保科学用地、科学用水, 缓解现阶段农业水土匹配差异及开发利用不均造成的负面影响, 维持国家食物安全及农业可持续发展的前提^[5]。

水土资源匹配格局的研究主要采用基尼系数法和水土匹配系数法^[6]。刘彦随等^[7]提出并计算东北地区农业水土匹配系数, 发现东北地区耕地资源优势明显但水资源短缺; 陶国芳等^[8]构建水土匹配基尼曲线, 指出通化地区水资源丰富但土地资源稀缺; 王亚迪等^[9]结合水土匹配系数法和基尼系数法指出河南省中南部和西部匹配程度优于中部。另外, 数据包络分析^[10]、水土资源组合指数^[11]等方法也应用于水土资源匹配研究中, 并有研究引入虚拟水—虚拟耕地资源匹配系数以考虑粮食贸易的影响^[12]。上述方法对于匹配状况的评价往往采用灌溉水量^[13]、水资源有效供给量^[14]等对水资源加以限定, 较少考虑降水对于区域农业水土匹配的影响^[1,6]。水土资源开发利用程度直接关系到区域水土资源匹配性和农业可持续发展^[14]。如: 顾莉丽等^[15]计算吉林水土匹配系数, 指出吉林垦殖率与农业水土匹配程度呈反向被动关系; 王国强等^[16]认为水土资源匹配程度与垦殖率高的耕地产能区呈现错位现象, 并指出垦殖率高的地区由于优良的灌溉条件会过度使用水资源。因此, 将农业水土资源利用匹配性与水土开发利用程度相结合展开评价, 对区域水土资源优化配置具有重要意义。

收稿日期: 2023-02-23 修订日期: 2023-03-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900801); 中国工程院咨询研究项目(2022-XY-58)

作者简介: 刘统兵, 研究方向为水文及水资源。Email: tobingya@cau.edu.cn

*通信作者: 方瑜, 博士, 副教授, 研究方向为水文水资源。Email: fangyu@cau.edu.cn

现有农业水土资源匹配与利用状况的研究时间尺度较短^[13,17]，多聚焦于东北、华北、西北等地区^[3,18-19]。基尼系数法能够考量区域整体水土资源均衡程度（水土资源空间配置状态），水土匹配系数法能够直接反映区域水土资源禀赋（水土资源天然表现特征），但两种方法均不能体现水土资源利用的配比程度（水土资源利用协调程度），而水土资源配比程度对于政府部门调整水土资源开发利用方向，优化中国农业水土资源配置具有重要作用。基于此，为优化中国农业水土资源配置，该研究基于 2000—2020 年 31 个省（市、自治区）降水、水资源总量及耕地面积等数据，利用基尼系数法评估中国广义农业水资源的灌溉水、降水与耕地的匹配状况，提出广义农业水土匹配系数法揭示各省水土资源利用配比程度，应用水、土资源利用率分析各省市农业水土资源利用程度，根据匹配状况与利用程度综合确定各省农业水土资源利用类型区，以期农业水土资源优化配置决策提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况及分区

中国位于亚洲东部、太平洋的西岸，陆地总面积约 960 万 km²^[1,4]。中国水资源总量居世界第 6 位，但人均水资源占有量不足世界人均水平的 1/3；人均耕地面积不到世界平均水平的 50%，同时还受到工业发展、基础设施建设等挤占^[1]。中国正在以世界 6% 的水资源量、9% 的耕地，承载着世界 20% 的人口^[4]。水土资源总量匮乏之外，中国农业水土资源还面临着空间分布错位、开发利用不合理、污染严重等一系列问题^[1]。

基于省（市、自治区）级数据，该研究分别从中国、省及地理区尺度评价区域农业水土匹配特征和农业水土资源利用的分布状况，并以此为依据划分农业水土资源利用类型区。中国大陆（因数据获取限制，未考虑台湾省）主要包括 6 个地理区，其中，黑龙江（黑）、吉林（吉）、辽宁（辽）为东北地区，北京（京）、天津（津）、河北（冀）、山西（晋）、内蒙古（蒙）、山东（鲁）、河南（豫）为华北地区，青海（青）、陕西（陕）、甘肃（甘）、新疆（新）、宁夏（宁）为西北地区，重庆（渝）、贵州（贵）、四川（川）、云南（云）、西藏（藏）为西南地区，湖北（鄂）、湖南（湘）、广东（粤）、广西（桂）、海南（琼）为华中地区，江苏（苏）、浙江（浙）、上海（沪）、福建（闽）、江西（赣）、安徽（皖）为华东地区。

1.2 数据来源

1) 水资源数据：2000—2020 年中国大陆 31 个省份的水资源总量及农业用水量数据，来源于中华人民共和国水利部官网发布的《中国水资源公报》；

2) 降水量数据：来源于科学数据银行（<https://www.scidb.cn/>）的中国 1 km 空间分辨率的月降水插值数据集（1960—2020 年），该数据集是由 1960—2020 年地面 2 400 多个气象站的降水监测数据，使用气候数据空间插值软件 Anusplin 计算而成。本研究选取该数据集

中 2000—2020 年的部分；

3) 土地资源数据：各省份土地面积与耕地面积数据，根据中国国土资源部《国土资源公报》（2000—2020 年）和各省份统计局中《统计年鉴》（2000—2020 年）数据整理；

4) 空间数据：包括各省级（市、自治区）行政区划图与国界线来源于国家测绘地理信息局标准地图服务网站；全国 1 km 土地利用数据（2000、2005、2010 和 2015 年）来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。

1.3 研究方法

1.3.1 农业水土资源匹配特征评价方法

1) 广义农业水资源量

中国农业用水分析框架从蓝水和绿水概念出发，提出了广义农业水资源的概念，认为广义农业水资源（ W_G , mm）应由灌溉水（ W_I , mm）和有效降水（ W_{Pe} , mm）2 个分量组成^[20]。 W_I 、 W_{Pe} 均属于农业水资源量。本研究以省为分析单元统计农业水资源量。

中国农业灌溉水占农业用水的比例维持在 90%~95% 之间^[20]，本研究将灌溉量保守取值为农业用水量的 0.9，计算式如下：

$$W_{I,t,z} = 0.9W_{a,t,z} \quad (1)$$

式中 $W_{I,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的灌溉水量，10⁸m³； $W_{a,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的农业用水量，10⁸m³； t 为年份（2000—2020 年）。

基于 2000—2020 年的逐月降水深栅格数据，依据式（2）^[21] 计算逐年逐月的栅格月有效降水深：

$$P_{e,t,j,k} = \begin{cases} \frac{(125 - 0.2P_{t,j,k})P_{t,j,k}}{125}, & P_{t,j,k} < 250 \\ \frac{125}{125 + 0.1P_{t,j,k}}, & P_{t,j,k} \geq 250 \end{cases} \quad (2)$$

式中 $P_{e,t,j,k}$ 为 t 年份 j 月份 k 栅格的有效降水深，mm； $P_{t,j,k}$ 为 t 年份 j 月份 k 栅格的降水深，mm。栅格年有效降水深为对应年份栅格月有效降水深之和：

$$P_{e,t,k} = \sum_j P_{e,t,j,k} \quad (3)$$

式中 $P_{e,t,k}$ 为 t 年份 k 栅格的年有效降水深，mm。

本研究假定耕地栅格内降水均匀分布^[22]，以 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 个年份耕地的最大边界作为研究期内的耕地范围，以耕地范围作为 Arcgis 空间分析的掩膜提取栅格年有效降水深，再利用 Arcgis10.7 “分区统计-平均值”功能统计分析单元（ z ）内栅格年有效降水深的平均值，以代表分析单元年有效降水深（ $P_{e,t,z}$, mm）。 t 年份 z 分析单元的有效降水量（ $W_{Pe,t,z}$, 10⁸m³）为年有效降水深与耕地面积的乘积：

$$W_{Pe,t,z} = P_{e,t,z} \cdot A_{c,t,z} / 10^3 \quad (4)$$

式中 $A_{c,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的耕地面积，10⁴hm²；10³ 为单位换算系数。 t 年份 z 分析单元的广义农业水资源量（ $W_{G,t,z}$, 10⁸m³）为 $W_{I,t,z}$ 和 $W_{Pe,t,z}$ 之和。

2) 基尼系数

基尼系数最初用来衡量居民的收入差距水平，后被引入到水土匹配的测算中^[23]。本研究基于省（自治区、直辖市）级统计数据，分别构建 W_G 、 W_I 和 W_{Pe} 3 项农业

水资源的基尼曲线并求解其基尼系数：首先，按照农业水资源量与耕地面积的比值对分析单元由小到大进行排序，并依次计算分析单元农业水资源量在农业水资源量占比 ω_G 、耕地面积占比 α 的累计百分比；随后，以 ω_G 累计占比为 x 轴， α 累计占比为 y 轴，绘制基尼曲线，并对基尼曲线进行拟合。基尼系数 (G) 即为基尼曲线与 45° 线围成的面积的 2 倍。基尼系数 G 值越小，则说明区域农业水资源与耕地资源越匹配，当区域农业水资源与耕地资源分布极为匹配时，基尼曲线趋于 45° 线，基尼系数 G 趋近于 0。根据联合国关于基尼系数匹配水平的认定标准^[23]，基尼系数与评价结果的对应关系共分为 5 个等级，包括绝对平均 ($G \leq 0.2$)、比较平均 ($0.2 < G \leq 0.3$)、相对合理 ($0.3 < G \leq 0.4$)、差距较大 ($0.4 < G \leq 0.5$) 和差距悬殊 ($G > 0.5$)。

3) 广义农业水土匹配系数

本研究定义广义农业水土匹配系数 (M ，以下简称“匹配系数”)以评价农业水土资源的匹配状况，可反映各研究单元用于农业生产的水资源和耕地面积的配比关系。依据 ω_G 和 α 的相对大小，将匹配状况区别为“水多土少” (W) 和“土多水少” (A) 两种匹配状况，“水多土少”表示广义农业水资源量相比于土地资源利用超量； M 无量纲，数值大于或等于 1，依据 M 值的大小衡量匹配程度的高低： ω_G 和 α 越相近，即 M 值越趋向于数值 1，表示分析单元的农业水土资源匹配程度越高；反之，表示分析单元的农业水土资源匹配程度越低。 M 计算式如下：

$$M_{t,z} = \frac{\max(\omega_{G,t,z}, \alpha_{t,z})}{\min(\omega_{G,t,z}, \alpha_{t,z})} = \begin{cases} \omega_{G,t,z}/\alpha_{t,z}, & \text{若 } \omega_{G,t,z} \geq \alpha_{t,z} (\text{水多土少 } W) \\ \alpha_{t,z}/\omega_{G,t,z}, & \text{若 } \omega_{G,t,z} < \alpha_{t,z} (\text{土多水少 } A) \end{cases} \quad (5)$$

式中 $M_{t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的广义农业水土匹配系数； $\omega_{G,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的广义农业水资源量占全国广义农业水资源量的比例 ($\omega_{G,t,z} = W_{G,t,z} / \sum W_{G,t,z}$)； $\alpha_{t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的耕地面积占全国耕地面积的比例 ($\alpha_{t,z} = A_{c,t,z} / \sum A_{c,t,z}$)。本研究计算 2000—2020 年各省 M 值的平均值和标准差，以比较不同省份间农业水土资源匹配状况的差异。

1.3.2 农业水土资源利用程度评价方法

控制水、土资源的开发利用是实现资源可持续发展的前提条件^[24]。区域农业水土资源利用程度分别以农业水资源利用程度 (U_W) 和垦殖率 (U_K) 来表征。农业水资源利用程度为农业用水量与水资源总量比值，可反映区域农业用水与水源的配比关系，该值越小代表区域用于农业的水资源所占比例越低；垦殖率为耕地面积与土地面积的比值^[3]，可反映区域耕地与土地资源的配比关系，该值越小代表区域用于农业的土地资源所占比例越低。 U_W 和 U_K ^[3] 的计算式如下：

$$U_{W,t,z} = W_{a,t,z} / W_{T,t,z} \quad (6)$$

$$U_{K,t,z} = A_{c,t,z} / A_{T,t,z} \quad (7)$$

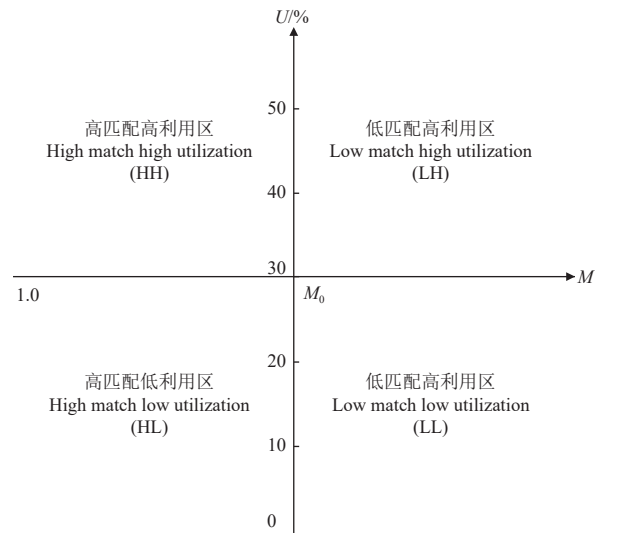
式中 $U_{W,t,z}$ 和 $U_{K,t,z}$ 分别为 t 年份 z 分析单元的农业水资源利用程度和垦殖率，%； $W_{T,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的水资源总量， 10^8m^3 ； $A_{T,t,z}$ 为 t 年份 z 分析单元的土地面积， 10^4hm^2 。

1.3.3 农业水土资源匹配及利用状况趋势分析

基于中国农业水土资源 G 、各省份 M 、 U_W 和 U_K 的计算，通过趋势分析及显著性检验分析其动态变化趋势。根据线性拟合公式的斜率 k 值和显著性检验的 P 值对 G 、 M 、 U_W 及 U_K 的变化趋势进行分类。分类标准如下：1) 显著下降： $k < 0$ 且 $P \leq 0.05$ ；2) 显著上升： $k \geq 0$ 且 $P \leq 0.05$ ；3) 无显著趋势： $P > 0.05$ 。

1.3.4 农业水土资源利用类型区划分

本研究定义 U 为农业水土资源利用程度，值取 U_W 和 U_K 中的较大值。依据现有研究，水资源开发利用上限为 20%~30%^[25]，土地资源开发利用极限为 30%^[26]，综合确定农业水土资源利用程度上限值 U_{\max} 为 30% (对于西北干旱地区的省份， U_{\max} 则取 40%^[2])。以 U_{\max} 为界，若 $U \geq U_{\max}$ 为高利用 (H)，为低利用 (L)。综合考虑 M 值的取值范围和类型区划分个数的均衡，确定判断农业水土匹配程度高低的界限值为 M_0 ，若 $M \geq M_0$ ，为低匹配 (L)；反之，为高匹配 (H)。根据匹配系数 (M) 和农业水土资源利用程度 (U) 的不同组合，将农业水土资源利用类型区划分为 4 类 (图 1)。其中，低匹配高利用区 (LH 类型区，第一象限) 水土资源配置情况较差，高匹配低利用区 (HL 类型区，第三象限) 水土配置情况较好。



注： M 为广义农业水土匹配系数； U 为农业水土资源利用程度。 M_0 为界限值。
Note: M is generalized agricultural water and land resources matching index; U is utilization degree of agricultural water and land resources. M_0 is limit value

图 1 农业水土资源利用分区示意图

Fig.1 Schematic diagram of agricultural water and land resources utilization zoning

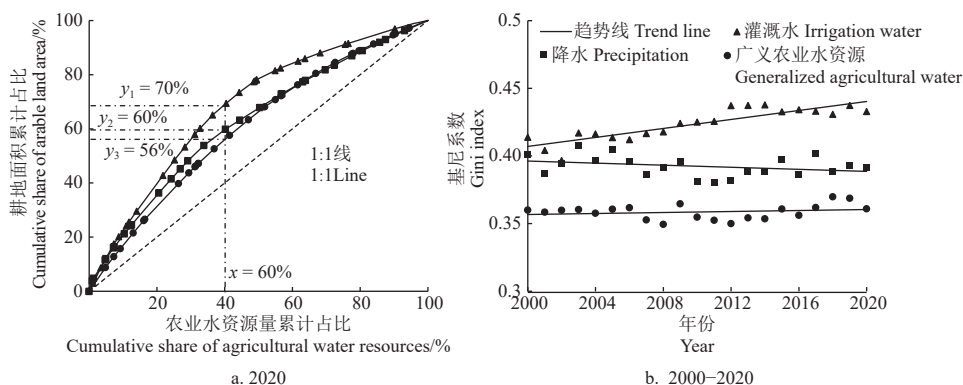
2 结果与分析

2.1 农业水土资源匹配特征

2020 年不同农业水资源量与耕地资源的基尼曲线均偏离于公平曲线 (图 2a)，其中，灌溉水基尼曲线偏离

公平曲线程度最大，约 40% 的灌溉水用于 70% 耕地面积上的农业生产；其次为降水基尼曲线，约 40% 的降水量用于 60% 耕地面积上的农业生产；而广义农业水基尼曲线偏离程度最小，约 40% 广义农业水资源用于 56% 耕地面积上的农业生产。2000—2020 年间，灌溉水、降水、广义农业水土匹配基尼系数年均值分别为 0.424、0.396、0.360（图 2b）。根据联合国关于基尼系数匹配水平的认定标准，可以得出中国灌溉水与耕地分布差距较大，降水、广义农业水资源与耕地分布相对合理的结论。自然条件下，中国降水量空间分布不均匀。降水量

不能完全满足作物生长的水分需求时，需通过人为灌溉弥补天然降水量的不足，而不同地区灌溉设施和条件存在差异会影响灌溉水与耕地的空间分布状况^[1,27]。从变化趋势上看，灌溉水水土匹配基尼系数呈显著上升趋势（ $P < 0.05$ ），即中国灌溉水与耕地的匹配情况逐渐变差；降水水土基尼系数存在波动，无显著变化趋势（ $P > 0.05$ ），降水与耕地的匹配情况受到水文年型的影响而呈波动变化；广义农业水土匹配基尼系数无显著变化趋势（ $P > 0.05$ ），中国广义农业水资源与耕地的匹配情况较为稳定。



注：图 a 中 y_1 、 y_2 、 y_3 分别表示累计占比为 40% 的灌溉水、降水和广义农业水资源所对应的耕地面积累计占比。

Note: In figure a, y_1 , y_2 , and y_3 respectively represent the cumulative share of cultivated land area corresponding to 40% cumulative share of irrigation water, precipitation, and generalized agricultural water resources.

图 2 2000—2020 年中国农业水土资源基尼曲线及基尼系数

Fig.2 Gini Curve and Gini index of China's agricultural water and land resources from 2000 to 2020

采用匹配系数 M 揭示不同省份的农业水土资源匹配特征。2000—2020 年间，地理区和省际间农业水土匹配程度存在差异（图 3）。匹配状况上，东北、华北和西北地区 15 个省市匹配状况为“土多水少”，华东、华中和西南地区的 16 个省市匹配状况为“水多土少”。匹配程度上，京、豫、云、渝 4 省市 M 接近于 1，农业水土资源匹配程度较高；而蒙、晋、闽、粤等 14 省市 M 较大，农业水土资源匹配程度较低。“土多水少”省份中，匹配程度最低为蒙（ M 均值 1.88），最高为豫（1.14）；“水多土少”省份中，匹配程度最低为粤（2.06），最高为云（1.02）。 M 的变异程度随 M 值的

增大而升高， $M > 1.5$ 的省份农业水土匹配状况的年际间差异相对较大，如粤 M 标准差为 0.17，而云 M 标准差仅为 0.09。从动态变化上看，2000—2020 年间，沪、京、苏、宁 4 省市 M 显著上升（ $P < 0.05$ ）， k 值分别为 0.024、0.016、0.016、0.012，其中，沪 M 由 1.45 增至 1.91，增幅最大，为 31%；京 M 由 1.14 增至 1.20，增幅 5%。黑、晋、鄂、津 4 省市 M 显著下降（ $P < 0.05$ ）， k 值分别为 -0.020、-0.016、-0.014、-0.009，其中，晋 M 由 2.01 降至 1.57，降幅最大，为 22%；黑 M 由 2000 年 1.53 下降至 2020 年 1.33，降幅 13%。其余省份无显著趋势。

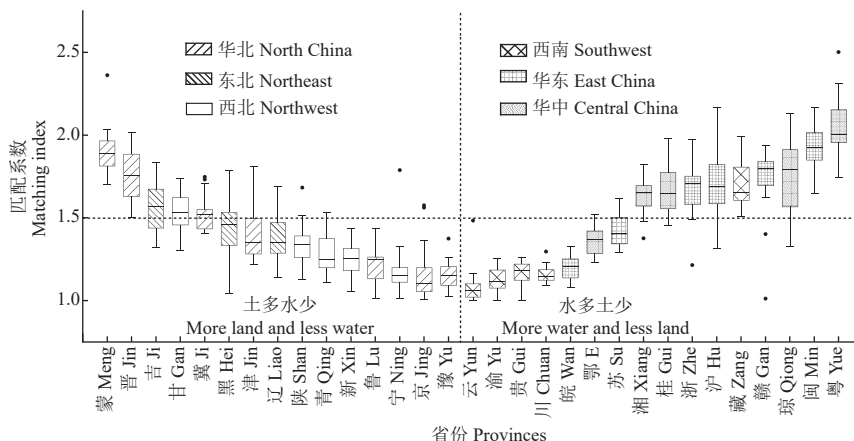


图 3 2000—2020 年各省份广义农业水土匹配系数

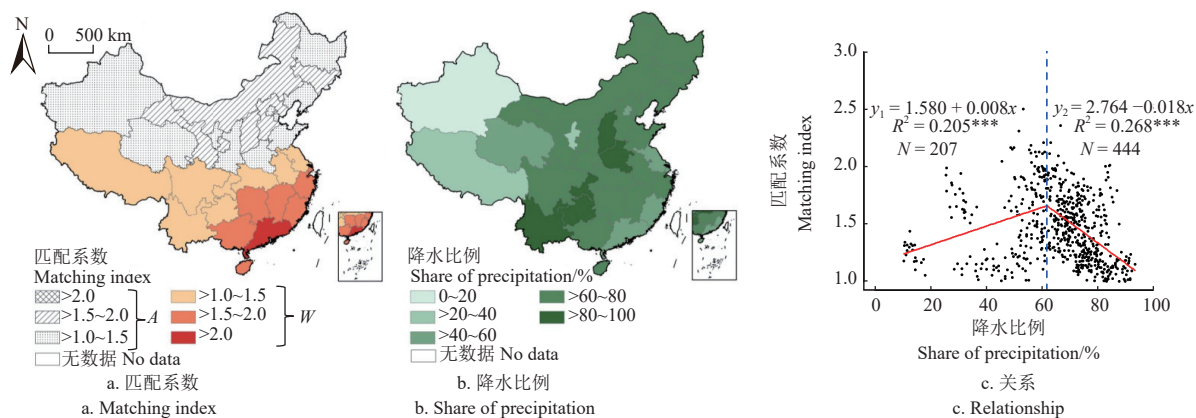
Fig.3 Generalized agricultural water and land matching index in each province from 2000 to 2020

农业水土匹配状况的空间分布大致以秦岭-淮河线及延长线（以下简称“分隔线”）为界，分隔线以南地区“水多土少”，以北地区“土多水少”，距分隔线越远的省份 M 值越大（图 4a）。降水占比在空间上自东南向西北大致呈先增后减的趋势（图 4b），而 M 值与降水占比有关，随降水占比的增加 M 值呈先增后

减的趋势（图 4c），当降水占比处在 62% 附近时， M 值偏高，这可能与南北方的降水条件、农业类型等相关。

2.2 农业水土资源利用状况

2000—2020 年间（图 5），中国垦殖率和农业水资源利用程度空间异质性明显。



注：图 a 中 A 和 W 分别为“土多水少”和“水多土少”；图 c 中***代表 $P < 0.001$ ， N 为拟合的散点数量。

Note: In figure a, A and W are "more land and less water" and "more water and less land", respectively; *** in figure c represents $P < 0.001$, N is the number of fitted scatters.

图 4 2000—2020 年广义农业水土匹配系数与降水占比的空间分布及其间关系

Fig.4 Spatial distribution and relationship between generalized agricultural water and land matching index and share of precipitation from 2000 to 2020

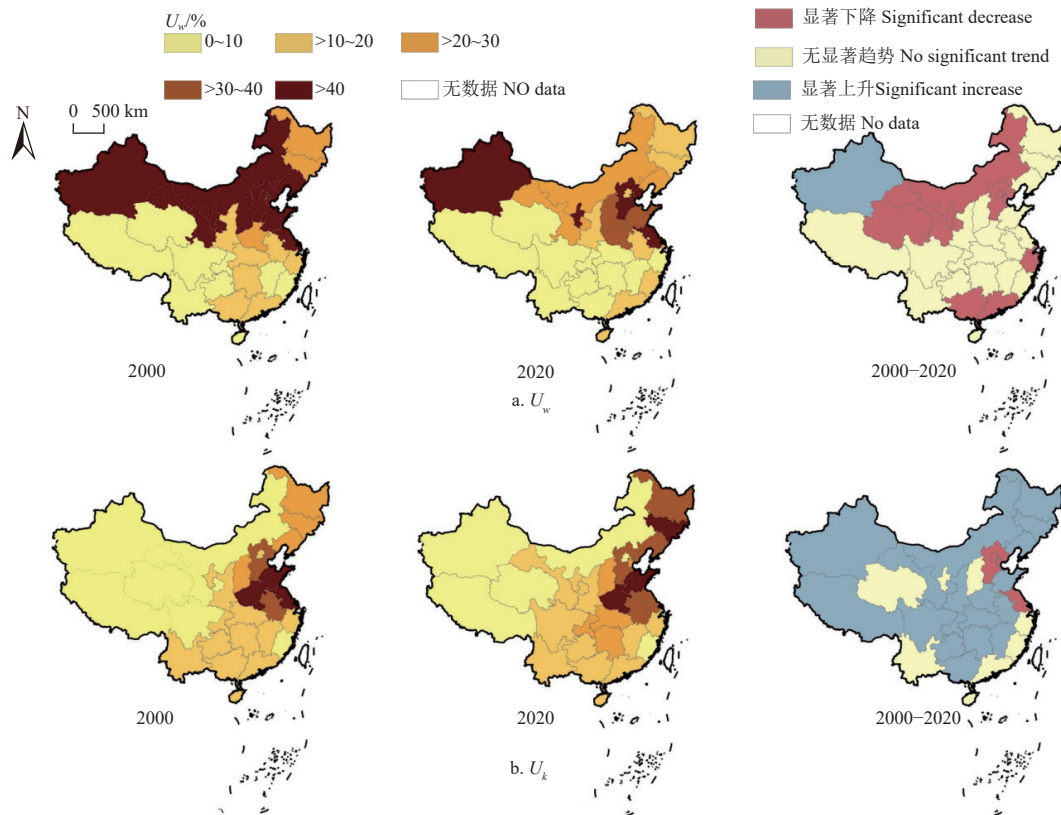


图 5 2000—2020 年农业水资源利用程度 (U_w) 和垦殖率 (U_k)

Fig.5 Utilization degree of agricultural water resources (U_w) and reclamation rate (U_k) from 2000 to 2020

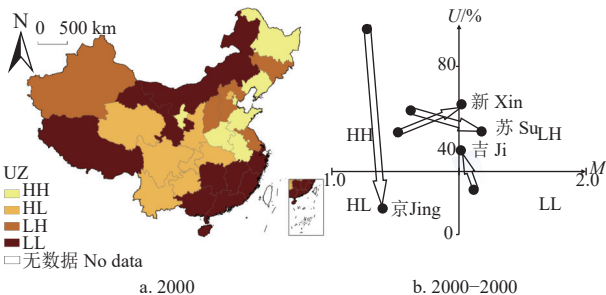
农业水资源利用程度在空间上大致呈现出“北高南低”的特点（图 5），其中，津（78%）、冀（74%）等省市农业水资源利用程度高于开发利用限度。垦殖率大体呈现出类“胡焕庸线”的“东南高西北低”的分布特

点，东南半壁垦殖率较高，如：豫（45%）、鲁（41%）；西北半壁垦殖率不足 10%，如：藏（0.2%）、青（0.8%）。2000—2020 年间，辽、吉、黑、蒙、鲁、豫、皖、赣、桂、湘、鄂、川、贵、藏、渝、甘、新、陕 18 个省市的

垦殖率呈显著上升趋势，京、津、冀、沪、苏 5 个省市呈显著下降趋势，其余 8 个省市无显著趋势，尤其应当指出，吉垦殖率由 2000 年 21% 增加至 2020 年 40%，增幅约 88%。农业水资源利用程度随水资源的丰平枯而波动变化，京、津、冀、浙、沪、粤、桂、甘、青、宁、蒙 11 个省市呈显著下降趋势，新呈显著上升趋势，其余省市无显著趋势。

2.3 农业水土资源利用类型区

根据图 3 展示的 M 均值的取值范围 [1.02, 2.06]， M 中间值约为 1.5， $M \geq 1.5$ 和 $M < 1.5$ 的省份个数分别为 14 和 17，因此取 $M_0 = 1.5$ 。采用 $M_0 = 1.5$ 、 $U_{\max} = 30\%$ 为界限划分农业水土资源利用类型区的结果如图 6a 所示。2020 年 LH（低匹配高利用）包括冀、晋、苏、吉、新 5 省市，农业水土匹配程度低且存在水土过度利用的情况，区域水土资源利用的均衡程度低，水土资源配置情况最差；HL（高匹配低利用）包括京、陕、川、青等 8 省市，匹配程度较高且不存在水土过度利用情况，水土配置情况较好；LL（低匹配低利用）包括蒙、甘、藏、粤等 11 省市，匹配程度低且水土资源利用程度低；HH（高匹配高利用）包括宁、黑、辽、鲁、豫、皖等 7 省市，除宁外，其余省份均处于华北和东北两大粮食主产区，尤其是鲁、豫、皖 3 省，水、土资源利用均已超出限度，对农业稳定发展及食物安全十分不利^[28]。2000—2020 年图 6b，京、津、蒙等 11 个省份的农业水土资源利用类型区发生改变，其中，新、苏、吉农业水土资源利用类型区转变为 LH。京农业水土资源利用类型区转变为 HL。新、苏类型区发生改变的主要原因在于匹配程度发生改变；京、吉类型区改变的主要原因则是在于水土资源开发利用程度发生改变。



注：图 b 箭头表示从 2000 年到 2020 年变化。

Note: The arrows in figure b show changes from 2000 to 2020.

图 6 2000—2020 年农业水土资源利用类型区 (UZ) 现状及变化

Fig.6 Changes and current situation of agricultural water and land resources utilization zoning (UZ) from 2000 to 2020

3 讨论

传统观点认为，中国农业水土匹配程度差，实际上，其分析要素仅为灌溉水量^[20,22]，降水是农业可用水量的重要补给，在农业水土匹配分析中不可忽略。在同时考虑灌溉水与降水后，本文采用联合国关于基尼系数匹配水平的认定标准，得出了广义农业水资源与耕地的分布相对合理的结论，中国广义农业水土匹配程度优于灌溉

水土匹配程度。除前述结论外，本文还得出 2000—2020 年中国广义农业水土资源匹配情况较为稳定，中国灌溉水与耕地的匹配情况逐渐变差的结论。因此，在灌溉水资源有限的情况下，未来农业水土资源优化应充分利用降水，高效利用灌溉水，落实“适水种植”，以农作物实际生长状况及灌溉要求为依据配置灌溉水量；“藏水于技”，提高灌溉水利用效率，使有限的灌溉水分配到更多耕地面积上^[1,5]。

各地理区及各省份的匹配状况、匹配程度、农业水土资源开发利用程度差异较大。造成匹配状况与匹配程度存在较大差异的原因在于南北方地区气候条件、农业生产类型、作物种植结构不同。广东、福建等东南沿海部分省份气候湿润，降水十分丰沛，加之水稻为主的高耗水种植结构，灌溉水量多，但存在许多不可利用的坡地、丘陵等，因此“水多土少”特征明显^[29-30]；内蒙古、甘肃居于内陆，气候干旱、降水稀少，但缺乏配套完善的渠系等水利设施，因此，资源性和工程性缺水加剧了其“土多水少”的矛盾，造成匹配程度低^[31]。华北、西北地区部分省市农业水资源利用程度超限，如冀（74%）、津（78%）。而造成其农业水资源利用程度超限的原因不同，如：西北地区的新疆农业水资源利用超限是由于该省份有灌溉才有农业，降水稀少，气候极度干旱蒸发旺盛^[11,32]；华北地区的河北农业水资源利用超限是由于该省份高耗水的种植结构^[33]。

农业水土匹配程度的变化与区域水土资源利用方式、程度及种植结构和的改变有关。如：研究期内，黑龙江匹配系数由 2000 年 1.53 下降至 2020 年 1.33。该阶段，黑龙江水田扩增，然而耕地资源利用结构与方式逐步趋于合理方向变化，重点流域的水土流失治理得到加强；同时，随着农田水利基础设施建设，水资源总量供给增加，区域水量调节能力提升，缓解了水田扩增带来的水资源压力^[34]。研究期内黑龙江的 ω_G 和 α 均增加，综合水土资源的变化情况， M 值下降，农业水土资源匹配程度提高^[34]；上海匹配系数由 2000 年 1.45 增至 2020 年 1.91，该阶段内，上海抢占农业资源的问题愈加突出，面临水土资源“农转非”的问题，耕地面积锐减，而水资源利用效率提升减少了农业水量， ω_G 和 α 均减小，但 M 值增加，匹配程度降低^[17,35-36]。

农业水土资源利用类型区综合反映各个省市匹配状况和水土资源利用程度，区域农业生产类型、水土资源禀赋、农业产业结构等都是决定水土资源合理利用及匹配程度的关键因素。高匹配省市农业水土资源利用程度较为均衡，而低匹配省市农业水土资源利用不均衡，应当首先协调区域水土资源的利用，通过修建水利工程、土地整理、提高土壤肥力和产能、涵养水源等措施弥补自然条件水土资源禀赋的不足^[33]。低利用省市可适度开发水土资源，如：福建可增加水资源调蓄和配置工程，发挥地区水资源优势，同时改善坡耕地以加大耕地的利用程度^[29]；内蒙古可建立更为完善的水源工程、跨流域调水工程、节水灌溉工程保障体系弥补资源性缺水带来的影响，增加旱改水的节水灌溉面积等^[37]；西藏地形特

殊,环境条件复杂,可适当挖掘区域水土资源潜力,增加水土资源的利用途径,考虑发展牧业、水能发电等^[38]。高利用省市需明确水土资源利用高的原因所在,如河北、天津等省市应当首先治理水土资源浪费或污染的情况,再通过加大非常规水源的利用、提升水土资源质量、落实“适水种植”等方式缓解水土资源超限利用带来的不利影响^[39];而新疆等省市则应当大力发展旱作节水农业,发展雨养农业,建设集雨窖、推广地膜覆盖技术充分利用降水资源,缓解资源性和工程性缺水,促进农业可持续发展^[27, 32]。本文提出的“水多土少”和“土多水少”2种匹配状况以及农业水土资源利用类型区,能够直接体现出区域水土资源利用的不均衡程度,能够帮助政府部门调整水土资源的利用方向,为区域水土资源优化配置提供思路,对于落实“以水定地”、“适水种植”具有积极意义。

本研究存在一定的局限性:1) 农业水土资源未考虑无法被利用、利用较为困难、潜在可开发的量,如:坡耕地、汛期洪水下泄量、地下水补给量^[24]等。除此之外,也没有考虑到蓝绿水资源之间的转化^[4];2) 本研究所采用的匹配系数不能完全揭示分析单元实际水土匹配状况的优劣,但可表明分析单元水土资源利用的相对均衡程度,“水多土少”、“土多水少”2种匹配状况和农业水土资源利用类型区能够用于政府部门控制水土资源利用方向,为区域水土资源优化配置提供思路;3) 水土资源禀赋和利用强度有空间异质性,本文基于省级数据进行评价难免忽略省内水土资源匹配和利用情况的差异,未来研究中应加强对更高精度单元或栅格尺度上的研究,还应对水土资源要素进行细化,如:考虑农田水分平衡、作物需水及土地实际利用情况等。除此之外,有必要考虑农业水土资源质量的相关影响。

4 结 论

本文利用2000—2020年的基础数据,通过基尼系数评价了全国农业水土资源匹配水平,应用广义农业水土匹配系数评价各地理区和各省市农业水土匹配状况和程度,根据农业水资源利用程度和垦殖率分析了全国各省市农业水土资源利用状况,联合农业水土资源匹配特征与农业水土资源利用状况确定各省市农业水土资源利用类型区,研究结果表明:

1) 2000—2020年,中国灌溉水与耕地的分布差距较大,匹配程度变差;广义农业水资源与耕地的分布相对合理,且较为稳定;地理区及省际间农业水土资源匹配状况和匹配程度存在较大差异。秦岭-淮河线及延长线以北的省市,即东北、华北和西北地区的15个省市匹配状况为“土多水少”,其中,匹配程度最低的省为蒙,最高为豫;而秦岭-淮河线及延长线以南的省市,即华东、华中和西南地区的16个省市匹配状况为“水多土少”,其中,匹配程度最低的省为粤,最高为云。距离秦岭-淮河线及延长线越远的省市匹配系数数值相对较大,匹配程度低。

2) 研究期内,中国省际间农业水土资源开发利用程度差距较大。垦殖率大体呈现出类“胡焕庸线”的“东

南高西北低”的分布特点,东南半壁垦殖率较高,如:豫、鲁;西北半壁垦殖率不足10%,如:藏、青。农业水资源利用程度在空间上大致呈现出“北高南低”的特点,藏等省市农业水资源利用程度不足5%,华北、西北地区部分省市,农业水资源利用程度较高,如冀、津。

3) 2000—2020年,京、津、蒙等11个省份的农业水土资源利用类型区发生改变,新、苏、吉农业水土资源利用类型区转变为低匹配高利用区,京农业水土资源利用类型区转变为高匹配低利用区。2020年冀、晋、新、吉、苏5省市为低匹配高利用区;京、陕、川、青等8省市为高匹配低利用区;蒙、甘、藏、粤等11省市为低匹配低利用区;宁、黑、辽、鲁、豫、皖等7省市为高匹配高利用区。

[参 考 文 献]

- [1] HUANG X, FANG H, WU M Y, et al. Assessment of the regional agricultural water-land Nexus in China: A green-blue water perspective[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 804: 150192.
- [2] 王建华, 何国华, 何凡, 等. 中国水土资源开发利用特征及匹配性分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 1-8. WANG Jianhua, HE Guohua, HE Fan, et al. Utilization and matching patterns of water and land resources in China[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [3] 姜秋香, 巩书鑫, 仇志强, 等. 粮食增产期黑龙江省农业水土资源时空匹配格局研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 160-154. JIANG Qiuxiang, GONG Shuxin, QIU Zhiqiang, et al. Analysis of spatiotemporal matching of agricultural water and land resources in Heilongjiang Province during the grain production growth period[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(4): 160-154. (in Chinese with English abstract)
- [4] ZHU W B, JIA S F, Devineni N, et al. Evaluating China's water security for food production: The role of rainfall and irrigation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11155-11166.
- [5] LUO J M, ZHANG H M, QI Y Q, et al. Balancing water and food by optimizing the planting structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 262: 107326.
- [6] 李慧, 周维博, 庄妍, 等. 延安市农业水土资源匹配及承载力[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(5): 156-162. LI Hui, ZHOU Weibo, ZHUANG Yan, et al. Agricultural water and soil resources matching patterns and carrying capacity in Yan'an City[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(5): 156-162. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘彦随, 甘红, 张富刚. 中国东北地区农业水土资源匹配格局[J]. *地理学报*, 2006, 61(8): 847-854. LIU Yansui, GAN Hong, ZHANG Fugang. Analysis of the matching patterns of land and water resources in Northeast China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(8): 847-854. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陶国芳, 蒋兆恒, 秦丽杰. 基于基尼系数的通化地区水土

- 资源匹配分析[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(4): 67-71.
TAO Guofang, JIANG Zhaoheng, QIN Lijie. Analysis of balance between water and land resources in Tonghua region using Gini coefficient[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2012, 33(4): 67-71. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王亚迪, 左其亭, 刘欢, 等. 河南省水土资源匹配特征及均衡性分析[J]. 人民黄河, 2018, 40(4): 55-59.
WANG Yadi, ZUO Qiting, LIU Huan, et al. Equilibrium Analysis of the matching characteristics of water and land resources in Henan Province[J]. Yellow River, 2018, 40(4): 55-59. (in Chinese with English abstract)
- [10] 黄克威, 袁鹏, 刘刚. 基于 DEA 的四川省水土资源匹配研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(10): 58-61, 65.
HUANG Kewei, YUAN Peng, LIU Gang. Research on water and soil resources matching in Sichuan Province based on DEA[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(10): 58-61, 65. (in Chinese with English abstract)
- [11] 南纪琴, 王景雷, 陶国通, 等. 西北旱区农业水土资源匹配格局研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(5): 41-45.
NAN Jiqin, WANG Jinglei, TAO Guotong, et al. Matching patterns of agricultural soil and water resources in Northwest arid area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(5): 41-45. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王婷, 王芝潇, 毛德华. 中国主要粮食作物虚拟水—虚拟耕地资源时空匹配格局[J]. 世界农业, 2019(10): 71-79, 110, 130-131.
WANG Ting, WANG Zhixiao, MAO Dehua. Spatial and temporal match pattern of virtual water versus virtual cultivated land of main grain crops in China[J]. World Agriculture, 2019(10): 71-79, 110, 130-131. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陈紫璇, 陈云浩, 雷添杰. 中国耕地变化及耕地与水源的匹配研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(2): 69-78.
CHEN Zixuan, CHEN Yunhao, LEI Tianjie. Study on variation of cultivated land and matching of cultivated land with water resources[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(2): 69-78. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张莹, 雷国平, 张弘强, 等. 微观尺度分析挠力河流域耕地利用水土资源匹配时空动态[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 185-194.
ZHANG Ying, LEI Guoping, ZHANG Hongqiang, et al. Spatiotemporal dynamics of land and water resources matching of cultivated land use based on micro scale in Naoli River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(8): 185-194. (in Chinese with English abstract)
- [15] 顾莉丽, 孙立新. 吉林省农业水土资源时空匹配格局研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(3): 205-208.
GU Lili, SUN Lixin. Study on spatial-temporal matching pattern of agricultural water-land resources in Jilin Province[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(3): 205-208. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王国强, 毋黎明. 河南省农业水土资源空间匹配格局对产能的影响[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, 31(2): 225-231.
WANG Guoqiang, WU Liming. Spatial matching patterns of agricultural land and water resources impact on farmland productivity in Henan Province[J]. Journal of Henan Polytechnic University, 2012, 31(2): 225-231. (in Chinese with English abstract)
- [17] 樊慧丽, 付文阁. 水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长—以长江经济带为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10): 193-203.
FAN Huili, FU Wenge. Analysis of water and soil resources matching and agricultural economic growth in China from the perspective of water footprint-taking the Yangtze River economic belt as an example[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(10): 193-203. (in Chinese with English abstract)
- [18] 聂晓, 刘兴土, 王毅勇. 松嫩—三江平原地区农业水土资源匹配格局研究[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(18): 4894-4897.
NIE Xiao, LIU Xingtu, WANG Yiyong. Study on matching patterns of land and water resources in Songnen and Sanjiang Plain[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(18): 4894-4897. (in Chinese with English abstract)
- [19] 夏利恒, 刘京, 尉芳, 等. 陕西渭北旱塬区耕地时空格局变化分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 256-264.
XIA Liheng, LIU Jing, WEI Fang, et al. Spatiotemporal pattern change of cultivated land in Weibei Dryland of Shanxi Province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 256-264. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李保国, 黄峰. 蓝水和绿水视角下划定“中国农业用水红线”探索[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3493-3503.
LI Baoguo, HUANG Feng. Defining the baselines for China agricultural water use in green and blue water approach[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(17): 3493-3503. (in Chinese with English abstract)
- [21] Babu R G, Babu G R, Kumar H V H. Estimation of crop water requirement, effective rainfall and irrigation water requirement for vegetable crops using CROPWAT[J]. International Journal of Agricultural Engineering, 2015, 8(1): 15-20.
- [22] 李保国, 黄峰. 1998—2007 年中国农业用水分析[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 575-583.
LI Baoguo, HUANG Feng. Trends in China's agricultural water use during recent decade using the green and blue water approach[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 575-583. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴宇哲, 鲍海君. 区域基尼系数及其在区域水土资源匹配分析中的应用[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 123-125.
WU Yuzhe, BAO Haijun. Regional Gini coefficient and its uses in analyzing to balance between water and soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 123-125. (in Chinese with English abstract)
- [24] 姜秋香, 付强, 王子龙, 等. 三江平原水土资源空间匹配格局[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 270-277.
JIANG Qiuxiang, FU Qiang, WANG Zilong, et al. Spatial matching patterns of land and water resources in Sanjiang Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 270-277. (in Chinese with English abstract)
- [25] 刘丙军, 陈晓宏, 雷洪成, 等. 流域水资源供需系统演化特征识别[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 331-336.

- LIU Bingjun, CHEN Xiaohong, LEI Hongcheng, et al. Distinguishing of water resources supply and demand system evolution features[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 331-336. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵亚莉, 刘友兆, 龙开胜. 长三角地区城市土地开发强度特征及影响因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2012, 21(12): 1480-1485.
- ZHAO Yali, LIU Youzhao, LONG Kaisheng. Features and influencing factors of development intensity of urban land resources in the Yangtze River delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(12): 1480-1485. (in Chinese with English abstract)
- [27] 杨光, 乔学瑾, 石建初, 等. 2000—2020 年玛纳斯河流域的作物种植结构与需水满足度[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 156-166.
- YANG Guang, QIAO Xuejin, SHI Jianchu, et al. Crop planting structure and water demand satisfaction degree in Manas River Basin from 2000 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(18): 156-166. (in Chinese with English abstract)
- [28] 黄峰, 杜太生, 王素芬, 等. 华北地区农业水资源现状和未来保障研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(5): 28-37.
- HUANG Feng, DU Taisheng, WANG Sufen, et al. Current situation and future security of agricultural water resources in North China[J]. *Engineering Science*, 2019, 21(5): 28-37. (in Chinese with English abstract)
- [29] LI S L, CHEN X H, Eescxh M, et al. Tradeoff for water resources allocation based on updated probabilistic assessment of matching degree between water demand and water availability[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 134923.
- [30] 刘利花, 张丙昕, 刘向华. 粮食安全与生态安全双视角下中国省域耕地保护补偿研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(19): 252-263.
- LIU Lihua, ZHANG Bingxin, LIU Xianghua. Compensation of provincial cultivated land protection in China from the dual perspectives of food security and ecological security[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(19): 252-263. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵玉田, 杨庚霞, 王玉业. 基于系统动力学模型的生态脆弱地区农业水资源承载力研究—以甘肃省为例[J]. *兰州财经大学学报*, 2021, 37(2): 89-96.
- ZHAO Yutian, YANG Gengxia, WANG Yuye. Research on the carrying capacity of agricultural water resources in ecologically fragile regions based on system dynamics model[J]. *Journal of Lanzhou University of Finance and Economics*, 2021, 37(2): 89-96. (in Chinese with English abstract)
- [32] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(18): 94-100.
- CAO Xinchun, LIU Zhe, WU Mengyang, et al. Temporal-spatial distribution and driving mechanism of arable land water scarcity index in China from water footprint perspective[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(18): 94-100. (in Chinese with English abstract)
- [33] 秦彦杰, 刘欣, 赵艳霞, 等. 1949 年以来河北省耕地利用转型特征及过程[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(12): 260-269.
- QIN Yanjie, LIU Xin, ZHAO Yanxia, et al. Characteristics and process of the cultivated land use transformation in Hebei Province since 1949[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2022, 38(12): 260-269. (in Chinese with English abstract)
- [34] 侯淑涛, 袁伟豪, 陈建龙, 等. 黑龙江省农业水土资源匹配格局与区域调控[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 150-157, 165.
- HOU Shutao, YUAN Weihao, CHEN Jianlong, et al. Matching pattern and regional regulation of agricultural water and land resources in Heilongjiang province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 150-157, 165. (in Chinese with English abstract)
- [35] 孙彦伟, 龙腾, 顾守柏. 国土综合整治背景下上海土地整治工程建设标准编制解析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 261-267.
- SUN Yanwei, LONG Teng, GU Shoubai. Compiling engineering construction standard for land consolidation under national land comprehensive consolidation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(11): 261-267. (in Chinese with English abstract)
- [36] 吴蒙. 基于农田灌溉系统水能关系的农业节水管理分区研究—以上海为例[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(2): 116-122, 128.
- WU MENG. Exploring agricultural water-saving regionalization based on the water-energy nexus: A case study of Shanghai[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(2): 116-122, 128. (in Chinese with English abstract)
- [37] 毕玮, 党小虎, 马慧, 等. “藏粮于地”视角下西北地区耕地适宜性及开发潜力评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 235-243.
- BI Wei, DANG Xiaohu, MA Hui, et al. Evaluation of arable land suitability and potential from the perspective of “Food Crop Production Strategy based on Farmland Management” in northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(7): 235-243. (in Chinese with English abstract)
- [38] TAN K, ZHAO X Q, PU J W, et al. Zoning regulation and development model for water and land resources in the Karst Mountainous Region of Southwest China[J]. *Land Use Policy*, 2021, 109: 105683.
- [39] 黄峰, 杨晓琳, 方瑜, 等. 适应水土资源条件的华北地区农业种植布局研究[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(5): 89-96.
- HUANG Feng, YANG Xiaolin, FANG Yu, et al. Exploring water-and-land-adapted spatial layout of crop planting in North China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(5): 89-96. (in Chinese with English abstract)

Dynamic evaluation of the matching degree and utilization condition of generalized agricultural water and arable land resources in China

LIU Tongbing¹, FANG Yu^{1*}, HUANG Feng², WANG Sufen¹, DU Taisheng¹, KANG Shaozhong¹

(1. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Water and land resources are the core elements of agricultural development, and their matching situation and degree of utilization determine agricultural sustainability and food security in China. In order to promote the optimal allocation of agricultural water and land resources in China, based on the statistical data for the 31 provinces in the mainland of China from 2000 to 2020, this study dynamically evaluated the matching degree of agricultural water and arable land resources according to the generalized agricultural water and land resources matching index and Gini index, determined the agricultural water and land resources zoning by integrating their matching degree and the utilization condition. The results showed that: 1) During the study period, there was a large gap between the distribution of irrigation water and arable land in China, with the mean Gini index calculated as 0.424, and the matching situation had deteriorated. The distribution of generalized agricultural water resources and arable land resources was relatively reasonable, with the mean Gini index calculated as 0.360, and the change was relatively stable. Great differences on the matching degree existed between provinces and geographic areas. The matching conditions in North China, Northeast and Northwest were "more land and less water", and the matching conditions in East China, Central China and Southwest were "more water and less land". The average values of the generalized agricultural water and land resources matching index were 2.06 for Guangdong and 1.02 for Yunnan, presenting the lowest and highest matching degrees among the provinces, respectively. The variation in the generalized agricultural water and land resources matching index increased with the value of the matching index, and the values of the matching index were related to the share of precipitation, showing a first increasing and then decreasing trend with the increase of the share of precipitation. 2) The utilization degree of agricultural water resources fluctuated with the abundance and decline of water resources from 2000 to 2020. The spatial heterogeneity of agricultural water and land resources utilization was obvious, with the reclamation rate generally "high in the southeast and low in the northwest" and the utilization degree of agricultural water resources "high in the north and low in the South". Especially, the reclamation rates in Henan and Shandong were more than 40%, while those in the northwest were less than 10%. And the utilization degrees of agricultural water resources in Tianjin (78%) and Hebei (74%) were higher than the development and utilization limit in 2020. 3) The agricultural water and land resources zoning in 11 provinces had changed from 2000 to 2020. The allocation of water and land resources in Jilin, Xinjiang and Jiangsu provinces deteriorated to the type of low matching high utilization zoning, while the allocation of water and land resources in Beijing improved to the type of high matching low utilization zoning. The main reason for the zoning changes was the change of matching degree for Xinjiang and Jiangsu and the changes in the utilization degree of water and land resources for Beijing and Jilin. As of 2020, 5 provinces, including Hebei, Shanxi, Jiangsu, Jilin and Xinjiang, belonged to the type of low matching and high utilization zoning, presenting the worst allocation of water and land resources, while 8 provinces, such as Beijing, Shaanxi, Sichuan and Qinghai, belonged to the type of high matching and low utilization, presenting good allocation of water and land resources. The results can provide support for the relevant decision making of the optimal allocation of agricultural water and land resources in China and are of great significance to achieve national food security and agricultural sustainable development.

Keywords: agriculture; water; soils; generalized agricultural water and land matching; exploitation and utilization of water and land resources; sustainable development; China