

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.015

基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析

周亮广^{1,2}, 金菊良¹, 周玉良¹, 吴成国¹, 周戎星¹, 崔毅¹

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 滁州学院地理信息与旅游学院, 安徽 滁州 239099)

摘要:将水土资源自然本底量与农业用水用地量相结合,采用集对分析重建农业水土资源匹配指标,并构建七元半偏减法集对势,对江淮丘陵区2005—2019年农业水土资源匹配进行分析。结果表明:2005—2019年江淮丘陵区广义农业水土资源配比度基本呈现下降态势,但高于水土资源自然配比度;单位耕地用水量有减少趋势,但超出区域本底自然供水量,处于相对缺水状态;狭义农业水土资源配比度与水土资源自然配比度呈现交叉波动,并存在一定程度反相关,降水量的增加会相对减少农业灌溉用水量;2005—2010年和2011—2019年两时段江淮丘陵区广义农业水土资源均处于高度不匹配状态,合肥、滁州不匹配程度最高,安庆最低;两时段农业水土资源匹配集对势均为反势,匹配状态较差,但后期均有所提升,有向好发展趋势,安庆和六安变化程度最为明显;江淮丘陵区降水量年际变化较大,水资源总量变幅明显高于农业用水用地量波动,导致农业用水用地量与水资源总量变化不同步,这是水土资源匹配波动的主要原因。

关键词:农业水土资源匹配;集对分析;七元半偏减法集对势;江淮丘陵区

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0118-08

Matching of agricultural water and soil resources in Jianghuai Hilly Area based on set pair analysis // ZHOU Lianguang^{1,2}, JIN Juliang¹, ZHOU Yuliang¹, WU Chengguo¹, ZHOU Rongxing¹, CUI Yi¹ (1. College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Geographic Information and Tourism, Chuzhou University, Chuzhou 239099, China)

Abstract: The natural background of water and soil resources and the amount of water and land used for agriculture were combined. The set pair analysis was used to reconstruct the matching index of agricultural water and soil resources, and the seven-element semi-partial subtraction set pair potential was constructed to analyze the matching of agricultural water and soil resources in the Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019. The results show that from 2005 to 2019, the proportion of generalized agricultural water and soil resources in the Jianghuai Hilly Area shows a basic downward trend, but it is higher than the natural proportion of water and soil resources. The water consumption per unit of arable land shows a decreasing trend, but it exceeds the natural water supply in the region and is in a relatively water shortage state. The ratio of narrow agricultural water and soil resources and the natural ratio of water and soil resources show cross fluctuations, and there is a certain degree of inverse correlation. An increase in precipitation will relatively reduce the water consumption for agricultural irrigation. From 2005 to 2010 and from 2011 to 2019, the generalized agricultural soil and water resources in the Jianghuai Hilly Area were in a highly mismatched state, with Hefei and Chuzhou having the highest mismatch degree and Anqing having the lowest. The matching set of agricultural water and soil resources during the two periods has a negative trend, with a poor matching state. However, the matching state has improved in the later stages and has a positive development trend, of which the change degree in Anqing and Lu'an is the most obvious. The interannual variation of precipitation in the Jianghuai hilly area is significant, and the fluctuation of total water resources is significantly higher than that of agricultural water and land use, resulting in asynchronous changes in agricultural water and land use and total water resources. This is the main reason for the fluctuation of water and soil resource matching.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0407206);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGQA0202);安徽省高校优秀青年人才支持计划项目(gxyq2020055)

作者简介:周亮广(1981—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zhoulianguang@126.com

通信作者:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事结构水资研究。E-mail:JJL66@126.com

水资源和土地资源是农业发展的必备物资,水土配置是否科学直接影响农业可持续发展^[1]。我国农业水土资源分布不均,水土资源总量短缺及其空间不匹配状况直接影响着中国可持续食物安全^[2]。科学高效地使用水土资源,促进资源配置空间均衡,已成为当代农业可持续发展的热点问题之一^[3-4]。匹配度作为衡量和表征水资源与土地资源协调程度的重要指标,已成为评价一个国家或区域农业可持续发展的重要研究方法^[5]。目前,国内外学者从水土地资源单方面分析农业结构布局的合理性^[6-8]逐渐转向农业水土资源匹配格局研究。国际上最早于1932年将水土地资源同时进行评价,Raup指出用地的扩张会带来更多水资源供应的不确定性^[9]。20世纪以来,国内学者开始从国家层面重视水土资源综合利用评价^[10],多运用水土资源匹配系数^[11-12]、基尼系数^[13-17]、改进基尼系数^[18-19]等对水土资源匹配关系进行评价,采用数据包络分析法(data envelopment analysis, DEA)^[20]等对水土资源利用效率及匹配特征进行研究。上述评价方法也逐渐被扩展应用到水土资源配置、水资源承载力评价、水土资源与人口、工农业发展多元匹配综合评价等分析中^[21-24]。但农业水土资源匹配系数计算多以水资源可利用量乘以农业用水占总用水量的比例(即灌溉用水量)再除以耕地面积得到^[12-13,17],或直接用水资源可利用量除以耕地面积进行核算^[14],对降水资源考虑不足。而许多地方(或年份)降水资源相对丰富,农业用水量并不高,但并不代表水土匹配不佳,导致农业水土资源匹配系数与实际不吻合。

江淮丘陵区地处北亚热带向暖温带过渡带,受季风影响,降水时空分布不均,气候、土壤等都有明显的过渡性特征,水土资源匹配具有一定的时空不确定性,导致区域水资源相对紧缺,旱涝灾害频发,水资源开发利用直接影响土地资源的利用水平。基于此,本文采用适于处理确定、不确定信息的集对分析方法,将江淮丘陵区水土资源本底与农业用水用地参数结合,构建农业水土资源匹配样本数据集与匹配等级集对,重构农业水土资源匹配系数。并构建七元半偏减法集对势,对江淮丘陵区农业水土资源匹配时空格局进行定量评价,以期为该区域农业水土资源合理配置提供量化参考。

1 研究区概况与数据来源

江淮丘陵区是安徽省丘陵主体,地处长江与淮

河之间,西起大别山,东至高邮湖。受南北冷暖气流频繁交汇影响,年均降水量约900 mm,但年、季、月度分配不均,6—9月降水量超过全年降水的55%。江淮丘陵区水文地质条件特殊,地下水资源贫乏,地表水资源供给不足,作为全省重要的粮油基地,区内耕地面积占到全省的31.8%,降水分配与水源供给与农作物的需水不相适应,干旱灾害频发。本文选取江淮丘陵区的合肥、安庆、巢湖、滁州、六安5个地级市为研究区。2011年安徽省行政区划调整,对巢湖市进行了行政拆分,分别划入合肥、芜湖、马鞍山管辖,因此本文研究时段分为2005—2010年和2011—2019年两个阶段。

本文采用的降水量、水资源总量和农业用水量等数据来自《安徽省水资源公报》,耕地面积、国土总面积等数据来自《安徽省统计年鉴》及各地市统计年鉴等资料。

2 研究方法

按照以水定地、以水定产的指导思想,并根据特定区域农业用水用地量与降水量、土地面积应该有适宜的比例关系^[25-26],借鉴李保国等^[27]提出的广义农业水资源,将区域水土自然资源本底量与农业实际用水用地量结合,参考集对分析及其在资源匹配评价中的应用^[28-31],进行农业水土资源匹配集对分析。

充分考虑降水对农业用水的有效作用,广义农业水资源量核算包括耕地有效降水(绿水)和耕地灌溉水量(蓝水)^[27],计算公式为

$$Q_{aw} = Q_{bw} + Q_{gw} \quad (1)$$

其中

$$Q_{gw} = P_c - R_c + D_c$$

$$P_c = P_a S_c / S_a \quad R_c = P_c Q_b / P_a$$

式中: Q_{aw} 为农业水资源总量; Q_{bw} 为耕地灌溉用水量,即蓝水量; Q_{gw} 为耕地有效降水量,即绿水量; P_c 为耕地上有效降水估算量; R_c 为耕地径流估算量; D_c 为耕地深层渗漏量,因江淮丘陵区渗漏量很小,暂不做考虑^[32]; P_a 为总降水量; S_c 为耕地面积; S_a 为区域总面积; Q_b 为地表水资源量。

将 Q_{aw} 与 S_c 的比值样本记作农业水土资源配比度集 $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$,水资源总量 Q_a 与 S_a 比值样本记作区域水土资源自然配比度集 $\{y_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$,构建农业水土资源匹配指数数据集 $A = \{d_{ij} | i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m\}$,其中 $d_{ij} = x_{ij} / y_{ij}$, n, m 分别为评价样本数和样本子单元数。当 $d_{ij} > 1$,表明单位

耕地用水超出了区域本底自然水量供给配比,处于相对缺水状态;当 $d_{ij} < 1$ 时,自然水量处于盈余,可相应提高水资源开发利用或扩大耕地面积。该方法既考虑了区域本底的水资源总量、降水量、耕地上有效降水量和国土面积等自然基础,又融入农业用水和农业耕地的实际开发利用,探究农业生产用水与用地适宜的比例关系,与以水定地、定产思想相一致。

结合江淮丘陵地区农业水土资源匹配状态,参考文献[32-33],以 90%、75%、50% 水平梯度构建水土双向增减的农业水土资源匹配等级评价标准,根据 d_{ij} 大小将农业水土资源匹配等级划分为:水多土少高度不匹配($d_{ij} < 0.50$)、水多土少中度不匹配($0.50 \leq d_{ij} < 0.75$)、水多土少轻度不匹配($0.75 \leq d_{ij} < 0.90$)、水土相对合理匹配($0.90 \leq d_{ij} < 1.10$)、水少土多轻度不匹配($1.10 \leq d_{ij} < 1.25$)、水少土多中度不匹配($1.25 \leq d_{ij} < 1.50$)、水少土多高度不匹配($d_{ij} \geq 1.50$)7 个等级。

设 $B = \{s_g | g = 1, 2, \dots, G\}$, 其中 G 为评价标准等级数目, s_g 为农业水土资源匹配等级的标准值,与农业水土资源匹配指数数据集 A 构成一个集对 $H(A, B)$ 。

七元联系数可以细化评价指标与评价等级间差异性,得到更细致评价结果^[34],计算公式为

$$u = a + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + b_4 I_4 + b_5 I_5 + cJ \quad (2)$$

式中: u 为联系数; a 为同一度; $b_1 \sim b_5$ 为差异度联系数分量; c 为对立度; $I_1 \sim I_5$ 为差异度系数; J 为对立度系数,取值范围为 $[-1, 1]$ 。根据均分原理可取 I_1 为 $2/3$, I_2 为 $1/3$, I_3 为 0 , I_4 为 $-1/3$, I_5 为 $-2/3$ 。

根据集对分析方法,采用同异反层次^[28]构建样本 d_{ij} 的联系数 u_{ijk} :

$$u_{ij1} = \begin{cases} 1 & d_{ij} \leq s_1 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_1)/(s_2 - s_1) & s_1 < d_{ij} \leq s_2 \\ -1 & d_{ij} > s_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$u_{ij2} = \begin{cases} 1 & s_1 < d_{ij} \leq s_2 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_2)/(s_3 - s_2) & s_2 < d_{ij} \leq s_3 \\ -1 & d_{ij} > s_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{ij3} = \begin{cases} 1 & s_2 < d_{ij} \leq s_3 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_3)/(s_4 - s_3) & s_3 < d_{ij} \leq s_4 \\ -1 & d_{ij} > s_4 \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{ij4} = \begin{cases} 1 & s_3 < d_{ij} \leq s_4 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_4)/(s_5 - s_4) & s_4 < d_{ij} \leq s_5 \\ -1 & d_{ij} > s_5 \end{cases}$$

$$u_{ij5} = \begin{cases} 1 & s_4 < d_{ij} \leq s_5 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_5)/(s_6 - s_5) & s_5 < d_{ij} \leq s_6 \\ -1 & d_{ij} > s_6 \end{cases}$$

$$u_{ij6} = \begin{cases} 1 & s_5 < d_{ij} \leq s_6 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_6)/(s_7 - s_6) & s_6 < d_{ij} \leq s_7 \\ -1 & d_{ij} > s_7 \end{cases}$$

$$u_{ij7} = \begin{cases} 1 & s_6 < d_{ij} \leq s_7 \\ -1 & d_{ij} > s_7 \end{cases}$$

$$u_{ij4} = \begin{cases} -1 & d_{ij} \leq s_2 \\ 1 - 2(s_3 - d_{ij})/(s_3 - s_2) & s_2 < d_{ij} \leq s_3 \\ 1 & s_3 < d_{ij} \leq s_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$u_{ij5} = \begin{cases} 1 & s_4 < d_{ij} \leq s_5 \\ -1 & d_{ij} > s_5 \end{cases}$$

$$u_{ij6} = \begin{cases} -1 & d_{ij} \leq s_3 \\ 1 - 2(s_4 - d_{ij})/(s_4 - s_3) & s_3 < d_{ij} \leq s_4 \end{cases}$$

$$u_{ij7} = \begin{cases} 1 & s_4 < d_{ij} \leq s_5 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_5)/(s_6 - s_5) & s_5 < d_{ij} \leq s_6 \\ -1 & d_{ij} > s_6 \end{cases} \quad (7)$$

$$u_{ij8} = \begin{cases} -1 & d_{ij} > s_6 \\ -1 & d_{ij} \leq s_4 \end{cases}$$

$$u_{ij9} = \begin{cases} 1 & s_4 < d_{ij} \leq s_5 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_4)/(s_5 - s_4) & s_5 < d_{ij} \leq s_6 \\ -1 & d_{ij} > s_6 \end{cases} \quad (8)$$

$$u_{ij10} = \begin{cases} 1 & s_5 < d_{ij} \leq s_6 \\ 1 - 2(d_{ij} - s_6)/(s_7 - s_6) & s_6 < d_{ij} \leq s_7 \\ -1 & d_{ij} > s_7 \end{cases} \quad (9)$$

$$u_{ij11} = \begin{cases} -1 & d_{ij} > s_7 \\ 1 & d_{ij} \leq s_8 \end{cases}$$

$$u_{ij12} = \begin{cases} 1 & s_6 < d_{ij} \leq s_7 \\ -1 & d_{ij} > s_7 \end{cases}$$

式中: $s_1 \sim s_7$ 分别为 1 ~ 7 级评价等级标准阈值; s_0 为 1 级评价标准的左边界值。样本值 d_{ij} 隶属于评价等级 k 的相对隶属度为^[35]:

$$v_{ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, 7) \quad (10)$$

对上式归一化处理得单指标联系数分量 v_{ijk} ^[36]:

$$v_{ijk} = v_{ijk}^* / \sum_{k=1}^7 v_{ijk}^* \quad (11)$$

则样本 i 的联系数分量^[37]为

$$v_{ik} = \sum_{j=1}^{n_j} w_j v_{ijk} \quad (12)$$

式中: n_j 为隶属于评价等级 g 的指标个数; w_j 为第 j 个子单元的权重。区域水土资源匹配时间尺度评价以年份 i 为样本, 地市 j 作为子单元, 各地市面积占比作为权重; 空间尺度评价以地市作为样本, 指标取多年均值, 从时空两方面评价区域水土资源匹配差异。

样本 i 的评价指标值七元联系数 u_i 为

$$u_i = v_{i1} + v_{i2}I_1 + v_{i3}I_2 + v_{i4}I_3 + v_{i5}I_4 + v_{i6}I_5 + v_{i7}J \quad (13)$$

利用级别特征值法^[36]求得样本 i 的农业水土资源匹配等级:

$$G_i = \sum_{g=1}^7 g v_{ig} \quad (14)$$

在七元联系数基础上, 构建七元集对势可以诊断两个集合在指定问题背景下某种联系变化的发展趋势, 为进一步分析农业水土资源匹配变化, 参考五

元半偏减法集对势^[38],推广提出七元半偏减法集对势表达为

$$s(u) = a - c + \frac{a(b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} +$$
$$\frac{\lambda_1 b_1 (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} +$$
$$\frac{\lambda_2 b_2 (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} +$$
$$\frac{\lambda_3 b_4 (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} +$$
$$\frac{\lambda_4 b_5 (b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} -$$
$$\frac{c(b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)}{c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5}$$
 (15)

式中: $s(u)$ 为联系数 u 的集对势函数; $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 为差异度项 b_1, b_2, b_4, b_5 的系数。

七元半偏减法集对势的基本思想是将包含确定性与不确定性信息的七元联系数转化为确定性整体发展趋势,将 $(b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 视为一个整体,按合适的比例分配到同一度 a 、对立度 c 及偏同差异度 b_1, b_2 和偏反差异度 b_4, b_5 上。按偏联系数的方法,将 a, b_1, b_2 分别按照 $a/(a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 、 $\lambda_1 b_1/(a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 、 $\lambda_2 b_2/(a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 的比例分配到同一度方向上;将 b_4, b_5, c 分别按照 $\lambda_3 b_4/(c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 、 $\lambda_4 b_5/(c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 、 $c/(c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5)$ 的比例分配到对立度方向上, λ 按平均分配^[38],取 λ_1, λ_2 为 0.25, λ_3, λ_4 为 -0.25。整理得:

$$s(u) = \begin{cases} \left[a + (a + \lambda_1 b_1 + \lambda_2 b_2) \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5}{a + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} \right] - \\ \left[c + (c - \lambda_3 b_4 - \lambda_4 b_5) \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5}{c + b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5} \right] & b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 \neq 0 \\ a - c & b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 = 0 \end{cases}$$
 (16)

式中集对势 $s(u) \in [-1, 1]$, 依据“均分原则”^[28,36],集对势级区间分别取反势 $[-1, -0.6]$ 、

偏反势 $[-0.6, -0.2]$ 、均势 $[-0.2, 0.2]$ 、偏同势 $[0.2, 0.6]$ 、同势 $[0.6, 1]$ 。

3 结果与分析

3.1 江淮丘陵区农业水土资源结构及匹配时空变化分析

3.1.1 农业水土资源结构及其变化

以 2011 年为界,分两个时段统计江淮丘陵地区水土资源情况,结果见表 1。由表 1 可见,2005—2019 年,江淮丘陵区水资源和耕地资源空间分布不均衡,地区间差异较大。水资源量方面,六安和安庆两市降水量最高,均占全区约 30%,水资源总量较大,而合肥和滁州相对较低,合肥最低,即使 2011 年巢湖部分并入后,降水量仍不足全区 20%。单位面积水量安庆最高,可达 75.24 万 m³/km²,六安和巢湖次之,滁州和合肥仍相对较低,合肥 2005—2010 年均值最低,仅为 30.63 万 m³/km²,只是安庆的约 1/2。耕地方面,滁州 2011—2019 年占比最高,达 31.73%,其次为六安、合肥,而安庆最低,不足 20%。合肥在 2011 年后并入了巢湖部分区域,导致合肥水资源量、耕地面积和单位面积水资源量均明显增长。

2005—2019 年江淮丘陵区水土资源变化如图 1 所示,可见期间降水量和水资源总量变化趋势相对一致,波动较大。农业用水量总体变化相对稳定,虽然 2014 年后耕地面积明显增加,在降水量

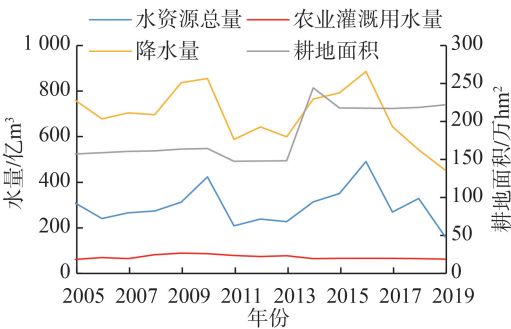


图 1 2005—2019 年江淮丘陵区水土资源变化

Fig.1 Variation of water and soil resources in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

表 1 江淮丘陵区 2005—2019 年水土资源情况分析结果

Table 1 Analysis results of water and soil resources in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

地区	2005—2010 年				2011—2019 年			
	降水量 占比/%	水资源量 占比/%	耕地面积 占比/%	单位面积水资源 量/(万 m ³ /km ²)	降水量 占比/%	水资源量 占比/%	耕地面积 占比/%	单位面积水资源 量/(万 m ³ /km ²)
合肥	9.12	7.08	14.88	30.63	18.44	24.96	24.96	43.39
滁州	18.32	14.74	24.95	33.16	20.32	31.73	31.73	35.63
六安	30.42	33.86	26.89	55.98	31.47	25.44	25.44	57.24
安庆	27.53	29.48	18.11	58.21	32.99	17.88	17.88	75.24
巢湖	14.61	14.85	15.17	47.94				

同时增加情况下,农业用水量反而呈下降态势,降水量的增加在一定程度上会补充相应灌溉用水。2019 年降水量达到研究期内最低,只有多年平均降水量的 60%~70%,水资源总量明显减少,农业灌溉用水量接近最低水平,可见降水量与农业灌溉用水量紧密相关。

水土资源结构方面,江淮丘陵区各地市水土资源结构差异明显。除六安市和巢湖市的水土资源占比差异相对较小,其他 3 市水土资源占比差异较大:安庆市耕地资源占比约为水资源占比的 1/2,单位面积水资源量最高;而滁州市和合肥市耕地占比约为水资源占比 2 倍左右,其中滁州市单位面积水资源量最低,地区间水土资源配比差异较大。

3.1.2 农业水土资源配比时间变化

根据江淮丘陵地区 2005—2019 年水资源及土地利用统计数据,计算广义农业水土资源配比度和区域水土资源自然配比度,并进一步考虑蓝水,计算狭义农业水土资源配比度,结果如图 2 所示。可见,2005—2019 年江淮丘陵区广义农业水土资源配比度基本呈现下降趋势,在耕地面积逐年增加的态势下,单位耕地用水量呈减少趋势,但均高于水土资源自然配比度,广义上单位耕地用水超出区域本底自然水量供给量,表明处于相对缺水状态;而狭义农业水土资源配比度与水土资源自然配比度呈现交叉波动变化,且多数年份存在一定程度反相关态势,降水量的增加会相对减少农业灌溉用水量。

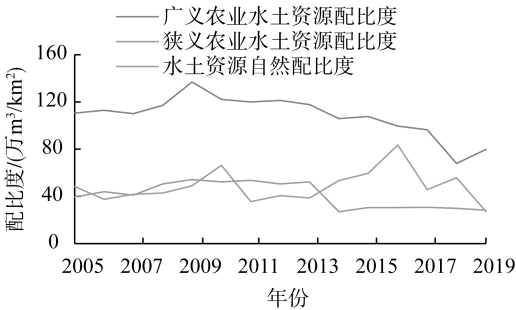


图 2 2005—2019 年江淮丘陵区水土资源配比度变化
Fig. 2 Change of configuration ratio of water and soil resources in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

进一步分析广义、狭义农业水土资源匹配指数变化及其与降水量的关系(图 3)可见,2005—2019 年广义和狭义农业水土资源匹配指数变化趋势相一致,但与降水量变化呈反态变化趋势;秩相关分析发现,降水量的丰枯变化与广义、狭义农业水资源匹配系数均呈现负相关关系($p < 0.05$)。因此,预期降水量增加使自然水量处于盈余时,可相应提高水资源开发利用量或扩大耕地面积。

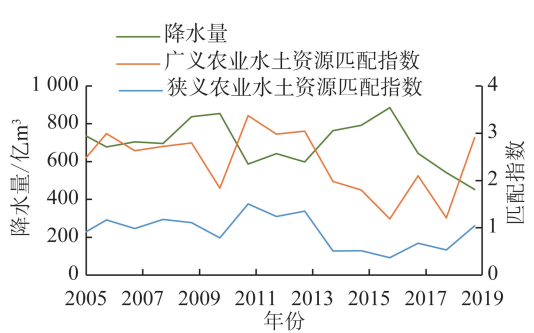


图 3 2005—2019 年江淮丘陵区水土资源匹配指数与降水量变化

Fig. 3 Change of soil and water resources matching index and precipitation in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

3.1.3 农业水土资源匹配时空差异

根据农业水土资源匹配等级评价标准以及核算的农业水土资源联系数,将水土资源匹配联系数值在 $[-1, 1]$ 相应划分为 7 个等级: $[-1, -0.7)$ 、 $[-0.7, -0.4)$ 、 $[-0.4, -0.1)$ 、 $[-0.1, 0.1)$ 、 $[0.1, 0.4)$ 、 $[0.4, 0.7)$ 、 $[0.7, 1.0]$,分别对应水多土少高度不匹配、水多土少中度不匹配、水多土少轻度不匹配、水土相对合理匹配、水少土多轻度不匹配、水少土多中度不匹配、水少土多高度不匹配。等级越居中,农业水土资源匹配程度越高,2005—2019 年江淮丘陵广义农业水土资源匹配情况见表 2。

由表 2 可见,江淮丘陵区农业水土资源匹配指数 d_{ij} 与集对分析联系值基本一致,但由于降水量年际变化大, d_{ij} 直接对原始数据进行多年平均而降低了区域间年度差异,而集对分析基于每年原始数据核算对应等级的隶属度,再进行等级计算,除极限等级外可以更详细地实现对水土资源匹配等级分析。如安庆虽然 2005—2010 年其 d_{ij} 值为 2.24,高于六安 2.16,但其联系数反映的匹配状况却相对优于六安。进一步查验历年数据发现,2005—2010 年,只有安庆 2010 年相应 d_{ij} 低于 1.50,反映在联系数值上出现下降。2005—2019 年,江淮丘陵各地区水土资源匹配均处于高度不匹配状态,其中,合肥、滁州不匹配程度最高,安庆不匹配程度最低。各地市 2011—2019 年比 2005—2010 年匹配程度有所好转,安庆和六安变化程度最大。

进一步以区域面积加权计算得出两时段区域农业水土资源匹配差异及等级,并用七元半偏减法集对势计算两时段的集对势,结果见表 3。可见,2005—2010 年、2011—2019 年两时段农业水土资源匹配均处于高度不匹配状态,且评价等级较高,与空间分析结论一致。同时,两时段集对势均为反势,说明江淮丘陵区农业水土资源匹配状态较差,有较大提升空间。但 2011—2019 年比 2005—2010 年匹配

表 2 2005—2019 年江淮丘陵区广义农业水土资源匹配情况

Table 2 Matching of agricultural water and soil resources from broad sense in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

地区	2005—2010 年				2011—2019 年			
	d_{ij}	联系数值	匹配等级	匹配状态	d_{ij}	联系数值	匹配等级	匹配状态
合肥	3.68	-1	7	高度不匹配	2.80	-1	7	高度不匹配
滁州	3.09	-1	7	高度不匹配	2.90	-1	7	高度不匹配
六安	2.16	-1	7	高度不匹配	2.09	-0.87	6.77	高度不匹配
安庆	2.24	-0.93	6.95	高度不匹配	1.62	-0.82	6.45	高度不匹配
巢湖	2.62	-1	7	高度不匹配				

表 3 2005—2019 年江淮丘陵区广义农业水土资源匹配时段变化

Table 3 Temporal variation of agricultural water and soil resources matching from broad sense in Jianghuai Hilly Area from 2005 to 2019

时段	指标值联系数			联系数值	匹配等级	匹配状态	集对势值	态势
2005—2010 年	$0.0131I_4 + 0.02715I_5 + 0.9597J$			-0.98	6.95	高度不匹配	-0.99	反势
2011—2019 年	$0.0061I_1 + 0.0146I_2 + 0.0252I_3 + 0.0238I_4 + 0.0581I_5 + 0.8722J$			-0.91	6.73	高度不匹配	-0.98	反势

等级及集对势均有所提升,有向好发展趋向。

3.2 农业水土资源匹配变化原因分析

江淮丘陵地区降水年际变化较大,降水量与水资源总量波动明显,因此在多年平均或者阶段平均尺度上研究区水土资源匹配更符合实际状况。在研究时段内,分别对 2005—2010 年及 2011—2019 年两时段匹配指数与降水量、耕地面积、水资源总量、灌溉用水量、狭义农业灌溉用水量和广义农业灌溉用水量等相关变量进行相关分析,并计算相关量的变异系数。

农业水土资源匹配状态的差异与变化受控于农业水土资源匹配指数 d_{ij} 的波动程度,2005—2019 年,水资源总量与 d_{ij} 相关程度最高,在 2005—2010 年、2011—2019 年两时段分别达到 -0.90 和 -0.86,且均通过 0.01 水平显著性检验,表现为高度相关;同时,水资源总量在两时段所有指标中波动最大,在 2011—2019 年 C_v 值达到最大,为 0.34,成为影响农业水土资源匹配的最主要因素。其次是耕地面积和农业灌溉用水量,2005—2010 年耕地面积 C_v 值只有 0.02,狭义农业灌溉用水量 C_v 值为 0.15,说明耕地面积相对稳定,灌溉用水量变化相对较大;但在 2011—2019 年,灌溉面积与农业灌溉用水量两变量 C_v 值分别为 0.19 和 0.09,与 d_{ij} 的相关系数分别达到 -0.73 和 0.70,耕地面积逐年增加,农业水土资源匹配压力增大,但灌溉用水量相对稳定下降,农业水利保障能力提升,成为农业水土资源匹配提升的主要保障因素。

可见,江淮丘陵区水资源总量变化与农业水土资源匹配密切相关,降水量年际变化大导致的水资源量波动幅度明显高于耕地面积及农业灌溉用水变化量的波动,农业用水量与水资源量变化不同步,是

农业水土资源匹配变化的主要原因。因此,结合江淮丘陵区域水资源开发利用条件,优化塘坝、水库等水利调蓄工程规划建设,可进一步提升江淮丘陵区水土资源时空匹配调控水平。

4 结 论

a. 鉴于当前农业水土资源匹配系数对降水量考虑不足,采用广义农业水资源量将区域水土自然资源量与农业实际用水用地量结合,运用集对分析构建农业水土资源匹配指标,可更详细地反映区域农业实际用水用地与自然资源本底的时空匹配差异。

b. 2005—2019 年江淮丘陵区广义农业水土资源配比度基本呈现下降态势,但均高于水土资源自然配比度,单位耕地用水量有减少趋势,但仍超出区域本底自然水量供给量;而狭义农业水土资源配比度与水土资源自然配比度呈现交叉波动,并存在一定程度反相关态势,降水量的增加会相对减少农业灌溉用水量。因此,预期降水量增加使自然水量处于盈余时,可相应提高水资源开发利用量或扩大耕地面积。

c. 2005—2019 年,江淮丘陵区广义农业水土资源总体处于高度不匹配状态,其中合肥、滁州不匹配程度最高,安庆最低。2005—2010 年和 2011—2019 年两时段农业水土资源匹配七元半偏减法集对势均为反势,匹配状态较差,但后期匹配等级及集对势均有所提升,有向好发展趋势,安庆和六安变好程度最大。

d. 江淮丘陵地区地处南北气候过渡带,水资源量年际变化较大,其波动幅度明显高于耕地面积及农业用水用地变化波动量,农业用地用水量与水资

源总量变化不同步是区域农业水土资源匹配波动变化的主要原因。结合丘陵区域水土资源禀赋,进一步强化水利调蓄工程规划建设,可优化江淮丘陵区水土资源时空匹配。

参考文献:

- [1] 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))
- [2] 刘彦随,吴传钧. 中国水土资源态势与可持续食物安全[J]. 自然资源学报, 2002, 17(3): 270-275. (LIU Yansui, WU Chuanjun. Situation of land-water resources and analysis of sustainable food security in China[J]. Journal of Natural Resources, 2002, 17(3): 270-275. (in Chinese))
- [3] 张晶,封志明,杨艳昭. 宁夏平原县域农业水土资源平衡研究[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(2): 60-65. (ZHANG Jing, FENG Zhiming, YANG Yanzhao. Study on the balance of agricultural water and land resources in Ningxia Plain[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(2): 60-65. (in Chinese))
- [4] 夏帆,陈莹,窦明,等. 水资源空间均衡系数计算方法及其应用[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 52-57. (XIA Fan, CHEN Ying, DOU Ming, et al. Calculation method and application of spatial equilibrium coefficient of water resources[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 52-57. (in Chinese))
- [5] 何理,王喻宣,尹方平,等. 全球气候变化影响下中亚水土资源与农业发展多元匹配特征研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2020(50): 1-12. (HE Li, WANG Yuxuan, YIN Fangping, et al. The multivariate matching properties among water and soil resources and agricultural development in Central Asia under global climate change[J]. Scientia Sinica Terrae, 2020(50): 1-12. (in Chinese))
- [6] 姜宁,付强. 基于基尼系数的黑龙江省水资源空间匹配分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(5): 56-60. (JIANG Ning, FU Qiang. Spatial matching analysis of Heilongjiang Province's water resource based on Gini coefficient[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(5): 56-60. (in Chinese))
- [7] 董捷,杜林燕,吴春彭,等. 武汉城市圈土地资源优化配置研究[J]. 中国土地科学, 2011, 25(2): 41-46. (DONG Jie, DU Linyan, WU Chunpeng, et al. Study on optional allocation of land resources in Wuhan urban agglomeration[J]. China Land Science, 2010, 41(5): 56-60. (in Chinese))

- [8] 关伟,赵湘宁,许淑婷. 中国能源水足迹时空特征及其与水资源匹配关系[J]. 资源科学, 2019, 41(11): 208-219. (GUAN Wei, ZHAO Xiangning, XU Shuting. Spatiotemporal feature of the water footprint of energy and its relationship with water resources in China[J]. Resources Science, 2019, 41(11): 208-219. (in Chinese))
- [9] RAUP H F. Land use and water supply problems in southern California: the case of the Perris Valley[J]. Geographical Review, 1932, 22(2): 270-278.
- [10] 刘晶,鲍振鑫,刘翠善,等. 国内外区域水土资源匹配研究综述[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 20-24. (LIU Jing, BAO Zhenxin, LIU Cuishan, et al. Review of the study on the matching of regional land and water resources at home and abroad[J]. Journal of North China university of Water Resources and Electric power (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 20-24. (in Chinese))
- [11] 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))
- [12] 侯薇,刘小学,魏晓妹. 陕西关中地区农业水土资源时空匹配格局研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 134-138. (HON Wei, LIU Xiaoxue, WEI Xiaomei. Study on spatial-temporal match pattern of agricultural water-land resources in Guanzhou area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 134-138. (in Chinese))
- [13] 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))
- [14] 杨齐祺,杨悉廉,乔传泰斗,等. 基尼系数视野下的安徽省水土资源匹配分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(20): 72-76. (YANG Qiqi, YANG Xilian, QIAO Chuantaidou, et al. Matching analysis of water and land resources in Anhui province based on Gini coefficient[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(20): 72-76. (in Chinese))
- [15] 文倩,孟天醒,鄢雨旱. 河南省农业水土资源时空分异与匹配格局[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 233-239. (WEN Qian, MENG Tianxing, YUN Yuhan. Temporal and spatial variation and match pattern of agricultural land and water resources in Henan Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(5): 233-239. (in Chinese))

- [16] 李文静,许文强,包安明,等. 阿姆河流域耕地变化及水土匹配特征分析[J]. 水资源保护,2021,37(3):80-86. (LI Wenjing, XU Wenqiang, BAO Anming, et al. Analysis of cultivated land change and water-land matching characteristics in Amu Darya River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3):80-86. (in Chinese))
- [17] 高芸,齐学斌,李平,等. 黄河流域农业水土资源时空匹配特征分析[J]. 灌溉排水学报,2021,40(6):113-118. (GAO Yun, QI Xuebin, LI Ping, et al. Analysis on spatial-temporal matching characteristics of agricultural water and soil resources in the Yellow River Basin [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6):113-118. (in Chinese))
- [18] 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 Jianguo, 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))
- [19] 孙侦,贾绍凤,严家宝,等. 中国水土资源本底匹配状况研究[J]. 自然资源学报,2018,33(12):257-266. (SUN Zhen, JIA Shaofeng, YAN Jiabao, et al. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(12):257-266. (in Chinese))
- [20] 徐娜,张军,张仁陟. 基于 Malmquist DEA 的甘肃内陆河流域农业水土资源利用效率及匹配特征研究[J]. 中国农业科技导报,2020,22(2):115-122. (XU Na, ZHANG Jun, ZHANG Renzhi. Study on utilization efficiency and matching features of agricultural soil and water resources in Inland river basin of Gansu Province based on malmquist DEA [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(2):115-122. (in Chinese))
- [21] 吴丹,向筱茜,冀晨辉. 京津冀水资源与产业结构优化适配模型[J]. 水利水电科技进展,2022,42(2):20-26. (WU Dan, XIANG Xiaoqian, JI Chenhui. Adaptation model between water resources and industrial structure optimization in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(2):20-26. (in Chinese))
- [22] 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 Zhaozheng, 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))
- [23] 张晓涛,于法稳. 黄河流域经济发展与水资源匹配状况分析[J]. 中国人口·资源与环境,2012,22(10):1-6. (ZHANG Xiaotao, YU Fawen. Analysis of the matching status between economic development and water resources in the Yellow River Basin [J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(10):1-6. (in Chinese))
- [24] 许长新,林剑婷,宋敏. 水土匹配、空间效应及区域农业经济增长:基于中国 2003—2013 的经验分析[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(7):153-158. (XU Changxin, LIN Jianting, SONG Min. Research on the spatial effects of water and soil matching degree on economic growth of regional agriculture based on empirical analysis during 2003-2013 in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(7):153-158. (in Chinese))
- [25] 戴仕宝,周亮广,叶雷,等. 江淮丘陵地区塘坝系统水适应性机制与测度分析[J]. 南水北调与水利科技,2018,16(5):41-49. (DAI Shibao, ZHOU Liangguang, YE Lei, et al. Mechanism and measurement of the water adaptability of the farm pond in Jianghuai Hilly Area [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5):41-49. (in Chinese))
- [26] 黄道友,陈桂秋,王克林,等. 红壤丘陵区地表水资源动态与合理调蓄利用研究[J]. 水科学进展,2004,15(3):370-375. (HUANG Daoyou, CHEN Guiqiu, WANG Kelin, et al. Dynamics and rational adjusting of surface water resources in hilly red soil regions [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3):370-375. (in Chinese))
- [27] 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))
- [28] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科学技术出版社,2000.
- [29] 杨齐祺. 区域水土资源匹配分析的智能建模方法及其应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
- [30] 金菊良,徐新光,周戎星,等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护,2021,37(1):1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):1-6. (in Chinese))
- [31] 张志君,陈伏龙,龙爱华,等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护,2020,36(2):53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2):53-58. (in Chinese))

- 学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 628-634. (YANG Gang, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Simulating urban rainfall-runoff and assessing LID facilities by SWMM model in Dahongmen catchment[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2018, 54(5): 628-634. (in Chinese))
- [19] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究:以凉水河流域为例[J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(5): 55-64. (in Chinese))
- [20] 邵蕊, 邵薇薇, 苏鑫, 等. 基于 TELEMAC-2D 模型分析不同洪涝情景对城市应急响应时间的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(1): 60-69. (SHAO Rui, SHAO Weiwei, SU Xin, et al. Impact of various flood scenarios on urban emergency responses times based on the TELEMAC-2D model[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(1): 60-69. (in Chinese))
- [21] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战:I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594-605. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-08-16 编辑:施业)

(上接第 110 页)

- [20] 梁红艳. 中国城市群生产性服务业分布动态、差异分解与收敛性[J]. 数量经济技术经济研究, 2018, 35(12): 40-60. (LIANG Hongyan. Distribution dynamics, difference decomposition and convergence mechanism of producer services industry in Chinese urban clusters[J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2018, 35(12): 40-60. (in Chinese))
- [21] ANSELIN L. Spatial econometrics: methods and models [J]. Journal of the American Statistical Association, 1990, 85(411): 160.
- [22] REY S J, MURRAY A T, ANSELIN L. Visualizing regional income distribution dynamics[J]. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2011, 4(1): 81-90.
- [23] WANG Jinfeng, LI Xinhua, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. (WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134. (in Chinese))
- [25] 裴延峰. 中国产业结构变迁的空间不平衡对地区经济差距的影响[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(3): 3-23. (PEI Yanfeng. Study on the impact of spatial imbalance of industrial structure change on regional economic disparity in China [J]. The Journal of Quantitative Economics & Technical Economics, 2022, 39(3): 3-23. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-25 编辑:施业)

(上接第 125 页)

- [32] 俞建河, 吴永林, 丁长荣. 皖东江淮丘陵区不同水文年水稻优化灌溉制度的研究[J]. 节水灌溉, 2017(1): 94-97. (YU Jianhe, WU Yonglin, DING Changrong, et al. A Study on optimal irrigation schedule of paddy in different hydrological years in the hilly areas of Eastern Anhui Province [J]. Water Saving Irrigation, 2017(1): 94-97. (in Chinese))
- [33] 耿庆玲. 西北旱区农业水土资源利用分区及其匹配特征研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2014.
- [34] 张礼兵, 喻海閔, 金菊良, 等. 基于联系数的大型灌区水资源空间均衡评价与优化调控[J]. 水利学报, 2021, 52(9): 1011-1023. (ZHANG Libing, YU Haiguan, JIN Juliang, et al. Evaluation and optimal regulation of spatial equilibrium of water resources in large irrigation area based on connection number [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(9): 1011-1023. (in Chinese))
- [35] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2005.
- [36] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 401-409. (in Chinese))
- [37] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连:大连理工大学出版社, 2009.
- [38] 金菊良, 孔令茹, 崔毅, 等. 基于五元半偏减法集对势的区域农业旱灾脆弱性评价[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 340-348. (JIN Juliang, KONG Lingru, CUI Yi, et al. Assessment of regional agricultural drought vulnerability based on five-element semipartial subtraction set pair potential [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 340-348. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-10-21 编辑:王芳)