

# 农村牧区典型市域水土资源耦合协调发展 时空演变特征分析

斯日吉模楞<sup>1</sup>, 王源<sup>2</sup>, 沈新乐<sup>3</sup>

(1. 内蒙古师范大学 经济管理学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;

2. 中共奈曼旗委党校, 内蒙古 通辽 028000;

3. 内蒙古师范大学 民族学人类学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022;)

**摘要:** 为探索内蒙古自治区(以下简称内蒙古)农村牧区典型区域各盟市水土资源耦合协调发展的时空分异特征, 从地级市维度为地方生态环境保护与社会经济高质量发展提供建议。基于2010—2022年面板数据, 采用熵权法测算水资源和土地资源综合评价指数, 结合耦合协调度模型分析区域水土资源耦合度特征, 同时构建耦合演化模型, 通过演化速度函数及反映二者变化趋势差异的剪刀差, 解析水土资源耦合系统的演化过程。结果表明:(1)2010—2022年, 农牧区内蒙古市域水土资源耦合协调度呈稳步提升趋势, 平均值从2010年的0.5提升至2022年的0.8, 并存在地区间的差异;(2)农牧区内蒙古市域水土资源耦合协调度从低到高的三阶段演化过程中, 多数地区在耦合协调初期, 水、土资源系统演化速度差异较大, 系统耦合发展到高阶阶段后, 两大系统演变趋势呈现快速趋同特征。

**关键词:** 水土资源; 耦合协调度; 耦合演化; 内蒙古

**中图分类号:** F323.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8735(2026)02-0177-09

**DOI:** 10.3969/j.issn.1001-8735.2026.02.008

水土资源是人类生存与发展的基础, 关乎经济、社会与粮食安全<sup>[1]</sup>, 是农业、工业、城市建设等领域不可或缺的要害。水土资源的数量和质量对人类的生存和发展具有重要影响。一方面, 水土资源总量决定可利用土地的面积与适宜性, 进而影响农业生产规模和粮食安全。另一方面, 水土资源的质量直接关系到人类的健康和生态环境稳定。然而, 随着人口增长与经济快速发展, 人类对水土资源的需求持续增长, 水土资源承受的压力也不断加大<sup>[2]</sup>。在此背景下, 研究水土资源耦合协调演变规律, 可为资源优化配置与可持续利用提供科学依据, 对促进区域高质量发展、保障生态与粮食安全具有重要意义。近年来, 水土资源可持续利用成为了国内外学者的研究热点, 其中水土资源耦合协调研究是核心方向之一。现有研究主要聚焦水土资源承载力、水土资源安全、水土资源匹配等领域。在水土资源匹配定义方面, 徐娜<sup>[3]</sup>认为, 水土资源匹配是两种资源的平衡利用状态, 实践层面的研究有助于提升水资源利用效率, 空间层面的匹配则主要反映水土资源在空间上的分配利用比例关系; 在量化分析方面, 刘彦随等<sup>[4]</sup>率先提出水土资源匹配系数, 通过衡量单位面积水资源量评价地区水土资源匹配程度; 吴宇哲等<sup>[5]</sup>运用基尼系数测度水土资源整体匹配状况, 为相关研究提供新思路; 王悦等<sup>[6]</sup>运用基尼系数法、水土资源匹配系数与农业水土资源当量系数, 分析塔里木河流域水土资源时空匹配状况; 贺国等<sup>[7]</sup>采用基尼

收稿日期: 2025-06-18

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金资助项目“内蒙古资源环境承载力演变与调控机制研究”(2021LHBS07001); 内蒙古师范大学基本科研资助项目“内蒙古R&D投入演变特征与效率研究”(2022JBQN054); 内蒙古师范大学基本科研资助项目“乡村振兴背景下内蒙古传统牧区基础设施发展的现实依据与提升路径研究”(2022JBYJ004)。

作者简介: 斯日吉模楞(1989—), 女, 副教授, 主要从事自然资源与经济增长、经济结构与经济政策研究, E-mail: 839296745@qq.com。

通信作者: 沈新乐(1992—), 女, 讲师, 主要从事中国少数民族经济、区域经济、牧区经济研究, E-mail: 529640170@qq.com。

系数与泰尔指数相结合的方法,分析 2009—2020 年江苏沿海地区农业水土资源时空匹配及其效益的差异构成;Yi 等<sup>[8]</sup>提出了新型 SPH 多相界面处理方法,用于分析水土耦合模型;李晓燕等<sup>[9]</sup>基于统计法测算的单位耕地面积可利用水资源量,结合基尼系数分析山东省 17 个地级市农业水土资源时空分布与匹配程度。匹配系数法和基尼系数法因能直观反映水土资源的匹配程度而被广泛使用。综合来看,现有研究多聚焦农业部门单要素水土资源耦合协调,缺乏对多产业、多部门、多要素的综合分析,且静态研究方法难以揭示水土资源系统的动态演化机制,需开展更全面的研究以支撑区域可持续发展<sup>[10]</sup>。

内蒙古地处我国北部边疆,是我国重要的生态安全屏障、畜牧业生产基地和能源矿产基地。该地区人类活动强度大,且大部分植被地处干旱、半干旱农牧交错带,生态环境脆弱,是全球气候变化的敏感区域之一<sup>[11]</sup>。其水土资源状况对全国乃至全球生态环境均有重要影响。因此,本文针对内蒙古这一典型区域,探索其水土资源耦合协调度的演变规律、演化速度特征,以及与环保政策节点的关联性。

## 1 水资源系统与土地资源系统耦合作用机制解析

### 1.1 水资源系统维度解构

结合相关研究与内蒙古实际情况,本文从水资源数量、水资源开发利用方式、水资源管理三个维度分析水资源状况:水资源数量是衡量区域水资源丰富程度的重要指标;水资源开发利用方式主要指农业灌溉、工业用水、生态用水等水资源利用类型,直接关系水资源可持续利用和经济社会发展;水资源管理是政府、社会组织和个人对水资源的规划、配置、保护与治理的各类活动,是实现水资源可持续利用的重要保障。

### 1.2 土地资源系统维度解构

土地资源系统主要从土地数量、土地产出、土地利用方式、土地质量和生态四个维度衡量:土地数量指区域内土地资源总量,包括耕地、林地、草地等面积,是衡量土地资源丰富程度的基础指标;土地产出指区域内土地产出水平,反映农作物产出数量和土地肥沃程度;土地利用方式指人类对土地的利用方式,包括农业用地、工业用地、城市用地等关联土地资源的经济效益和社会效益;土地质量与生态是指土地肥沃程度、土壤质地、土壤酸碱度和污染治理等指标,直接影响土地生产力、利用价值与污染状况。

### 1.3 水资源-土地资源系统耦合形成及作用机制的解析

耦合度是指两个或两个以上系统或运动形式通过相互作用而彼此影响的现象,是各子系统间相互依赖、协调和促进的动态关联关系。通过采用耦合度来描述系统或要素彼此作用相互影响的程度,是衡量系统间依赖水平的重要指标<sup>[12]</sup>。

水资源与土地资源系统的“慢变量”(即序参量)能描述系统的有序程度,且其发展变化可带动系统整体发展。当水资源与土地资源系统间序参量作用的要素过程得到强化时,各子系统会产生协同效应,使系统整体处于有序状态;反之,若主导性的水资源子系统受到约束,其与土地资源子系统的相互作用难以有效发挥,将导致水土资源子系统难以形成协同效应,最终使水土资源系统陷入无序状态。因此,确定水土资源系统序参量对理解水资源与土地资源的内在关系尤为重要<sup>[13]</sup>。

水土资源耦合机制是多学科交叉研究领域,聚焦水土系统相互作用机理及其演变规律。本研究涵盖四大维度:水土循环耦合过程、资源空间分异特征、人类活动干扰机制及生态环境响应效应。研究成果可为区域资源优化配置、生态安全保障和可持续发展提供科学依据,对维护粮食安全、促进生态文明建设具有重要战略意义。

## 2 实证分析与结论

### 2.1 研究区概况

内蒙古地处中纬度内陆,土地总面积 118.3 万 km<sup>2</sup>,属典型大陆性季风气候,季节性差异明显,春季风大干旱、夏季温热短促、秋季气温骤降、冬季漫长严寒;年平均气温 -3.1~9.4℃,呈自南向北递减

趋势。内蒙古降水区域差异较大,年降水量 50~500 mm,自东向西逐渐减少,且受季风影响,降水集中在夏季,冬春季干旱;年蒸发量 1 000~3 000 mm,呈自东向西递增趋势<sup>[14]</sup>。内蒙古的水资源总量仅占全国的 1.92%,且因地形东西狭长,横跨多个气候区,进一步加剧了水土资源失调问题。其水资源在地区、时空分布上很不均匀,且与人口和耕地分布不匹配。东部黑龙江流域土地面积占全区的 27%,耕地面积占全区的 20%,人口占全区的 18%,而水资源总量占全区的 67%,人均水资源量为全区均值的 3.6 倍;中西部地区的西辽河、海滦河、黄河三大流域土地面积占全区的 26%,耕地占 30%,人口占 66%,但水资源仅占全区 24%,大部分地区水资源紧缺<sup>[15]</sup>。

## 2.2 研究方法

2.2.1 指标体系与系统综合评价模型 水资源-土地资源耦合系统分为水资源系统和土地资源系统两大体系,根据数据可获得性及研究内容的实际意义,区别于既往农业水土资源研究,本文整合农业、工业、生态多部门指标。依据科学性、针对性、现实性原则,并结合相关文献的研究方法,遴选了反映水土资源状况的 21 个二级指标<sup>[16]</sup>(表 1)。从系统维度解构出发,水资源系统从数量、开发利用方式和管理三个维度选取 11 个指标,土地资源系统则从数量、产出、利用方式、质量与生态四个维度选取 10 个指标,全面覆盖资源禀赋、利用效率与可持续性。结合内蒙古东西部资源差异,东部水资源丰富但利用粗放、西部干旱缺水及农牧矿多产业发展特点,针对性地纳入生态用水占比、经济密度等特色指标。其中水资源数量选取年降水量、人均水资源数量、产水模数与供水模数衡量。水资源开发利用方式主要体现人类活动影响,生态用水占比采用生态用水总量占总用水量的比例来衡量。水资源管理方式主要采用污水处理率、万元 GDP 用水量衡量。土地资源数量通过人均耕地面积、耕地比例来衡量。土地产出通过人均粮食产量、单位播种面积粮食产量衡量。土地利用方式通过人均建设用地面积、人均公园绿地面积、森林覆盖率衡量。土地质量与生态通过经济密度、生活垃圾处理率、化肥施用强度衡量。

表 1 水资源-土地资源系统评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water resources-land resources system

耦合子系统	一级指标	二级指标(变量/单位)	指标属性
水资源	水资源数量	年降水量( $x_1/\text{mm}$ )	+
		人均水资源量( $x_2/\text{m}^3$ )	+
		产水模数( $x_3/(\text{万 m}^3\cdot\text{km}^{-2})$ )	+
		供水模数( $x_4/(\text{万 m}^3\cdot\text{km}^{-2})$ )	+
	水资源开发利用方式	农业用水占比( $x_5/\%$ )	-
		工业用水占比( $x_6/\%$ )	-
		生活用水占比( $x_7/\%$ )	-
		生态用水占比( $x_8/\%$ )	+
		水资源开发利用率( $x_9/\%$ )	+
		污水处理率( $x_{10}/\%$ )	+
		万元 GDP 用水量( $x_{11}/\text{m}^3$ )	-
土地资源	土地数量	人均耕地面积( $y_1/\text{hm}^2$ )	+
		耕地比例( $y_2/\%$ )	+
	土地产出	人均粮食产量( $y_3/\text{t}$ )	+
		单位播种面积粮食产量( $y_4/(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$ )	+
	土地利用方式	人均建设用地面积( $y_5/\text{m}^2$ )	-
		人均公园绿地面积( $y_6/\text{m}^2$ )	+
		森林覆盖率( $y_7/\%$ )	+
	土地质量和生态	经济密度( $y_8/\%$ )	-
		生活垃圾处理率( $y_9/\%$ )	+
		化肥施用强度( $y_{10}/(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$ )	-

表 1 显示,水资源体系二级评价指标 : $x_1, x_2, \dots, x_{11}$  描述了水资源体系特征。定义  $F(x)$  为水资源体系综合评价函数,则有

$$F(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_{11}) \tag{1}$$

$F(x)$  为非线性函数,水资源体系综合评价函数可近似表示为

$$F(x) = \sum_{i=1}^{11} a_i x_i \tag{2}$$

同理,定义  $G(y)$  为土地资源体系综合评价函数,其线性加权近似形式为

$$G(y) = \sum_{i=1}^{10} b_i y_i \tag{3}$$

其中,  $a_i, b_i$  分别为水资源、土地资源评价指标对应的权重(因研究对象为内蒙古各盟市,具体权重系数不再逐一列举),权重通过熵权法计算确定。综合评价函数的计算结果可表征对应资源系统的发展综合水平,本文将其定义为“综合评价指数”。

2.2.2 耦合协调度测度模型 借鉴廖重斌<sup>[17]</sup>提出的经济与环境协调发展模型,水资源-土地资源耦合度测度公式可表示为

$$C = \left\{ \frac{f(x) \cdot g(y)}{\left[ \frac{f(x) + g(y)}{2} \right]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

其中,  $f(x), g(y)$  分别为前文定义的水资源、土地资源综合评价函数;  $C \in [0, 1]$  为耦合度,表征水土资源之间的相互作用强度。

为消除水资源与土地资源系统要素特征量之间的量纲差异,对基础数据进行无量纲化处理,公式为

$$\begin{aligned} \mu_{ij} &= (X_{ij} - \beta_{ij}) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}), X_{ij} \text{ 具有正功效,} \\ \mu_{ij} &= (\alpha_{ij} - X_{ij}) / (\alpha_{ij} - \beta_{ij}), X_{ij} \text{ 具有负功效.} \end{aligned} \tag{5}$$

其中,  $\mu_{ij}$  为第  $i$  个序参量的第  $j$  个指标的无量纲化值,  $\alpha_{ij}, \beta_{ij}$  分别为系统稳定临界点序参量相应指标的上、下限值,  $X_{ij}$  为指标实际值,  $\mu_i (i=1, 2, \dots, m)$  为系统序参量。

耦合度  $C$  虽然能够反映水土资源间的相互作用强度,但无法反映两个系统间的协调发展水平。因此,本研究构建综合协调模型:

$$T = a \cdot f(x) + b \cdot g(y) \tag{6}$$

其中,  $T$  为水资源与土地资源综合协调指数,  $a, b$  为子系统贡献度待定系数。由于在社会经济发展过程中,水资源对土地资源的开发有约束作用,同时土地资源也会对水资源的开发有约束作用,本研究借鉴王淑佳等<sup>[18]</sup>的做法,取  $a=b=0.5$ 。并在此基础上,构建系统耦合协调度模型:

$$D = \sqrt{C \times T} \tag{7}$$

其中,  $D$  为系统耦合协调度,  $C$  为耦合度,  $T$  为水资源与土地资源综合协调指数。为揭示水土资源的耦合协调程度,结合已有研究<sup>[19]</sup>,按照耦合协调度的大小,采取广泛应用的“十分法”对水土资源耦合程度进行划分,具体见表 2。

2.2.3 耦合演化模型 水资源-土地资源系统的演化是一种复杂的非线性过程。依据一般系统理论,该复合系统的演化方程可以表示为

$$F(x, t) = dF(x)/dt, G(y, t) = dG(y)/dt \tag{8}$$

$F(x, t), G(y, t)$  为受自身与外界影响下,复合系统的演化状态。令

$$v(x) = dF(x, t)/dt, v(y) = dG(y, t)/dt \tag{9}$$

式中,  $v(x), v(y)$  分别表示水资源与土地资源体系的演化速度。将  $v(x), v(y)$  的演化轨迹投影到同一二

维平面,在某一时间点,两曲线切线的夹角  $\alpha$  满足

$$\tan \alpha = \frac{v(x)}{v(y)}, \alpha = \arctan [v(x)/v(y)], \quad (10)$$

其中,  $\alpha$  反映了水资源和土地资源系统变化趋势的特征与差异,此研究方法称为“剪刀差”法<sup>[20]</sup>。

### 2.3 结果与讨论

2.3.1 数据来源与预处理 本文收集 2010—2022 年内蒙古 11 个盟市(阿拉善盟因数据缺失较多被剔除)的 21 项水土资源特征指标时间序列数据,数据来源于《内蒙古水利统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》、各盟市统计年鉴、各盟市农牧局与生态环境局官网、各盟市政府工作报告等。对缺失值采用线性插值法处理;为消除量纲差异,利用公式(5)对基础数据进行无量纲化处理。

2.3.2 耦合协调度结果 本文运用公式(4)—公式(7)分别计算了内蒙古 11 个盟市的水土资源的耦合度、协调度与耦合协调度(图 1)。

从测算结果来看,水土资源系统耦合度总体较高,其值在 0.8 以上,但存在显著的时空差异,空间上呈“西部工业城市>中部中心城市>东部农业/牧区”的分布格局,表明两个系统间相互作用较大,但无法反映两个系统之间协调水平的高低。因此,本文进一步测算了两个系统的协调度,从水土资源综合协调指数来看,两个系统之间的协调程度较低:2010—2011 年几乎所有地区的水土资源综合协调指数均低于 0.4;2011—2018 年几乎所有地区的水土资源综合协调指数均低于 0.6;2019—2022 年水土资源综合协调指数在 0.6~0.8 间波动。总体来看,各地区水土资源协调度在波动中上升。

表 2 耦合协调度等级划分标准

Tab. 2 Classification standards for coupling coordination degree

耦合协调度 $D$ 值区间	协调等级	耦合协调程度
$0.0 \leq D < 0.1$	1	极度失调
$0.1 \leq D < 0.2$	2	严重失调
$0.2 \leq D < 0.3$	3	中度失调
$0.3 \leq D < 0.4$	4	轻度失调
$0.4 \leq D < 0.5$	5	濒临失调
$0.5 \leq D < 0.6$	6	勉强协调
$0.6 \leq D < 0.7$	7	初级协调
$0.7 \leq D < 0.8$	8	中级协调
$0.8 \leq D < 0.9$	9	良好协调
$0.9 \leq D \leq 1.0$	10	优质协调

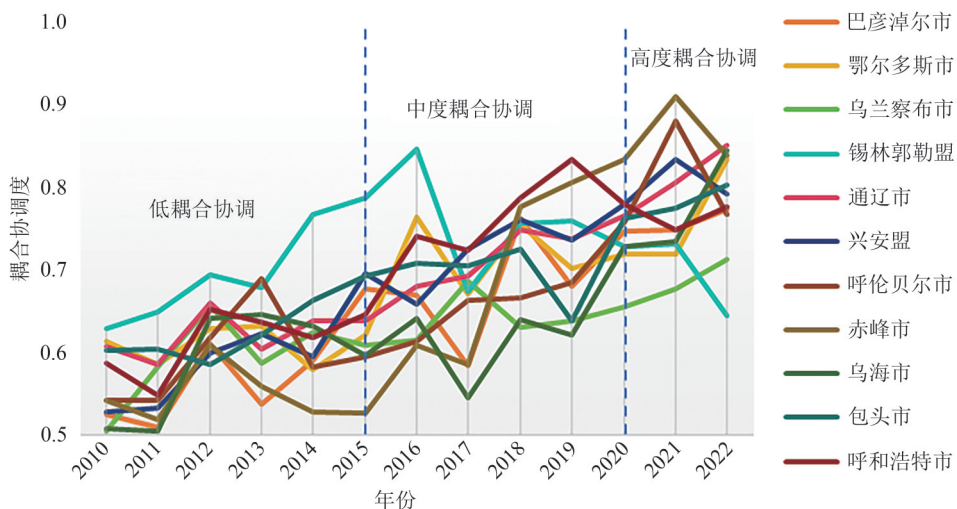


图 1 水土资源耦合协调度

Fig. 1 Coupling coordination degree of water and soil resources

从图 1 中的耦合协调度来看,2010—2022 年内蒙古各盟市(农牧区)水土资源耦合协调度总体呈“由低到高”的发展趋势,且区域差异特征显著。赤峰市表现出快速且大幅的提升趋势,后期稳定维持高水平协调状态,主要得益于大力实施的生态治理工程(植树造林和草原修复等水土保持措施)、产业结构的优化升级(淘汰高耗水高污染产业,发展节水高效农业和生态旅游)、细化的水资源管理(强化

调配与节水技术推广)。鄂尔多斯市协调度呈现波动上升态势,至 2021 年达到峰值,这与其经济发展过程中同步推进的生态修复政策密切相关,特别是矿区生态恢复工程和节水型工业的发展,同时政策引导发挥了关键支撑作用。通辽市协调度的持续上升趋势得益于农业领域节水灌溉技术的大规模推广应用,如膜下滴灌等先进技术。在保障粮食安全的同时实现了水资源高效利用,辅以持续推进的生态建设措施,进一步推动了协调度提升。包头市作为典型工业城市,其协调度稳步上升,反映了产业转型过程中对水资源循环利用的重视,包括钢铁和化工等传统产业的节水技术改造,以及城市生态建设中绿地面积增加和水体修复等举措。兴安盟协调度维持较高水平且后期小幅提升,这既得益于其优越的生态条件,如丰富的森林和湿地资源,也源于其坚持发展生态农业和绿色产业的可持续发展模式。锡林郭勒盟草蓄协调度呈“前期高值-中期波动-后期稳定”特征,主要归因于草原生态保护政策的持续实施(退牧还草)与草原畜牧业合理发展的协同推进。相比之下,乌海市整体协调水平相对滞后,呈现缓慢上升趋势,这与其以煤炭和化工等高耗水产业为主且转型进程缓慢的产业结构以及水资源禀赋匮乏的客观条件密切相关。呼伦贝尔市虽呈波动上升趋势,但峰值水平相对较低且后期存在波动,反映了其广阔地域内区域发展不均衡的现实。乌兰察布市耦合协调度从较低水平逐步提升至中度协调状态,其提升速度相对缓慢,主要原因包括:传统农业高耗水的特征改善进程滞后;生态脆弱区的治理面临较大技术难度与较长恢复周期。各盟市水土耦合协调度的空间异质性主要受自然条件禀赋、产业结构特征、政策执行力度及资金投入规模等多重因素的共同影响,未来需采取差异化策略,因地制宜提升水土资源协调利用水平。

从发展阶段来看,内蒙古水土资源耦合协调进程可划分为如下三个阶段(图 1)。

(1)低耦合协调阶段(2010—2015 年)。内蒙古是中国第二大草原分布区,煤炭资源储量居全国第二,仅次于山西省。得天独厚的资源禀赋优势在其社会经济发展过程中发挥了重要的作用。煤炭资源产业是内蒙古传统支柱产业,在社会经济发展中具有举足轻重的作用,但同时也带来了一系列的环境问题。大量开发利用的土地资源与水资源利用严重失调,在 2010—2015 年间内蒙古 11 个盟市多数地区水资源和土地资源的耦合协调度处在 0.5~0.7 之间,呈“勉强协调-低协调”特征。

(2)中度耦合协调阶段(2015—2020 年)。2015 年修订的《中华人民共和国环境保护法》(简称新《环保法》)中明确要求降低企业污染排放、支持低碳经济,这也为内蒙古煤炭企业绿色低碳转型提出了更高要求。在严格环境规则的约束下,煤炭企业的开采逐渐向环境友好型转变。2015 年开始内蒙古 11 个盟市水土资源耦合协调度明显提升,2015—2020 年多数地区水土资源耦合协调度处于 0.7~0.8,呈现出中级协调特征,但仍然存在不同地区间的差异,如呼伦贝尔市和乌海市两个地区水土资源耦合协调度较低。

(3)高度耦合协调阶段(2020—2022 年)。新《环保法》的持续实施推动社会经济绿色转型,而 2020 年“双碳”目标的提出进一步加快了煤炭减排步伐,引导绿色技术创新与产业竞争力提升。内蒙古持续调整产业结构和能源结构,大力发展可再生能源,在沙漠、戈壁、荒漠地区加快规划建设大型风电光伏基地项目,实现了经济发展与绿色转型的协同推进。因此,内蒙古多数地区水土资源的耦合协调度已提升至“高度协调”水平。

2.3.3 系统耦合演化分析 为深入探究内蒙古不同区域水土资源的耦合特征,本研究基于时序拟合方法,对典型盟市的水资源与土地资源指数进行回归分析,并利用决定系数( $R^2$ )评估拟合优度。在典型区域选取上,依据内蒙古地理分区特点,分别选取赤峰市代表蒙东地区、呼和浩特市代表蒙中地区、鄂尔多斯市代表蒙西地区,作为分析样本。通过对上述典型城市的测算,系统揭示内蒙古不同区域水土资源耦合的时空演变规律。以赤峰市为例,其水资源与土地资源四阶时序拟合方程分别为

$$F_c(x) = -0.00614t^4 + 0.03613t^3 - 0.09511t^2 + 0.12132t + 0.16112, \quad (11)$$

$$G_c(y) = 0.00968t^4 - 0.05117t^3 + 0.07791t^2 + 0.07395t + 0.25749. \quad (12)$$

上述方程为四阶多项式,拟合效果良好。对拟合方程两边求导(见公式(9)),得到各子系统的演化

速度函数:

$$v_c(x) = -0.02456t^3 + 0.10839t^2 - 0.19022t + 0.12132, \quad (13)$$

$$v_c(y) = 0.03872t^3 - 0.15351t^2 + 0.15582t + 0.07395, \quad (14)$$

式中  $v_c(x)$ 、 $v_c(y)$  分别反映了赤峰市水土资源子系统的演化速度。分析可知,水资源系统的演变速度呈上升趋势,而土地资源系统的演变速度呈下降趋势。根据公式(10)计算赤峰市水土资源变化趋势的夹角  $\alpha$ ,即“剪刀差”。通过测算发现,2010—2012年夹角  $\alpha$  逐渐减少,反映赤峰市水土资源演变速度逐渐趋同。2012—2022年夹角  $\alpha$  逐渐呈平缓变化趋势,表明水土资源演变速度趋同。

沿用相同方法,本研究对呼和浩特市和鄂尔多斯市的水土资源子系统演变速度及差异进行分析。研究发现,呼和浩特市水土资源系统演变速度整体呈下降趋势。从耦合演化过程看,水资源与土地资源子系统的演变速度呈明显非同步特征,二者变化趋势间的夹角呈动态扩大趋势。具体来看,水资源子系统在2010—2012年快速增长后,自2013年起进入持续负增长阶段,2016年后负增长幅度进一步收窄;土地资源子系统整体波动较小,增速呈微升态势。这种“水资源增速下行、土地资源增速微升”的背离格局,使2010—2013年处于较小状态的“剪刀差”持续扩大,反映出水土资源子系统的协调度逐步降低。该特征表明,呼和浩特市面临着“水资源约束趋紧”与“土地开发需求上升”之间的突出矛盾。

鄂尔多斯市水资源演变速度呈上升趋势,而土地资源演变速度则呈下降趋势,表明该市土地资源开发强度有所减弱。从演化趋势发现,2010—2015年夹角  $\alpha$  波动特征显著,说明该阶段水土资源演变速度存在明显不一致,与同期较低的耦合协调度相吻合。自2015年起夹角  $\alpha$  逐渐趋于平缓上升,2020年后转为平缓下降,反映出水土资源演变速度自2015年开始逐步趋同。值得注意的是,这一转折点与我国2015年实施新《环保法》及2020年提出“双碳”目标的时间高度契合,说明鄂尔多斯市作为内蒙古重要煤炭资源型城市,其水土资源耦合协调度的提升受到政策制度的影响。

从不同盟市水土资源耦合协调“剪刀差”的变化趋势来看,各区域的共同特征是:2012年前后“剪刀差”普遍进入收窄并趋于平缓的阶段,水土资源系统变化趋势的协同性明显提升。这一变化可能与2010年修订、2011年正式实施的《中华人民共和国水土保持法》密切相关。该法的施行规范了各地区土地资源的有效利用,促进了水土资源系统的协调发展。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本文在对内蒙古水资源与土地资源两大系统进行维度解构与动力机制分析的基础上,解析了二者的相互关系及作用机制,认为两大系统存在协同配合关系,并通过相互作用、相互影响,共同推动水土资源系统的运作、演化与可持续发展。本研究以内蒙古自治区11个盟市的水土资源状况为研究对象,分别构建了包含11个二级指标的内蒙古自治区水资源评价指标体系和包含10个二级指标的内蒙古自治区土地资源评价指标体系;根据2010—2022年各盟市的时间序列数据,计算得出综合评价指数、耦合度、协调度与耦合协调度。

为了具体量化各盟市的耦合协调指数,采取普遍运用的十分法对耦合协调度进行等级划分,这一指数越高即表示耦合协调度等级越高。计算结果显示,各盟市水土资源耦合协调过程划分为低耦合协调、中度耦合协调和高度耦合协调三个阶段。低耦合协调阶段(2010—2015年),耦合度较高,协调度较低,受综合评价指数的影响,耦合协调发展度普遍低于0.7,呈现勉强协调和低协调度的特征;中度耦合协调阶段(2015—2020年),在2015年新《环保法》推动下,水土资源的耦合协调度逐渐上升,大多数地区处在中度耦合协调发展水平;高度耦合协调阶段(2020—2022年),2020年“双碳”目标驱动下,地区水土资源耦合协调度进一步提升,多数地区达高度耦合协调发展水平。其中鄂尔多斯市、锡林郭勒盟等煤炭资源型城市的耦合协调特征与三个阶段高度吻合。

基于各子系统拟合曲线,分别求得了两者的演化速度函数,结合“剪刀差”分析其演化过程及特征。

演化过程中,多数地区在耦合协调初期“剪刀差”较大或波动明显(即两大子系统演化速度差异显著),进入中度、高度耦合协调阶段后,“剪刀差”逐渐趋于平缓(即两大子系统演化趋势快速趋同)。

### 3.2 对策建议

3.2.1 构建分区适配的协同干预体系 针对内蒙古水土资源耦合协调的阶段性演进规律与区域异质性特征,构建“政策-技术-监管”三位一体协同干预机制。在政策分层设计层面:生态脆弱区实施草场轮休与地下水开采红线管控的生态优先型政策组合;工业主导区推行矿区生态修复与工业用水重复利用率提升的循环集约型政策组合。在技术精准嫁接层面:干旱区域推广“光伏+滴灌”节水模式,矿区采用煤基固废充填复垦技术,实现资源利用与生态保护的协同推进。

3.2.2 创新水土资源协同增效的碳中和实现路径 一是分类施策提升土地碳汇能力,在农田推广耐旱作物与节水技术,在退化草原种植固碳植物,在矿区探索“光伏+生态修复”模式。二是建立“节水-降碳-收益”联动机制,将再生水利用、农业节水纳入碳交易体系,推动节水行为向经济收益转化。三是完善政策保障体系,明确水土资源碳汇贡献目标,通过财政补贴、税收优惠等激励措施,引导企业和社会资本参与生态修复项目。通过“保护-修复-收益”的良性循环,最终实现生态效益与经济效益的双赢。

### 3.3 讨论

本文以内蒙古地区为研究样本,揭示了区域水土资源系统耦合协调发展的时空演变特征与演化规律。在内蒙古水资源和土地资源系统耦合度定量研究中,各子系统评价指标体系的构建是其基础。虽然本文对内蒙古自治区水土资源评价指标体系做了大量研究,但受“现实数据可得性”与“参考研究局限性”影响,指标体系还有待进一步检验和完善。构建一个完整科学的水土资源评价指标体系是持续探索的过程。结合实地调查是构建水土资源评价指标体系的有效途径。未来研究应重点聚焦水土资源评价指标体系的完善,结合实地调查补充干旱区特色指标,如草原生态需水量、沙化土地修复潜力等,构建“盟市-旗县-嘎查”三级验证体系。同时,整合传统生态知识与现代技术,开发动态智慧评价平台,探索“水-土-碳”协同机制,为干旱区资源管理提供科学支撑。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 杨宏轶,赵华甫. 耕地结构变化下水土资源匹配时空特征效应分析:以黑龙江省为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2247-2263.
- [3] 徐娜. 甘肃省内陆河流域农业水土资源匹配度及其优化调控[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2019.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王悦,蒋志辉,褚家琦,等. 塔里木河流域农业水土资源时空匹配关系研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 360-370.
- [7] 贺仓国,姚怀柱,于广浒,等. 江苏沿海地区农业水土资源匹配及其效益差异分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(2): 110-116.
- [8] YI C, CHEN J Y, HU M, et al. A new SPH multi-phase interface treatment method for soil-water interaction modeling [J]. Computers and Geotechnics, 2025, 185: 107282.
- [9] 李晓燕,郝晋珉,陈爱琪. 山东省农业水土资源时空匹配格局及评价研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(11): 1-11.
- [10] LU W N, LIU W X, HOU M Y, et al. Spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of agricultural water use efficiency in northwest China: Based on a super-DEA model and a spatial panel econometric model[J]. Water, 2021, 13(5): 632.
- [11] 孙根年,王美红. 内蒙古植被覆盖与土地退化关系及空间结构研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 140-144.
- [12] 杨浩,吴才武,周思言,等. 京津冀地区城镇化与资源环境协调发展研究[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(9): 17-24.

- [13] 吕添贵, 吴次芳, 游和远. 鄱阳湖生态经济区水土资源与经济发展耦合分析及优化路径[J]. 中国土地科学, 2013, 27(9): 3-10.
- [14] 李庆, 周娜, 王盛, 等. 气候变化和人类活动对土壤风蚀影响的定量评估:以内蒙古自治区为例[J]. 中国沙漠, 2024, 44(1): 178-188.
- [15] 内蒙古自治区人民政府. 水资源公报[R]. 呼和浩特:内蒙古自治区人民政府, 2022.
- [16] 张恩月, 苏迎庆, 张云枫, 等. 汾河流域水土资源耦合协调格局及驱动因素[J]. 中国沙漠, 2023, 43(3): 169-177.
- [17] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177.
- [18] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793-810.
- [19] 李强, 苏迎庆, 冯珍珍, 等. 汾河流域三生空间功能耦合协调研究[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2021, 19(5): 115-125.
- [20] 韩瑞玲, 佟连军, 佟伟铭, 等. 沈阳经济区经济与环境系统动态耦合协调演化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(10): 2673-2680.

## Spatiotemporal Evolution Characteristics of Coupling and Coordinated Development of Water and Land Resources in Typical Rural and Pastoral Areas

Sirijimoleng<sup>1</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, SHEN Xinle<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China;

2. Party School of the Communist Party of China, Naiman Banner Committee, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China;

3. School of Ethnology and Anthropology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

**Abstract:** To explore the spatiotemporal differentiation characteristics of the coupling and coordinated development of water and land resources in typical rural and pastoral areas of Inner Mongolia, this study provided suggestions for ecological environmental protection and high-quality socioeconomic development at the prefecture-level city scale. Based on panel data from 2010 to 2022, the entropy weight method was employed to calculate the comprehensive evaluation indices of water resources and land resources. The coupling coordination degree model was then used to analyze the characteristics of regional water-land resource coupling. Meanwhile, a coupling evolution model was constructed. By applying an evolution speed function and the “scissor difference,” which reflects the divergence in the changing trends of the two systems, the evolutionary process of the water-land resource coupling system was further examined. Results are as follows. (1) From 2010 to 2022, the coupling and coordination degree of water and land resources in the rural and pastoral areas of Inner Mongolia showed a steady upward trend, with the average value increasing from 0.5 in 2010 to 0.8 in 2022, exhibiting regional differences. (2) In the three-stage evolutionary process of water and land resource coupling and coordination, from low to high, most areas experienced significant differences in the evolution speed of the water and land resource systems during the early stages of coupling coordination. After the systems evolved to the higher stage of coupling, the evolution trends of the two systems exhibited a rapid convergence.

**Key words:** water and land resources; coupling coordination degree; coupling evolution; Inner Mongolia

【责任编辑 闫立华】