

引用格式:薛东前,王莎,王佳宁,等.黄土高原乡村“人水土”系统协同与机制[J].资源科学,2022,44(9):1809-1823.[Xue D Q, Wang S, Wang J N, et al. Coordination of human-water-land system and mechanism in rural areas of the Loess Plateau[J]. Resources Science, 2022, 44(9): 1809-1823.] DOI: 10.18402/resci.2022.09.06

# 黄土高原乡村“人水土”系统协同与机制

薛东前,王莎,王佳宁,唐宇

(陕西师范大学地理科学与旅游学院,西安 710119)

**摘要:**快速工业化、城镇化和现代化使得乡村地域系统面临的压力愈加突出,对乡村人地关系及资源组合状况的研究,是面向乡村振兴战略,实现乡村地域协调与高质量发展的科学基础。基于2000—2018年黄土高原313个县级行政单元数据,在构建乡村“人水土”系统指标体系的基础上,采用熵权TOPSIS法、空间自相关模型、GWR模型等方法研究3个子系统的时空分异规律,识别系统间的协同关系及其主要类型,揭示系统协同演化驱动机制。结果表明:①黄土高原乡村人类活动强度指数和水资源指数空间分布格局具有一致性,与土地资源指数空间错位显著,3个子系统指数均以较低水平等级为主,县域间不平衡性突出,但有减弱趋势。②黄土高原乡村系统协同关系类型以双维度制约型为主,研究时段内该类型县域数量呈倒U型变化特征,综合协调型县区数量逐渐增多,说明乡村逐步向高水平协调方向发展。③系统协调发展受自然及社会经济要素形成的资源分布与组合、流动与分配、资源需求利用及人口流动转移四元驱动机制所影响,不同要素对系统权衡强度和协调状态的作用不同。本文对优化乡村地域水土资源配置,促进乡村“人水土”系统协调演进有一定的借鉴意义。

**关键词:**乡村“人水土”系统;时空格局;协同关系;影响因素;黄土高原

DOI: 10.18402/resci.2022.09.06

## 1 引言

21世纪以来,伴随着工业化和城镇化进程的加快,“城进村衰”问题日益突出,乡村人口、资金、土地等要素不断流向城市,城乡发展差距显著<sup>[1]</sup>。乡村出现了人地分离、水土环境污损化、农业主体老弱化、村庄用地空废化等乡村病<sup>[2]</sup>。不仅中国,世界范围内的城市化过程都出现了乡村衰退问题,但乡村和城市是一个有机整体,均应实现可持续发展,以此相互支撑<sup>[3]</sup>。为此,中国相继提出了关注“三农”“统筹城乡发展”“新农村建设”、实施“乡村振兴”、推动“农业农村现代化”等多项方针政策<sup>[4]</sup>。目前,乡村振兴及其发展仍是国家和学术界关注的焦点<sup>[2,4-7]</sup>,2022年发布的中央一号文件也强调面对百年变局和世纪疫情,要继续全面推进乡村振兴,推动农业农村现代化迈出新步伐。乡村振兴战略的实施是解决乡村病的客观需要,而乡村病产生的根

源是乡村地域系统各要素间的失调<sup>[8]</sup>。因此识别与整合乡村资源要素的本底条件及其组合状况以实现乡村地区人地关系和谐发展<sup>[9-11]</sup>,助力乡村振兴,已然成为亟需探究和解决的关键问题。

在乡村地理学研究领域中,乡村地域系统的要素整合及资源可持续利用是乡村发展研究的重要内容之一<sup>[9]</sup>。通过梳理文献发现相关研究多集中于人口、资源要素方面,传统的人地要素研究更关注单一要素或单一子系统<sup>[12-15]</sup>的区域分异和发展演化过程。但随着人类活动强度的加大以及地理环境相互联系的紧密化,多要素综合系统的研究得到更多关注,尤其是在协同关系及演化机制方面<sup>[16,17]</sup>。当前,已有的关于多要素的研究多面向城市地区,针对乡村地区的研究较少<sup>[18-20]</sup>;对人口水资源、人口土地资源演化特征,及水土资源匹配状况的研究较多<sup>[17-19]</sup>,基于人口、资源视角探讨人类活动强度与自

收稿日期:2022-04-26;修订日期:2022-08-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1100101)。

作者简介:薛东前,男,内蒙古包头人,教授,研究方向为城市与区域发展。E-mail: lxuedq@snnu.edu.cn

然资源要素间协同关系和作用机制的研究较为缺乏<sup>[18-22]</sup>。人口资源是乡村发展的主体,水土资源是乡村发展的本底性条件,三者之间相互关联、制约、依存,三者关系的协调有助于推动乡村高质量发展。现实状况下乡村地区受自然条件及人类活动的综合影响,人口、水资源、土地资源的空间分布差异显著,存在匹配错位现象<sup>[23]</sup>,加剧了人水土要素的不均衡性,制约了乡村可持续发展<sup>[24]</sup>。因此厘清乡村人水土系统协同关系,推动乡村人水土关系和谐已成为乡村发展的重点方向和乡村地域系统协调发展的关键因素。

黄土高原地处中国内陆,作为典型的生态脆弱区,水资源是制约该地区社会经济发展的重要因素。西部大开发政策的实施使得黄土高原地区经济得以快速发展,但同时乡村地域系统各要素的不均衡性和不匹配性加剧,脆弱性及扰动性风险加强<sup>[25]</sup>,乡村高质量发展及乡村韧性的提高受到制约。基于此,本文以黄土高原县域单元数据为基础,研究黄土高原乡村人口、水及土地资源3个子系统的空间分异特征,探究系统之间的协同关系和影响机制,为缓和黄土高原乡村人水土矛盾,推动人水土关系和谐发展提供一定的参考借鉴。

## 2 研究区概况、方法、指标体系与数据

### 2.1 研究区概况

黄土高原地处中国内陆,位于中国第二阶梯,总面积  $64.87 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地势西北高东南低,地形破碎,沟壑纵横。根据《黄土高原地区综合治理规划大纲(2010—2030年)》,该区域分为黄土高原沟壑区、黄土丘陵沟壑区、土石山区、河谷平原区、沙地和沙漠区以及农业灌溉区六大治理区(图1)。2018年,全区水资源仅占全国的2.35%,人均水资源量  $566.12 \text{ m}^3/\text{人}$ ;草地和耕地是该区最主要的土地利用类型;乡村人口占45.83%,农村居民以从事第一产业为主,一产从业比为60.08%。区域生态环境脆弱,水土资源空间配置不均,在快速城镇化和工业化过程中,区域人类活动强度和资源环境基础状况变化剧烈,特别是随着农业农村现代化的推进,乡村人、水、土及其相互作用关系发生了重大重组,优化乡村人水土关系成为实现乡村振兴的科学基础。

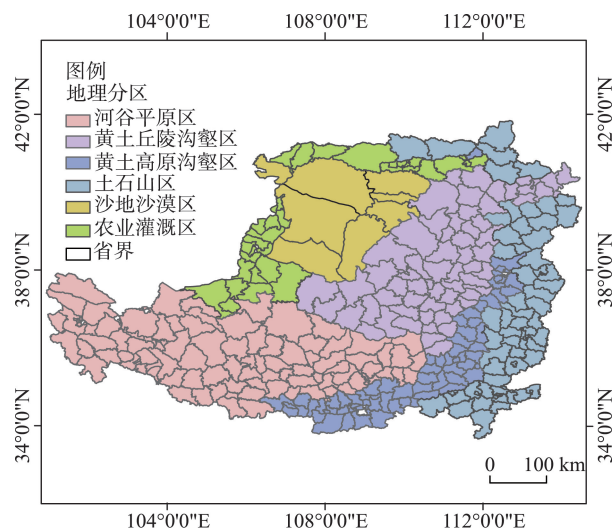


图1 黄土高原六大地理分区

Figure 1 Six geographical divisions of the Loess Plateau

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 熵权 TOPSIS 法

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 法是一种向理想解不断逼近的多目标决策分析方法<sup>[26]</sup>。本文通过比较乡村“人水土”系统现实状态和理想状态之间的贴近程度来研判其发展水平,测算黄土高原乡村3个子系统的综合指数。计算公式如下:

$$C^* = \frac{D_n^-}{(D_n^+ + D_n^-)} \quad (1)$$

式中:  $C^*$  指各县指标对理想解的贴近度;  $D_n^+$  与  $D_n^-$  分别指每个县级行政单元各项指标到正理想解与负理想解的距离。

#### 2.2.2 权衡强度模型

为了探究黄土高原乡村“人水土”3个子系统间的相互关系,本文构建了权衡强度模型,测算权衡强度指数,即3个子系统指数到平衡状态的距离,揭示系统间的空间协调关系<sup>[27]</sup>。计算公式如下:

$$D = i \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ki} - \bar{x}_k)^2} \quad (2)$$

式中:  $D$  为系统权衡强度指数;  $n$  为县区数量;  $x_{ki}$  为县区  $i$  的  $k$  子系统观测值;  $\bar{x}_k$  为  $k$  子系统综合指数的平均值。

#### 2.2.3 空间自相关

空间自相关是指同一个变量在不同空间位置

2022年9月

上的相关性,用来验证变量在研究区域上是否存在空间集聚。本文采用全局Moran's  $I$ 指数来反映黄土高原乡村“人水土”权衡强度指数的空间集聚度。计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中:  $x_i$  是县区  $i$  的属性值;  $w_{ij}$  为空间权重矩阵;  $\bar{x}$  为平均数。全局Moran's  $I$ 指数取值介于-1.0~1.0之间,大于0表示空间正相关,小于0表示空间负相关,等于0表示空间呈随机分布。

#### 2.2.4 地理加权回归

本文利用ArcGIS10.2软件,基于对2018年黄土高原权衡强度指数的空间自相关分析和最小二乘回归分析结果,选取了自然(地形、热量)<sup>[28-31]</sup>、社会经济(城镇化率、地均生产总值、第一产业产值、路网密度)<sup>[32-36]</sup>6个因素,采用地理加权回归模型,通过局部回归来研究变量的空间异质性<sup>[37]</sup>,揭示2018年自然及社会经济要素对系统协同关系的影响程度。计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_m \beta_m(u_i, v_i) x_{im} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中:  $y_i$  为乡村“人水土”系统权衡强度指数;  $(u_i, v_i)$

是县区  $i$  的坐标;  $\beta_0(u_i, v_i)$  为回归方程的截距;  $\beta_m(u_i, v_i)$  即县区  $i$  第  $m$  自变量的回归系数;  $x_{im}$  即县区  $i$  的第  $m$  个自变量;  $\varepsilon_i$  为误差项。

#### 2.3 指标体系构建

人类活动强度是在一定区域内人类对乡村自然资源和环利用、改造和开发的程度<sup>[26]</sup>。水资源是人类生产生活的要素,土地资源是农业生产的重要载体,人类利用水土资源的同时又会对其产生影响。构建科学的“人水土”指标体系是识别乡村人水土空间分异规律,优化乡村人水土关系的量化基础。因此本文借鉴已有的研究成果<sup>[28,32,33]</sup>,依据系统性、典型性和可行性等原则,基于黄土高原地区的地方性特征构建了3个目标层,12个准则层,16个指标层的乡村“人水土”指标体系(表1)。其中,乡村常住人口数量作为乡村发展的主体,反映乡村人口绝对规模,乡村人口密度反映乡村人口集聚情况,其值越大,对资源、环境的开发利用程度越高;农业发展对自然资源依赖性强,同时也是乡村地区的主体产业,乡村一产就业比能够反映人类对水土资源的开发利用程度;人口流动比反映乡村人口流动情况。年均降水量和河网密度反映区域内水资源的丰裕程度;农业用水、人畜用

表1 乡村“人水土”综合指数评价指标体系

Table 1 Indicator system of rural human-water-land comprehensive evaluation index

目标层	准则层	指标层	指向
人类活动强度指数	乡村人口规模	乡村常住人口数量/人	+
	乡村就业状况	乡村一产就业占比/%	+
	乡村人口流动情况	乡村人口流动占比/%	+
	乡村人口集聚状况	乡村人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	+
水资源指数	水资源禀赋	年均降水量/mm	+
		河网密度/(km/km <sup>2</sup> )	+
	水资源利用	农业用水量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	-
		乡村人畜需水量/10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup>	-
		单方水粮食产量/(kg/m <sup>3</sup> )	+
	水资源效益	乡村水环境状况/(t/m <sup>3</sup> )	-
土地资源指数	土地资源禀赋	耕地面积/km <sup>2</sup>	+
		草地面积/km <sup>2</sup>	+
	土地资源利用	乡村建设用地开发强度/%	-
		土地垦殖率/%	-
	土地生产效益	农业土地生产率/%	+
	土地环境压力	农业面源污染强度/(kg/km <sup>2</sup> )	-



水反映乡村对水资源的需求程度,单方水粮食产量反映区域水资源的农业生产效益;乡村水环境状况以测算农田化肥、畜禽养殖及农村生活三面对水环境的污染排放量来衡量,反映乡村人类活动对水资源的污染程度。耕地和草地是黄土高原地区最主要的土地利用类型,二者面积能够反映乡村土地资源禀赋程度;建设用地开发强度反映乡村居民生产生活对土地资源的需求及开发利用状况;土地垦殖率反映农业生产对土地资源的开发利用程度;农业土地生产率衡量农业生产方面土地资源的利用效率及经济效益;化肥是农业发展的重要保障,但随着农村集约化程度的增强,农业施用化肥过剩现象突出,加剧了耕地环境压力,因此测算单位耕地面积的化肥施用量来衡量农业面源污染强度,以反映乡村土地环境压力。

## 2.4 数据来源

本文数据源包括社会经济数据、自然地理数据和空间矢量数据三部分。社会经济数据来自2001—2019年《中国县域统计年鉴》、各省市统计年鉴以及国民经济和社会发展统计公报;自然地理数据来自中国科学院资源环境数据云平台,借助Arc-GIS10.2软件对数据进行提取;空间矢量数据来自1:100万全国基础地理数据库。以农村居民人均可支配收入为参照,剔除无数据区县,确定的研究区域为黄土高原313个县级行政单元。研究时段为2000—2018年,选取了2000年、2005年、2010年、2015年和2018年共5个时间断面。

# 3 结果与分析

## 3.1 乡村“人水土”系统空间分异特征

本文基于测算的综合指数结构,借助Arc-GIS10.2的自然断点分级法,以2000年为基准,划分了2000、2005、2010、2015、2018年综合指数分级标准(表2)。

### 3.1.1 人类活动强度指数空间分异特征

2000—2018年黄土高原乡村人类活动强度指数呈下降态势,年均降幅达9.85个百分点,整体呈现出南高北低、东高西低的格局特征,高活动强度逐渐转为较高活动强度或中等活动强度,较低活动强度和低活动强度数量逐渐增加,区域差异不断缩小(图2)。

2000年人类活动强度指数以高强度和较高强度等级为主,高值区集中分布在黄土高原沟壑区、河谷平原区和土石山区南部,咸阳市的秦都区最高(0.460),石嘴山市大武口区最低(0.030)。高值区,即指数 $\geq 0.250$ 的地区(表2),多处于平原、河谷、盆地等地形区,自然本底条件适宜人类开展生产生活活动;低值区,即指数 $\leq 0.060$ 的地区(表2),多位于沙地沙漠区,地形、气候等条件不利于进行乡村建设和农业生产。与2000年相比,2005年高、较高活动强度县区数量分别减少了4.94、2.45个百分点(图3),但农业灌溉区南部县区因地制宜发展灌溉农业、畜牧业,推动农业产业化和农民增收,指数由中等活动强度转变为较高活动强度。2005—2010年人类活动强度指数持续下降,高活动强度县区减少至27个,黄土高原沟壑区中部及土石山区南缘县区因为受到城镇化和工业化的影响,乡村人口流向城市,规模缩减,一产从业人员大幅减少,指数由高活动强度转变为较高活动强度。2015年高活动强度县区只集中分布在河谷平原区和土石山区南部,较低活动强度县区增幅达18.58%。2018年,高活动强度县区数量缩减至9个,与2000年相比,下降了13.84%,集中分布在关中平原地区,其中西安市临潼区为人类活动强度指数极大值区(0.280),而山西右玉县-蒲县沿线地区依托煤炭资源推进工业化发展,乡村人口空心化现象突出,非农就业人员快速上升,成为人类活动强度低值区的聚集区。

表2 乡村“人水土”系统综合指数分级标准

Table 2 Classification standard of the comprehensive index of rural human-water-land system

综合指数	低	较低	中等	较高	高
人口资源子系统	$\leq 0.060$	0.060~0.100	0.100~0.150	0.150~0.250	$\geq 0.250$
水资源子系统	$\leq 0.180$	0.180~0.300	0.300~0.410	0.410~0.590	$\geq 0.590$
土地资源子系统	$\leq 0.070$	0.070~0.140	0.140~0.250	0.250~0.420	$\geq 0.420$



2022年9月

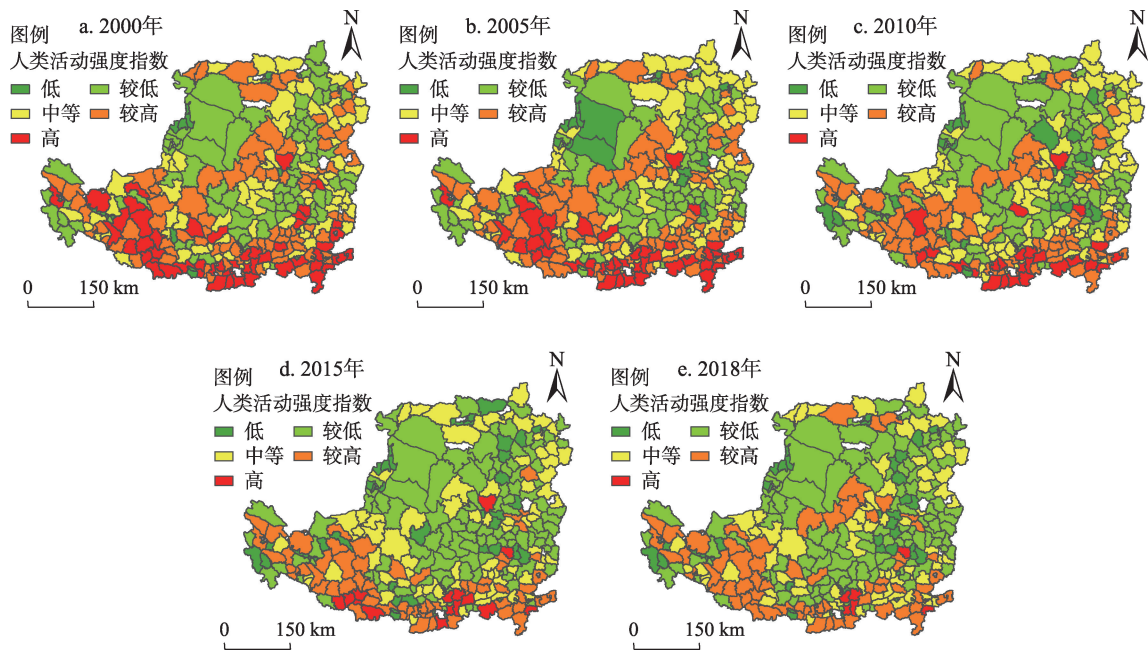


图2 2000—2018年黄土高原乡村人类活动强度指数时空变化

Figure 2 Spatiotemporal variation of human activity intensity index in rural areas of the Loess Plateau, 2000-2018

### 3.1.2 水资源指数空间分异特征

2000—2018年黄土高原乡村水资源指数保持上升趋势,平均值由0.300上升至0.330,总体呈现东南高西北低的格局特征,低值区和高值区数量减少,较高、中等和较低值区数量增加,区域差异逐渐缩小(图4)。

2000年水资源指数高值区集中分布在河谷平

原区及土石山区南侧,洛阳市西工区水资源指数最高(0.990);中值区呈环状分布于高值区外围;低值区主要位于沙地沙漠区、农业灌溉区和黄土丘陵沟壑区西侧,吴忠市盐池县最低(0.020)。高值区,即指数 $\geq 0.410$ 的地区(表2),位于季风气候与温带大陆性气候过渡区,降水较为丰富,且有汾河、渭河等河流流经此地,水资源禀赋较好,同时受城市溢出

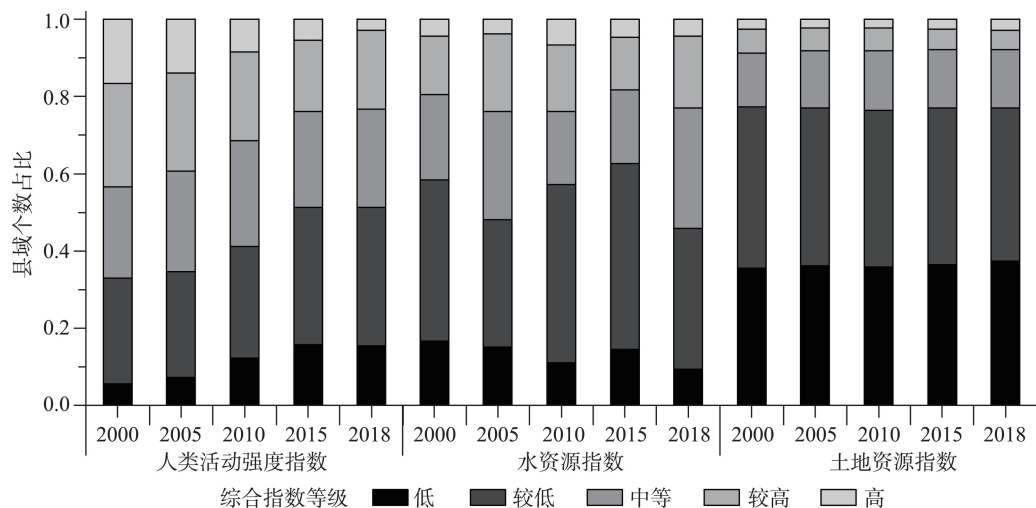


图3 2000—2018年黄土高原乡村“人水土”综合指数分级占比情况

Figure 3 Grading proportion of “human-water-land” comprehensive index in rural areas on the Loess Plateau, 2000-2018

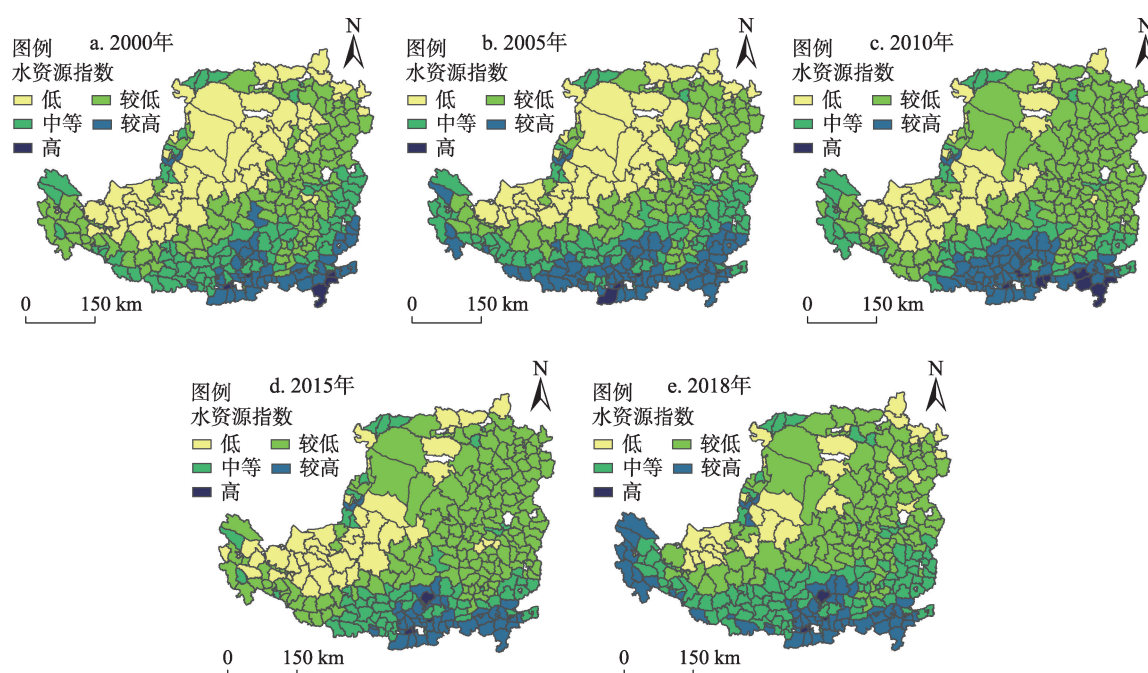


图4 2000—2018年黄土高原乡村水资源指数时空变化

Figure 4 Spatiotemporal variation of water resources index in rural areas of the Loess Plateau, 2000-2018

效应影响,经济发展水平相对较高,乡村水资源利用效率和生产效益均处于较高水平。低值区,即指数 $\leq 0.180$ 的地区(表2),属于典型的温带大陆性气候,降水少而蒸发量大,区域水资源禀赋较差,利用效率和生产效益也较低。与2000年相比,2005年低值和较低值县区数量分别减少了10.42%、26.67%,黄土高原沟壑区漳县—眉县沿线和洪洞县及其周边县区由于乡村人畜用水量略有下降,年均降水量有所上升,水资源指数由中等水平转为高水平。2010—2015年高值和较高值县区数量分别下降了12个、6个,高值区向河谷平原区南侧收缩,较低值区向西北延伸至沙地沙漠区。2018年水资源指数有所上升,低值和较低值县区数量由44个、152个减少至28个、116个,黄土高原沟壑区东南侧形成了水资源指数高值集聚区,表明在生态文明建设的推进下,该类县区生态保护成效显著,水资源禀赋有所上升,水污染得以有效治理。

### 3.1.3 土地资源指数空间分异特征

2000—2018年,黄土高原乡村土地资源指数变异系数处于0.900以上,表明区域内部相对差异较大,空间分布总体上呈西北高东南低的格局特征,较高值区和较低值区数量有所减小,中值区数量小

幅增加,区域差异变化不显著(图5)。

2000年土地资源指数高值区集中分布在沙地沙漠区,鄂尔多斯市鄂托克旗土地资源指数最高(0.960);较高值区呈链条状分布在高值区外围;中值区呈环状沿较高值区分布;低值区分布较为分散,主要位于土石山区、河谷平原区和黄土丘陵沟壑区,西宁市城东区最低(0.002)。高值区,即指数 $\geq 0.420$ 的地区(表2),所在县域面积较大,草地资源丰富,占黄土高原草地面积16.94%,平均人口密度为7.09人/ $\text{km}^2$ ,较为稀疏,土地资源开发利用程度较低,因此土地资源指数处于高水平。指数 $\leq 0.070$ 的地区为低值区(表2),位于高海拔生态脆弱区的低值区,耕地、草地等土地资源禀赋较差,土地资源指数较低;而位于河谷平原区和土石山区的低值区,因为人口密集,土地资源开发利用程度较高,土地环境压力大,土地资源指数也较低。与2000年相比,2005年土地资源指数较高值区数量减少了0.37个百分点(图3)。2010年土地资源指数低值区和较低值区数量有所下降,中等水平县区数量随之上升1.37个百分点(图3)。2015年土地资源指数分布格局基本与2010年保持一致。到2018年,土地资源指数低、较低、中等、较高和高水平县区数量分别为

2022年9月

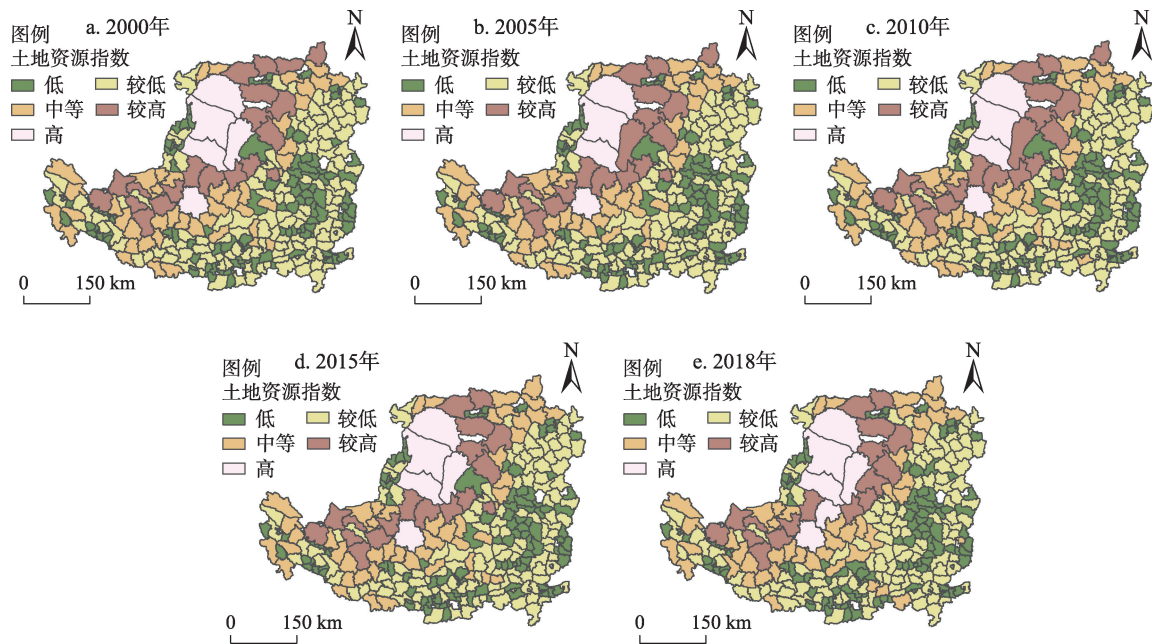


图5 2000—2018年黄土高原乡村土地资源指数时空变化

Figure 5 Spatiotemporal variation of land resources index in rural areas of the Loess Plateau, 2000-2018

118个、124个、48个、16个、6个,榆林市榆阳区和清涧县以及延安市宝塔区土地资源指数均有不同程度的上升,主要由于该类县区生态文明建设成效显著,土地污染得以有效治理,土地资源禀赋有所恢复;关中平原部分县区土地资源指数由中等转为较低水平,表明该区域乡村人口密集,生态文明建设存在一定压力。

### 3.2 乡村“人水土”系统协同关系类型

#### 3.2.1 系统协同关系类型划分

基于乡村人类活动强度、水土资源可持续发展水平及“人水土”系统权衡强度,并借鉴已有的研究成果<sup>[38]</sup>,通过热点分析法<sup>[39]</sup>将黄土高原乡村“人水土”系统协同关系进行类型划分,归纳总结为单维度制约型、双维度制约型、多维度发展型3个大类,土地资源匮乏型、水资源约束型、人类活动滞后型、人水、人土及水土3个制约型、待发展型和综合协调型共8种类型区(表3)。研究时段内黄土高原整体以双维度制约型为主,多年平均县区数量占比达50.41%,呈倒U型变化特征,单维度制约型、多维度发展型的多年平均县区数量占比分别达30.67%、24.28%。其中综合协调型县区数量最少,平均占比仅为4.92%,但数量呈上升趋势,由2000年的11个

增加至2018年的24个,这表明黄土高原乡村“人水土”系统发展不匹配现象虽明显,但随着政策引导和绿色发展的推进,乡村逐步向高水平协调方向发展。

#### 3.2.2 系统协同关系类型空间分布特征

2000—2018年,8种类型区的空间分布变化差异较小,但局部有明显的收缩、扩散和集聚(图6)。土地资源匮乏型集中分布在河谷平原区、土石山区南部及黄土高原沟壑区东南部,多年平均县区数量50个,2000年形成了关中平原和太行山区两大核心区。2010年太行山区核心区向南收缩,山西长治市长子县、壶关县、长治县等县区因乡村人口外流和水资源不合理利用加剧,由土地资源匮乏型转为待发展型;2018年关中平原核心区向西扩散,甘肃积石山自治县、临夏县、东乡族自治县等水源涵养成效显著,水资源可持续发展能力增强,由水土制约型转为土地资源匮乏型。水资源约束型主要分布在黄土高原沟壑区中西部、黄土丘陵沟壑区西南部及土石山区北部。2000—2015年平均县区数量35个,2015年之后由于陕北高原部分县区乡村人类活动强度上升,水资源压力增大,空间分布继续向东北扩散,2018年覆盖的县区达40个。人类活动滞后



表3 黄土高原乡村“人水土”系统类型划分

Table 3 Classification of human-water-land system in rural areas of the Loess Plateau

维度	类型	区域特征
单维度	土地资源匮乏型	人类活动强度高 水资源可持续发展能力强 土地资源可持续发展能力弱
	水资源约束型	人类活动强度高 水资源可持续发展能力弱 土地资源可持续发展能力强
	人类活动滞后型	人类活动强度低 水资源可持续发展能力强 土地资源可持续发展能力强
双维度	水-土制约型	人类活动强度高 水资源可持续发展能力弱 土地资源可持续发展能力弱
	人-土制约型	人类活动强度低 水资源可持续发展能力强 土地资源可持续发展能力弱
	人-水制约型	人类活动强度低 水资源可持续发展能力弱 土地资源可持续发展能力强
多维度	待发展型	人类活动强度低 水资源可持续发展能力弱 土地资源可持续发展能力弱
	综合协调型	人类活动强度高 水资源可持续发展能力强 土地资源可持续发展能力强

型分布范围较小,县区数量先增后减(图7),多年平均县区数量11个,受生态脆弱性影响,乡村人口稀疏,人类活动强度低。2000年形成鄂尔多斯高原-河套平原和陕北高原两个核心区,其中陕北高原核心区的分布,2010年先扩散,2018年又大幅收缩,陕西延安市黄龙县,甘肃庆阳市庆城县和合水县等分别转为水制约型和水土制约型,区域水土系统协调性显著下降。水土制约型主要分布在平原及河谷地带,多年平均县区数量28个。2000—2018年吕梁山区、陕北高原及河湟谷地等地区受快速城镇化影响,用地紧张,且一产从业人员占比大,乡村人类活动强度高,对水土资源的开发力度加大,因此水土制约型集中分布在该地区;而在陇南山地的分布先向西南扩散,2015年后基本消失。水土制约型呈现多核心分布特征,多年平均县区数量52个。2000—2005年形成关中-汾渭核心区,宁夏平原及河湟谷地两个次级核心区,2010—2018年核心区向西南方向移动,河湟谷地次级核心区向东呈条带状

扩散。人水制约型在陕北高原、六盘山区及毛乌素沙地部分县区分布,2000年后整体向北收缩。2018年青海贵德县、同仁县和尖扎县分别转为人类活动滞后型和水土制约型;在吕梁山区的分布向南扩散,受乡村空心化影响,山西寿阳县和潞城市乡村人类活动强度减弱,由水资源约束型转为水制约型。待发展型平均县区数量76个,集中连片分布在土石山区和黄土丘陵沟壑区东部,形成陕北高原-吕梁山区块状集聚区、鄂尔多斯高原西侧带状区和陇南山地循化县-白银带状区。2000—2015年,陇南山地带状区向西延伸,2018年大幅收缩,青海循化自治县和甘肃积石山自治县等乡村人类活动强度和水资源可持续发展能力均有所提升,转为土地资源匮乏型。综合协调型2000—2015年平均县区数量13个,2018年增长至24个,由零散点状分布转为以陇南山地、河湟谷地及河套平原为核心区的集聚分布。

综上,除综合协调型县区外,部分县区在7种类型区之间相互转变,部分县区经过多次转变发展为综合协调型,部分县区则由单维度制约型、双维度制约型或待发展型直接转为综合协调型。此外,黄土高原西北部、西南部 and 南部的“人水土”协同发展态势良好,而东部地区多是待发展型,应加以重视,采取措施促进该地区人水土协同发展。

### 3.3 乡村“人水土”系统影响机制

#### 3.3.1 模型构建

本文首先对2018年黄土高原权衡强度指数进行空间自相关分析,得到结果Moran's  $I$  值为0.0533,  $Z$  得分2.7406,乡村权衡强度指数呈集聚分布模式;其次在梳理已有文献<sup>[29-31,36]</sup>的基础上,对选取的自然及社会经济影响因素进行最小二乘回归分析,根据各项指标回归系数及显著水平剔除不显著指标;接着以系统权衡强度指数为因变量,以地形起伏度、热量( $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温)、地均生产总值、第一产业产值、城镇化率、路网密度6个因素为自变量进行回归分析,探究黄土高原乡村“人水土”系统权衡关系的影响机制。

#### 3.3.2 GWR 结果分析

##### (1) 自然因子分析结果

地形起伏度是乡村生产生活的本底性条件,对

2022年9月

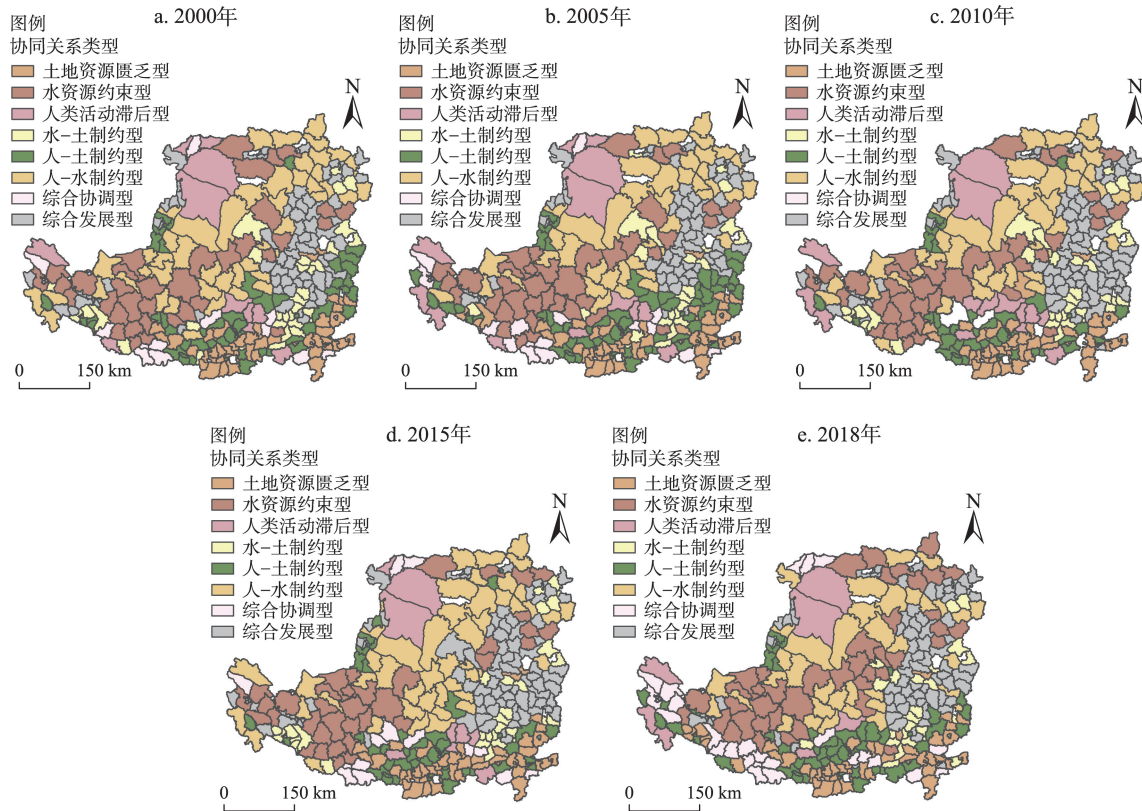


图6 2000—2018年黄土高原乡村“人水土”系统协同关系类型划分

Figure 6 Classification of collaborative relationship types in rural human-water-land system of the Loess Plateau, 2000-2018

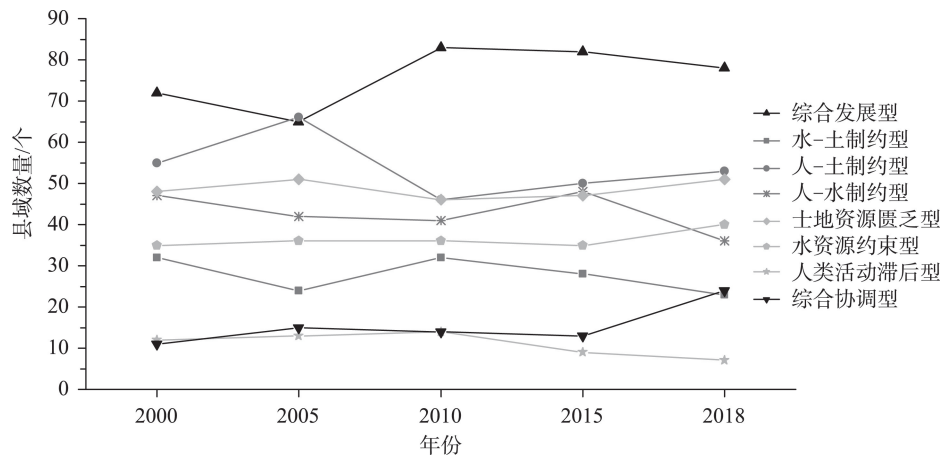


图7 2000—2018年黄土高原乡村“人水土”系统协同关系类型数量变化

Figure 7 Quantitative changes of human-water-land system synergistic relationship types in rural areas of the Loess Plateau, 2000-2018

乡村“人水土”系统权衡强度指数具有负向作用,回归系数总体呈现自东向西递减的格局特征(图8a)。地形起伏越和缓的地区更为适宜乡村发育和人口聚集,随之带来的水土资源需求和环境压力就较大,导致乡村权衡强度较高,3个子系统间表现为

较不协调状态。不同地区受地形因素影响的程度不同,黄土高原东部及西北部待发展型、东南部土地资源匮乏型及人土制约型县区地形较平坦,经济发展水平较高,乡村协调关系受地形起伏影响相对较小。而黄土高原西南部综合协调型、人类活动滞

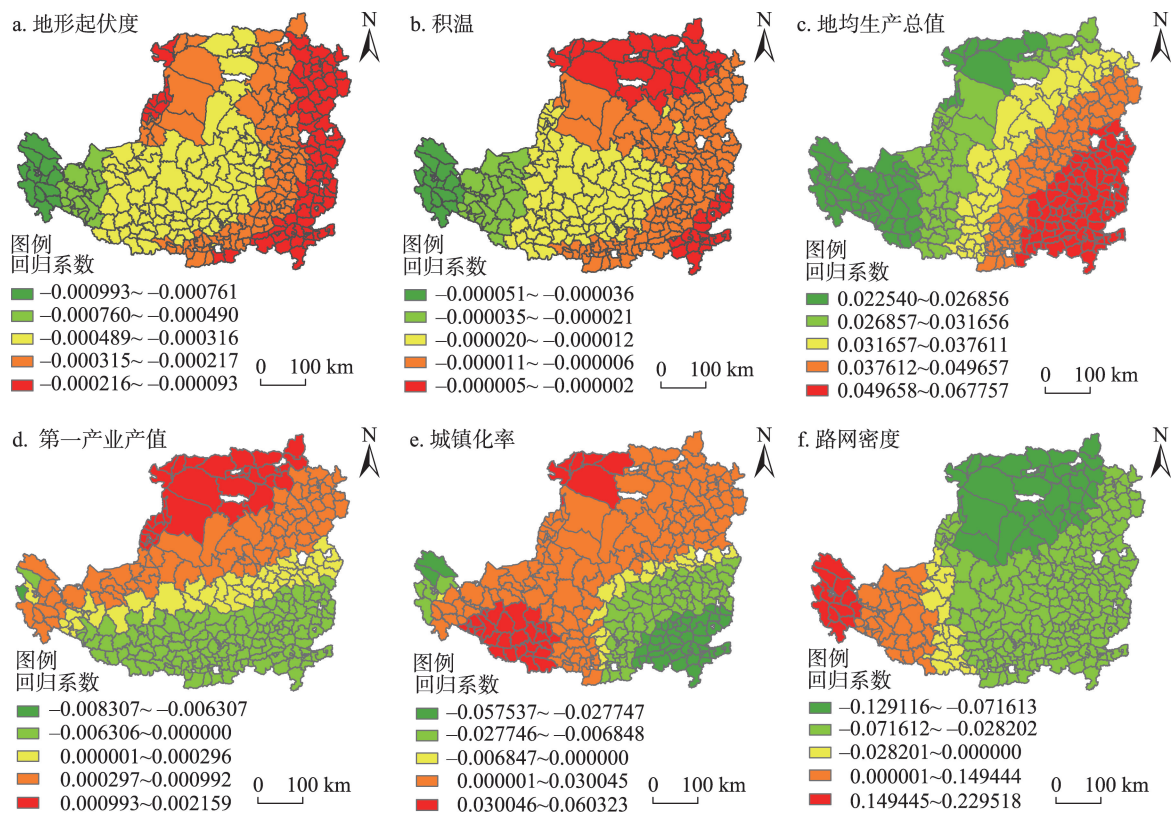


图8 黄土高原乡村“人水土”系统影响因素的回归系数分布

Figure 8 Distribution of regression coefficients of influencing factors of human-water-land system in rural areas of the Loess Plateau

后型及水资源约束型县区位于甘青地区,海拔高,地形起伏较大,农村协调发展受地形条件的限制作用较强。

热量条件是进行农业生产的必要条件之一。 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温对权衡强度指数具有负向作用(图8b),热量条件越优的县域“人水土”系统权衡强度越小,乡村发展趋于协调;反之,则不协调。黄土高原东南部土地资源匮乏型地区乡村经济发展水平和人类活动强度较高,乡村权衡关系受热量条件影响较小;北部水资源约束型及人水制约型县区纬度高,热量条件较差,但因地制宜发展牧业,对热量需求较低,因此积温对该地区乡村协调发展影响也较小。西南部综合协调型、人类活动滞后型和水资源约束型县区,因位于青藏高原东北缘,地势高,热量条件差,所以该区域的协调发展受热量条件的限制程度相对较高。

## (2)经济因子分析结果

区域经济发展水平是推动人口集聚,提高资源

利用效率的重要驱动因素。地均生产总值对乡村“人水土”系统权衡强度指数具有正向作用,即地均生产总值越高,系统间权衡强度指数越大,乡村向较不协调方向演变,空间上回归系数自西向东增加(图8c)。东南部待发展型、土地资源匮乏型及人土制约型县区,乡村协调发展受地均生产总值的影响程度高,由于较大规模资源开发和利用以促进经济增长,水土资源处于紧缺状态,使乡村向不协调方向推进。西部综合协调型、人类活动滞后型及水资源约束型县区受自然、区位等条件的限制,乡村人口规模较小,资源开发滞后,因此地均生产总值对该地区乡村权衡强度的正向效应较弱。

第一产业作为乡村发展的主导产业,是乡村经济结构的重要组成部分,但不合理的农业生产方式会加大资源的开发利用程度,对乡村“人水土”系统权衡强度变化产生影响,空间上回归系数表现西北正、东南负的分布格局(图8d)。东南部土地资源匮乏型和人土制约型县区,区域产业基础较好而土地



2022年9月

紧缺,但随着农业机械化和现代化程度增强,农业生产的资源利用效率提高,对乡村系统权衡强度影响减弱,人水土向协调方向发展。西北部人水制约型和水资源约束型县区,第一产业以牧业和灌溉农业为主,受区域生态脆弱性及水资源开发潜力低的影响,第一产业产值的增加往往伴随着乡村人水土矛盾的加剧。

### (3) 社会因子分析结果

当前处于城乡融合发展的关键期,城乡间要素流动加快,城镇化水平的提高对乡村协调发展具有重要影响,回归系数总体上呈西正东负的分布格局(图8e)。黄土高原西部水资源约束型、人水制约型县区位于回归系数高值区,随着城市化水平的提高,城乡间要素流动仍以乡村流向城市为主,新型要素难以流入乡村,因此乡村并未向协调方向发展。综合协调型、土地资源匮乏型及人土制约型县区位于回归系数低值区,城镇化水平相对较高,城乡间要素处于双向自由流动阶段,部分人口、资本、技术等要素流入乡村,推动了乡村产业升级和资源利用效率的提升,一定程度上缓和了乡村人水土矛盾,推动乡村向协调方向发展。

交通一定程度上能够改善乡村区位条件,加强乡村与外界的交流与要素流动,从而对乡村居民的

生产生活方式产生影响。回归系数总体上呈西南正东部负分布格局(图8f),路网密度对乡村“人水土”系统权衡强度的影响以负向作用为主,即随着路网密度的增大,系统间权衡强度呈减弱趋势,乡村趋于协调发展。黄土高原西南部人类活动滞后型和水资源约束型县区分布在高值区,因处于青藏高原与黄土高原过渡地带,生态脆弱性较高,基础设施建设受限制较大,路网密度对乡村权衡强度具有正向影响。黄土高原东部土地资源匮乏型、人水、人土及水土制约型、待发展型和综合协调型县区,路网密度对乡村权衡强度指数具有负向作用,表明交通条件的改善对推动该地区乡村协调发展具有显著的积极作用。

### 3.4 乡村“人水土”系统协调发展驱动机制

总体而言,自然及社会经济因素对乡村“人水土”系统协调发展的影响具有显著的空间异质性特征,多要素共同作用形成了资源分布与组合、要素流动与分配、资源需求与利用及人口流动转移四元驱动机制(图9)。

具体而言,自然因素是乡村“人水土”系统协调发展的基础性条件。当地形较缓时,适宜乡村发育和人口聚集,但水土资源压力加大;当热量不足时,农业生产活动受限,而水土资源压力减缓。因此,

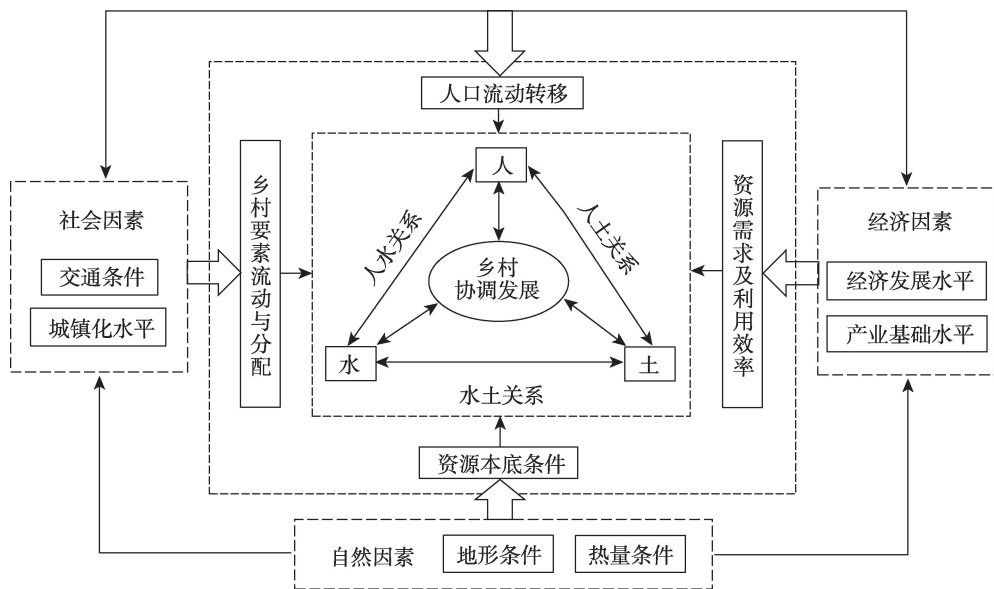


图9 黄土高原乡村“人水土”系统协调发展的驱动机制

Figure 9 Driving mechanism of coordinated development of human-water-land system in rural areas of the Loess Plateau

在地形和热量条件基础上形成的资源本底条件和组合状况影响了“人水土”系统协调发展。经济因素是乡村“人水土”系统协调发展的直接动力。经济的快速发展往往增加了对水、土等自然资源的需求,加剧了人水和人土矛盾,影响了“人水土”协调发展。但随着产业基础日益夯实,必然要借助技术提高资源利用效率,这样才能使得乡村“人水土”系统协调发展。社会因素是乡村“人水土”系统协调发展的重要保障,要素流动与分配机制推动了乡村高质量发展的进程。城镇化水平的提升及交通条件的改善增强了城市对乡村发展的极化带动作用,实现了城乡间要素双向自由流动,但同时可能会加剧系统的不协调性,因此在城市化发展和交通条件改善的过程中,要注意环境治理和资源保护,改善人水土资源的组合状况,促进其协调发展。此外,在政策支持及乡村发展等社会经济因素推动下,人口从城市回流至农村,人口的流动迁移过程也改变了乡村人类活动强度、水土资源需求及利用效率,进而对乡村“人水土”系统产生重要影响。综上,资源本底条件、资源需求及利用效率、要素流动与分配及人口流动转移共同驱动,影响了乡村“人水土”系统协调发展。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

本文从黄土高原整体、区域以及县域视角出发,分析黄土高原乡村“人水土”系统综合指数的时空分布特征,厘定协同关系并划分类别,探究了自然、社会及经济因素对乡村3个子系统的影响程度,为推动黄土高原乡村协同发展,有如下讨论:

(1)乡村“人水土”系统的协调发展至关重要。人口作为乡村最具活力的要素,是乡村发展的主体;水是人类生产生活的基础性自然资源;土地是乡村居民生活和产业发展的重要载体,对3个系统间协同关系的揭示和系统影响机制的探讨关系到乡村的生态环境安全、粮食生产和社会经济发展。因此需宏观把握区域“人水土”系统的空间发展规律及变化趋势,在战略上协调区域整体的人水土空间合理布局;中观层面聚焦区域内部各地区的人水土结构,实现区域优化治理,促进协同发展;微观尺度上根据“人水土”协同关系划分发展类型,依据人

水土资源优势与不足,制定具体实施策略。同时未来应加强对乡村各要素的整合协同研究,多尺度深入、细致、针对性探讨分析乡村各要素间的协同关系,促进乡村向高质量协调方向发展,助力乡村振兴。

(2)黄土高原东部乡村是协调发展的重点关注地区。对黄土高原乡村“人水土”系统的研究表明,东部地区的待发展型县区分布范围较大,县区数量约占黄土高原县区数量的1/4,空间上集中连片分布在土石山区、河谷平原北部及黄土丘陵沟壑区东部,同时受到人、水、土3种资源的限制。由于东部该类型乡村多年的资源过度开发给当地生态环境造成了严重损害,因此在促进乡村经济发展、城镇化建设和交通条件改善时,要尤其注意对生态环境的保护与恢复,并借助科技手段提高资源利用率,协调人水土资源的组合状况,促进其协调发展。

(3)不同影响因素对黄土高原乡村“人水土”系统权衡强度的作用存在差异,甚至同一影响因素对不同乡村的作用截然相反,导致影响乡村系统协同发展驱动机制的作用也不尽相同。因此要聚焦乡村的不同类型和发展程度,分析影响因素的具体作用,制定针对性的实施措施以促进人水土协调发展。此外,本文重点探究了乡村地域“人水土”系统协同关系及演化机制,但乡村协调发展受到多种自然及人文社会经济因素的影响,而本文仅考虑了地形和热量条件,经济发展水平和产业基础,城镇化水平和路网密度6方面的因素,使得研究结果具有一定的相对性。未来在数据完善和测度水平的提高下,可将乡村受教育水平、政策法规等定性因素进行定量分析,对乡村协调发展驱动机制展开深入研究。

### 4.2 结论

本文在构建乡村“人水土”系统指标体系的基础上,采用熵权TOPSIS法、空间自相关分析、GWR模型等方法,研究2000—2018年黄土高原乡村“人水土”系统综合指数的时空分异规律,识别3个系统之间的协同关系及其主要类型,揭示系统协同演化的驱动机制。主要结论如下:

(1)研究期内,黄土高原乡村“人水土”3个子系统的综合指数在整体上分别呈“降低-升高-稳定”

2022年9月

的演化特征,但指数偏低值县区和偏高值县区数量下降,说明县区之间指数的差异逐渐缩小。在空间分布上,指数存在匹配错位现象,人类活动指数和水资源指数南部与东部高,北部低,具有一致性,而土地资源指数西北高,东南低。

(2)黄土高原乡村各子系统之间不平衡性突出,乡村发展受到人、水、土不同资源不同程度的限制,对3个子系统协同关系的研究结果表明,协同关系类型以双维度制约型为主。但2000—2018年综合协调型县区数量不断增多,说明黄土高原在促进乡村人类活动与自然资源各要素协调高效发展方面成效突出。

(3)黄土高原乡村“人水土”系统协调发展受自然、社会经济各要素形成的资源分布与组合、流动与分配、资源需求利用及人口流动转移四元驱动机制所影响。不同要素对乡村系统权衡强度和协调状态的作用不同,黄土高原东部地区受地形、热量条件的影响程度较弱,而受区域经济发展水平的影响较强,西部地区则与之相反;产业基础、城镇化水平和交通条件对乡村权衡强度的影响较为复杂,对东部地区具有负向作用,而对西部地区相反。

## 参考文献(References):

- [1] 宁志中,张琦.乡村优先发展背景下城乡要素流动与优化配置[J].地理研究,2020,39(10):2201-2213.[Ning Z Z, Zhang Q. Urban and rural element mobility and allocation optimization under the background of rural priority development[J]. Geographical Research, 2020, 39(10): 2201-2213.]
- [2] 刘彦随.中国新时代城乡融合与乡村振兴[J].地理学报,2018,73(4):637-650.[Liu Y S. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(4): 637-650.]
- [3] Liu Y S, Li Y H. Revitalize the world's countryside[J]. Nature, 2017, 548: 275-277.
- [4] 刘彦随,周扬,李玉恒.中国乡村地域系统与乡村振兴战略[J].地理学报,2019,74(12):2511-2528.[Liu Y S, Zhou Y, Li Y H. Rural regional system and rural revitalization strategy in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2511-2528.]
- [5] 方创琳.城乡融合发展机理与演进规律的理论解析[J].地理学报,2022,77(4):759-776.[Fang C L. Theoretical analysis on the mechanism and evolution law of urban-rural integration development[J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(4): 759-776.]
- [6] 郭远智,刘彦随.中国乡村发展进程与乡村振兴路径[J].地理学报,2021,76(6):1408-1421.[Guo Y Z, Liu Y S. The process of rural development and paths for rural revitalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(6): 1408-1421.]
- [7] 刘彦随.中国乡村振兴规划的基础理论与方法论[J].地理学报,2020,75(6):1120-1133.[Liu Y S. The basic theory and methodology of rural revitalization planning in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1120-1133.]
- [8] 黄晶,薛东前,马蓓蓓,等.黄土高原乡村地域人-地-业协调发展时空格局与驱动机制[J].人文地理,2021,36(3):117-128.[Huang J, Xue D Q, Ma B B, et al. Spatial and temporal evolution pattern and driving mechanism of coordinated level of human-land-industry system in rural areas of the Loess Plateau[J]. Human Geography, 2021, 36(3): 117-128.]
- [9] 吴国华,周国华,龙花楼,等.从“四地”期刊载文审视中国农业与乡村地理学研究发展特征[J].地理科学,2021,41(9):1634-1644.[Wu G H, Zhou G H, Long H L, et al. Characteristics of research in agricultural and rural geography in China: Review from papers in four geographical periodicals[J]. Scientia Geographica Sinica, 2021, 41(9): 1634-1644.]
- [10] Woods M. New directions in rural studies?[J]. Journal of Rural Studies, 2012, 28(1): 1-4.
- [11] Heley J, Jones L. Relational rurals: Some thoughts on relating things and theory in rural studies[J]. Journal of Rural Studies, 2012, 28(3): 208-217.
- [12] 周扬,黄晗,刘彦随.中国村庄空间分布规律及其影响因素[J].地理学报,2020,75(10):2206-2223.[Zhou Y, Huang H, Liu Y S. The spatial distribution characteristics and influencing factors of Chinese villages[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(10): 2206-2223.]
- [13] 贾绍凤,梁媛.新形势下黄河流域水资源配置战略调整研究[J].资源科学,2020,42(1):29-36.[Jia S F, Liang Y. Suggestions for strategic allocation of the Yellow River water resources under the new situation[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 29-36.]
- [14] 张佰发,苗长虹.黄河流域土地利用时空格局演变及驱动力[J].资源科学,2020,42(3):460-473.[Zhang B F, Miao C H. Spatio-temporal changes and driving forces of land use in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 460-473.]
- [15] Yang B, Feldman M W, Li S Z. The status of perceived community resilience in transitional rural society: An empirical study from central China[J]. Journal of Rural Studies, 2020, 80: 427-438.
- [16] Ahmad I, Waseem M, Lei H, et al. Harmonious level indexing for ascertaining human-water relationships[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(4): 125-125.
- [17] 左其享.人水和谐论及其应用研究总结与展望[J].水利学报,2019,50(1):135-144.[Zuo Q T. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 135-144.]
- [18] 金巍,章恒全,张洪波,等.城镇化进程中人口结构变动对用水



- 量的影响[J]. 资源科学, 2018, 40(4): 784–796. [Jin W, Zhang H Q, Zhang H B, et al. The influence of population structural change on water consumption in urbanization[J]. Resources Science, 2018, 40(4): 784–796.]
- [19] 王德怀, 李旭东. 贵州乌江流域人口与经济发展协调性研究[J]. 地理科学, 2019, 39(3): 477–486. [Wang D H, Li X D. Coordination of population and economic development in the Wujiang River Basin of Guizhou Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(3): 477–486.]
- [20] 韩雁, 贾绍凤, 鲁春霞, 等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征: 以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1392–1401. [Han Y, Jia S F, Lu C X, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: A case study in Zhangjiakou[J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1392–1401.]
- [21] 邹秀清, 王英, 武婷燕, 等. 江西省农业人口转移对耕地利用效率影响的门槛效应[J]. 资源科学, 2019, 41(8): 1576–1588. [Zou X Q, Wang Y, Wu T Y, et al. Threshold effect of agricultural population transfer on cultivated land use efficiency in Jiangxi Province[J]. Resources Science, 2019, 41(8): 1576–1588.]
- [22] 李理, 朱连奇, 朱文博, 等. 生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡: 以淇河流域为例[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1): 365–374. [Li L, Zhu L Q, Zhu W B, et al. The correlation between ecosystem service value and human activity intensity and its trade-offs: Take Qihe River Basin for example[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1): 365–374.]
- [23] 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): 2057–2066. [Sun Z, Jia S F, Yan J B, et al. Study on the matching pattern of water and potential arable land resources in China[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(12): 2057–2066.]
- [24] Long H L, Liu Y S, Li X B. Building new countryside in China: A geographical perspective[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2): 457–470.
- [25] 徐小任, 徐勇. 黄土高原地区人类活动强度时空变化分析[J]. 地理研究, 2017, 36(4): 661–672. [Xu X R, Xu Y. Analysis of spatial-temporal variation of human activity intensity in Loess Plateau region[J]. Geographical Research, 2017, 36(4): 661–672.]
- [26] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. 资源科学, 2020, 42(2): 358–371. [Yu H Z, Li L J, Li J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358–371.]
- [27] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management[J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 2012, 10(4): 210–216.
- [28] 璩路路, 王永生, 刘彦随, 等. 乡村振兴导向的水土资源承载力评价及其优化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 300–314. [Qu L L, Wang Y S, Liu Y S, et al. Evaluation of water and land resources system bearing capacity and path optimization for rural revitalization[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 300–314.]
- [29] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120–128. [Li C Y, Zhang S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120–128.]
- [30] 秦腾, 佟金萍. 长江经济带水-能源-粮食耦合效率的时空演化及影响因素[J]. 资源科学, 2021, 43(10): 2068–2080. [Qin T, Tong J P. Spatiotemporal change of water-energy-food coupling efficiency and influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources Science, 2021, 43(10): 2068–2080.]
- [31] 杨奎, 张宇, 赵小凤, 等. 乡村土地利用结构效率时空特征及影响因素[J]. 地理科学进展, 2019, 38(9): 1393–1402. [Yang K, Zhang Y, Zhao X F, et al. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of structural efficiency of rural land use[J]. Progress in Geography, 2019, 38(9): 1393–1402.]
- [32] 王德怀, 李旭东. 贵州乌江流域人口与经济发展协调性研究[J]. 地理科学, 2019, 39(3): 477–486. [Wang D H, Li X D. Coordination of population and economic development in the Wujiang River Basin of Guizhou Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(3): 477–486.]
- [33] Fürnkranz-Prskawetz A. Population Dynamics: Mathematic Models of Population, Development, and Natural Resources[A]. Wright J D. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences[C]. Amsterdam: Elsevier, 2015.
- [34] 陈昱, 田伟腾, 马文博, 等. 基于ESDA-GWR的人口城镇化与土地城镇化协调度时空分异及影响因素研究: 以中原城市群为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(8): 88–99. [Chen Y, Tian W T, Ma W B, et al. Analysis on spatiotemporal differentiation and influence factors of coordination degree between population urbanization and land urbanization based on ESDA-GWR: A case study of the central plains urban agglomeration[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(8): 88–99.]
- [35] 刘采, 张海燕, 李迁. 1980–2018年海南岛人类活动强度时空变化特征及其驱动机制[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 567–576. [Liu C, Zhang H Y, Li Q. Spatiotemporal characteristics of human activity intensity and its driving mechanism in Hainan Island from 1980 to 2018[J]. Progress in Geography, 2020, 39(4): 567–576.]
- [36] 王富喜. 山东半岛城市群人口土地城镇化质量测度与协调发展研究[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1345–1354. [Wang F X. Study on the quality measurement and coordinated development of population-land urbanization in Shandong Peninsula Urban Agglomeration[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1345–1354.]
- [37] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: A method for exploring spatial nonstationarity[J]. Geographical Analysis, 1996, 28(4): 281–298.

[38] 宋永永, 薛东前, 米文宝, 等. 宁夏限制开发生态区村域发展的模式与机理[J]. 经济地理, 2017, 37(4): 167–175. [Song Y Y, Xue D Q, Mi W B, et al. Village development mode and mechanism of limited development ecological zones in Ningxia[J]. Economic Geography, 2017, 37(4): 167–175.]

[39] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12): 1571–1581. [Wu W H, Peng J, Liu Y X, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. Progress in Geography, 2017, 36(12): 1571–1581.]

## Coordination of human–water–land system and mechanism in rural areas of the Loess Plateau

XUE Dongqian, WANG Sha, WANG Jianing, TANG Yu

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** Rapid industrialization, urbanization, and modernization have posed increasing pressure on the rural regional system, and studying the relationship between human and land and the combination of resources in rural areas is the scientific basis for realizing regional coordination in rural areas and high-quality development for rural revitalization. Based on the basic data of 313 county-level administrative units on the Loess Plateau from 2000 to 2018 and constructing the rural human-water-land indicator system, this study adopted the entropy weight technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) method, spatial autoregressive model, and geographically weighted regression (GWR) model to examine the spatial and temporal differentiation pattern of the human, water, and land subsystems, identifying the synergistic relationship between the three systems and their main types, and revealing the driving mechanism of system synergistic evolution. The results show that: (1) The spatial distribution pattern of the rural human activity intensity index and water resource index on the Loess Plateau is consistent, and the spatial dislocation of the land resource index is significant. The three subsystem indices are mainly at low levels and the imbalance between counties is prominent, but there is a weakening trend. (2) The type of rural cooperative relationship on the Loess Plateau is dominated by two-dimensional constraints, which showed an inverted U-shaped change characteristic during the study period. The number of comprehensive coordinated counties is increasing, indicating that the rural areas of the Loess Plateau are gradually developing towards a high level of coordination. (3) The coordinated development of the system is influenced by the four-element driving mechanism of resource distribution and combination, flow and distribution, resource demand and utilization, and population flow and transfer formed by various elements. Intensity and coordination of factors vary. This study has certain reference significance for optimizing the allocation of water and land resources in rural areas and promoting the coordinated evolution of the rural human-water-land system.

**Key words:** rural human-water-land system; spatiotemporal pattern; synergistic relationship; influencing factors; Loess Plateau