

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.

汾河流域水土资源耦合协调格局及驱动因素

张恩月¹, 苏迎庆^{2,3}, 张云枫¹, 李育桢¹, 李可璇¹, 刘庚¹

(1.太原师范学院 地理科学学院, 山西 晋中 030619; 2.西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 3.中国科学院西北生态环境资源研究院 内陆河流域生态水文重点实验室/甘肃省祁连山生态环境研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要:开展区域水土资源耦合协调研究,旨在促进区域社会经济发展与水土资源的可持续利用。选取汾河流域为研究区,基于2006、2013、2018年多源遥感监测数据、社会经济统计数据及再分析产品数据,构建了水土资源耦合协调评价指标体系,并采用耦合协调度模型、空间自相关模型及地理探测器对研究区2006—2018年水土资源耦合协调度进行测度,并识别其主导影响因素。结果表明:(1)2006、2013、2018年流域水土资源耦合协调度以低度协调与中度协调为主,整体为[0.10,0.50]。空间上,高值区主要位于流域中上游区域,低值区集中于中下游区域,且具有明显的时间异质性。多年演变趋势为向上开口的抛物线。(2)研究期流域水土资源耦合协调Moran's I值分别为0.274、0.266、0.195,总体经历高一高一低的下降过程,全局相关性水平下降,空间集聚效应降低,区域差异减小。局部自相关主要显示为高-高(H-H)和低-低(L-L)两类。(3)影响汾河流域水土资源耦合协调度空间分异的主导因子依次为年降水量、生活用水量占比、产水模数、人均建设用地面积等,其中,年降水量与产水模数影响因子间的交互作用最强。未来应该加强流域水土资源的合理配置,优化土地利用结构,协调统筹流域上中下游、大中小城镇之间的水土资源分配及用量,积极促进区域跨流域调水及土地资源的修复整治。

关键词:水土资源;耦合协调度;空间自相关;地理探测器;汾河流域

文章编号: 1000-694X(2023)03-169-09

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00018

中图分类号: F205

文献标志码: A

0 引言

水土资源是全球基础性自然资源及关键性生态环境要素,维系着粮食安全、经济发展与社会稳定^[1]。进入新世纪以来,人口数量与社会经济高速发展,对水、土地资源的需求不断增加^[2]。长期以来高强度水土资源开发与利用,极大地破坏了水土资源的动态平衡,由此产生水土流失、土壤污染、水环境污染、水资源短缺等一系列生态环境问题,严重威胁着人类的生存发展^[3]。联合国粮农组织(FAO)土地及水资源状况报告显示,截至目前,全球已有34%的土地正在遭受退化、人均用地面积年均减少20%,32亿人面临水资源短缺^[4]。为有效解决水土资源与人类社会发展的协调问题,开展对全球/区域水土资源的有效评估具有重要意义,已成为当前研

究的热点^[5]。目前,水土资源研究内容主要包括水土资源承载力^[6]、安全^[7]以及匹配关系^[8]等。其中,水土资源间的匹配关系,即水土资源耦合协调程度,是将水土资源视为一个有效整体,通过水土资源系统之间或系统内部诸要素的相互影响、相互制约、相互作用的关系和协调状况,有序促进水土资源关系良性发展^[9]。研究主题已由早期聚焦水土资源系统内部变化转向兼顾多要素的格局机制与调控。研究方法涉及农业水土资源匹配系数^[10]、基尼系数^[11]以及数据包络分析^[12]等。谭琨等^[13]对喀斯特山区文山市水土资源耦合协调程度进行了栅格尺度的研究;王凌阁等^[14]对甘肃河西五市近20年水土资源耦合协调情况进行量化并识别了影响因子。综合来看,已有研究集中于行政单元或农业部门的

收稿日期:2022-11-28; 改回日期:2023-03-01

资助项目:山西省高等学校优秀成果(科学技术)培育项目(2020KJ024);山西省高等学校科技创新项目(2021L411);太原师范学院研究生教育创新项目(SYYJSSYC2222)

作者简介:张恩月(1998—),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从事土地资源评价与开发等研究。E-mail: zsyzy0521@126.com

通信作者:刘庚(E-mail: liugeng9696@126.com)

单要素水土资源耦合协调,流域单元的水土资源耦合协调综合研究相对较少。同时,受社会经济与水土资源复杂系统影响,开展综合多产业、多部门、多要素的水土资源耦合协调更能符合区域实际,对地区均衡发展 and 国土空间规划具有更好的弹性支撑^[15]。

汾河流域是山西省重要的人口经济城镇集聚区,也是山西省严重缺水^[16]。在资源型经济主导下,矿业开采、工矿建设等生产活动进一步加剧了水土资源矛盾。据统计,流域内因采矿等行为造成的土地破坏面积高达23 404.53 hm²,地下水超采沉降面积也达到了1 316.62 km²^[17]。此外,还存在河流地表径流量减少/断流、河道萎缩以及土地退化等水土资源失调问题,现已严重制约着汾河乃至黄河流域的生态环境质量的提升与生态安全屏障作用的发挥。因此,亟需开展汾河流域水土资源耦合协调的研究。基于2006、2013、2018年多源遥感监测数据、社会经济统计数据及再分析产品数据,构建了水土资源耦合协调评价指标体系,并应用了耦合协调度模型、空间自相关模型及地理探测器,对研究区2006—2018年水土资源耦合协调水平进行了测度,并识别其主导影响因子,以期对流域水土资源的耦合协调与优化调控、生态环境整体保护与山水林田湖草沙综合治理等提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

汾河是黄河的第二大支流,发源于宁武县管涔山,于万荣县庙前村注入黄河,全长约716 km。汾河流域位于黄土高原东缘,山西省中部(35°22′06″—38°49′24″N、110°30′03″—112°50′24″E)。流域涉及忻州、太原、吕梁、晋中、临汾、运城6市40余县(图1),总面积约为3.95万km²,占山西省国土总面积的25.3%。流域地势北高南低,四周高山环绕,主要山脉包括管涔山、太行山、吕梁山等,主要地貌为丘陵、山地、平川。气候属温带大陆性季风气候,降水集中于7—9月,且降水量南部高于北部,山区高于盆地。主要土壤为潮土、褐土、棕壤等。主要土地利用类型为耕地、林地及草地。研究区多年平均水资源量仅有30.1亿m³,以全省27%的水资源和25%的土地承载着全省39%的人口和42%的GDP,流域水资源开发利用率达80%以上^[18]。

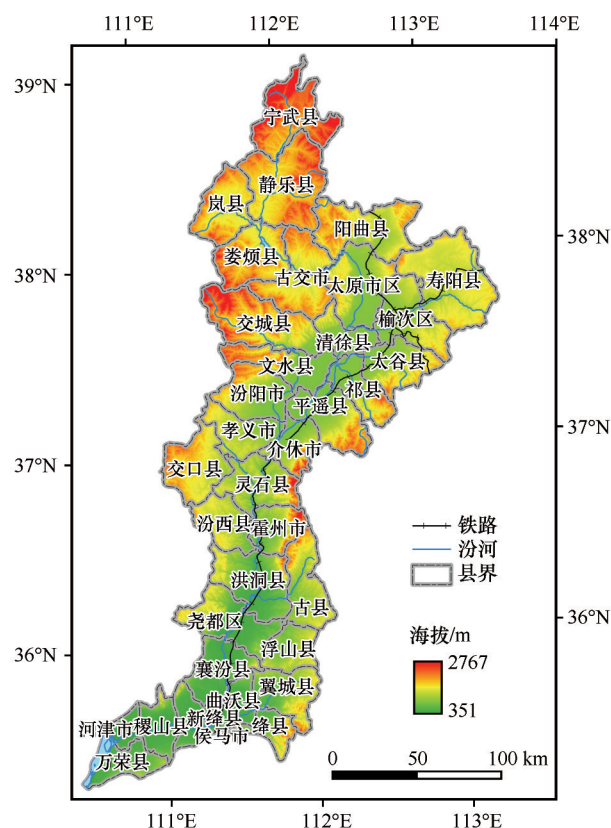


图1 汾河流域区位

Fig.1 Location of Fenhe River Basin

1.2 数据来源

主要包括多源遥感监测数据、社会经济统计数据及再分析产品数据。NASA陆地卫星Landsat TM、Landsat 8遥感影像数据,空间分辨率30 m,包括2006、2013、2018年3期,3期影像数据通过波段合成、几何纠正、图像增强等处理,经人机交互式判读解译得到,解译精度达到90.2%。采用该影像主要提取了耕地、建设用地等面积,用于测算指标人均耕地面积、人均建设用地面积等。NDVI遥感影像数据,MOD13Q1数据集,空间分辨率250 m,成像时间为对应研究期每期的7—8月,云量均在5%以下,经镶嵌、投影转换、裁剪及单位换算等处理。用于提取监测期测算指标林草覆盖率(X_{19})。WorldClim version 2.0(<http://www.worldclim.org/>)再分析产品数据、年降水栅格数据,用于提取监测期测算指标年降水量)。此外,社会经济统计等数据来源于2006、2013、2018年《山西省统计年鉴》《山西省水资源公报》(<http://slt.shanxi.gov.cn>)、《山西省生态环境公报》(<https://sthjt.shanxi.gov.cn>)、《中国县(市)社会经济统计年鉴》及各市统计年鉴、省市县官网公报等。

1.3 研究方法

1.3.1 指标体系及权重确立

水土资源协调度是指水资源与土地资源系统之间或系统内部各要素之间的相互影响、相互作用的关系和协调程度状况,两者协调程度越高越有利于水土资源利用效率的提高以及水土资源承载力增强^[19]。为反映汾河流域水土资源系统在开发利用过程中的耦合协调水平,依据研究区地域性特征,遵循代表性、功效性、可操作性和科学性等原则,在参考相关成果的基础上^[20-21],从水资源系统和土地资源系统两方面,共选取22个指标构建水土资源耦合协调评价指标体系。为消除参选各指标之间量纲的差异性以及保证赋权的真实性,分别采用了非零变量及熵值法对指标进行标准化及赋权^[22](表1)。

1.3.2 耦合协调度模型及耦合协调分类体系

引入耦合协调度模型测算研究区水土资源的耦合协调度^[23],其中,水土资源耦合是指水资源与土地资源两系统之间相互作用、相互制约、相互影响的程度,水土资源耦合协调是指两系统相互作用后由无序向有序发展的程度^[24]:

$$C = \frac{L_i W_i}{\sqrt{\left(\frac{L_i + W_i}{2}\right)^2}} \quad (1)$$

$$T = \alpha L_i + \beta W_i \quad (2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3)$$

式中: C 表示水土资源的耦合度; L_i 、 W_i 分别为第*i*个地区土地资源、水资源综合评价值; T 为水土资源协调发展综合评价指数; α 、 β 分别表示水土资源子系统贡献度待定系数,由于两者同等重要,故 $\alpha=\beta=0.5$ ^[25]; D 代表水土资源之间的耦合协调度。

为揭示水土资源之间的耦合协调程度,结合本研究区实际^[26],按照耦合协调度的大小,对水土资源耦合程度进行划分,具体见表2。

1.3.3 空间相关分析

空间自相关是用来分析研究区域范围内,各空间位置与各自周围邻近位置的同一属性值是否具有关联性,可以分为全局自相关和局部自相关^[27]。全局自相关用于揭示研究区整体某要素的空间相关性;局部空间自相关用于揭示研究区各子单元某要素空间相关性^[28],以此本研究采用LISA(Local Indicators of Spatial Association)聚类图分析水土资源

表1 汾河流域水土资源耦合协调评价指标体系
Table 1 Coupling coordination degree evaluation index system of water-soil resources in Fenhe River Basin

目标层	指标层	单位	指标属性	权重
水资源系统	年降水量(X_1)	mm	+	0.028
	人均水资源量(X_2)	m ³	+	0.062
	农业用水量占比(X_3)	%	-	0.032
	工业用水量占比(X_4)	%	-	0.018
	生活用水量占比(X_5)	%	-	0.018
	生态用水量占比(X_6)	%	+	0.123
	万元GDP用水量(X_7)	m ³	-	0.005
	产水模数(X_8)	万 m ³ ·km ⁻²	+	0.072
	水资源开发利用率(X_9)	%	+	0.042
	污水处理率(X_{10})	%	+	0.152
	供水模数(X_{11})	万 m ³ ·km ⁻²	+	0.061
土地资源系统	人均耕地面积(X_{12})	hm ²	+	0.037
	耕地比例(X_{13})	%	+	0.022
	土地利用开发率(X_{14})	%	-	0.002
	人均粮食产量(X_{15})	t	+	0.046
	人均建设用地面积(X_{16})	m ²	-	0.011
	人均公园绿地面积(X_{17})	m ²	+	0.091
	单位播种面积粮食产量(X_{18})	t·km ⁻²	+	0.033
	林草覆盖率(X_{19})	%	+	0.035
	经济密度(X_{20})	%	-	0.001
	生活垃圾处理率(X_{21})	%	+	0.097
	化肥施用强度(X_{22})	t·hm ⁻²	-	0.011

“+”表示正相关;“-”表示负相关。

表2 汾河流域水土资源耦合协调度类型划分
Table 2 Type division of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin

类型划分	协调度(D)	耦合协调程度
失调衰退类	[0, 0.2]	失调衰退
协调类	(0.2, 0.4]	低度协调
	(0.4, 0.6]	中度协调
	(0.6, 0.8]	高度协调
	(0.8, 1]	极度协调

耦合协调度在空间上的集聚特征。

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m W_{ij}} \quad (4)$$

式中: $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, x_i 表示第 i 地区的观测值, n 为栅格数; W_{ij} 为二进制的邻接空间权重矩阵, 表示空间对象的邻接关系。 $i=1, 2, \dots, n$; $j=1, 2, \dots, m$; 当区域 i 和区域 j 相邻时, $W_{ij}=1$; 当区域 i 和区域 j 不相邻时, $W_{ij}=0$; Moran's I 为 $[-1, 1]$ 。

局部空间自相关是将 Moran's I 分解到各个空间单元 (I_i):

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{m} \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (5)$$

式中: $m = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}$ 。 I_i 值为正表示该空间单元周围相似值 (高值/低值) 的空间集聚; I_i 值为负表示非相似值之间的空间集聚。

1.3.4 地理探测器

地理探测器是用来探测空间分异性及挖掘其主导因子的空间统计学方法^[29]。由于汾河流域土地/水资源在空间分布上存在显著的异质性与分层性, 且影响因子较多, 因此, 采用地理探测器中的“因子探测器”和“交互探测器”识别主导因子和组合因子对水土资源耦合协调度空间异质性的解释程度^[30], 参考类似研究区成果^[31-32], 反复测试, 对研究区进行格点化处理, 划分 $6 \text{ km} \times 6 \text{ km}$ 的 1 362 个格点, 且将选取的 22 项影响因子 X 划分为 5 类 (层), 22

项指标中, 9 项指标置信水平为 99%, 其余指标置信水平为 90%, 可以有效反映研究结果的有效性与真实性。

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^L N_i \sigma_i^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中: L 代表因子 X 的分层 (分类), 本文划分为 5 类; N_i 和 N 分别为层 i 和县区格点数 (1 362 个); σ_i^2 和 σ^2 分别为层 i 和全局 Y 值的方差。解释力 q 介于 $[0, 1]$, q 值越大, 表明因子 X 对 Y 的解释力越强。

2 结果与分析

2.1 水土资源耦合协调度特征

2006、2013 年和 2018 年汾河流域水土资源耦合协调度均为低度协调和中度协调。其中, 水土资源耦合协调度高值区主要位于流域中上游区域, 低值区域集中于中下游区域, 并且随着时间的变化具有明显的时间异质性 (图 2)。具体来看, 空间上, 2006、2013、2018 年流域水土资源耦合协调空间错位显著, 其中, 2006 年, 中度协调区散布于流域中上游区域, 主要包括宁武、静乐、岚县等 21 县区, 涉及面积占流域总面积的 68.25%, 占中度协调区域的 95.45%。下游仅有绛县为中度协调区, 耦合协调值

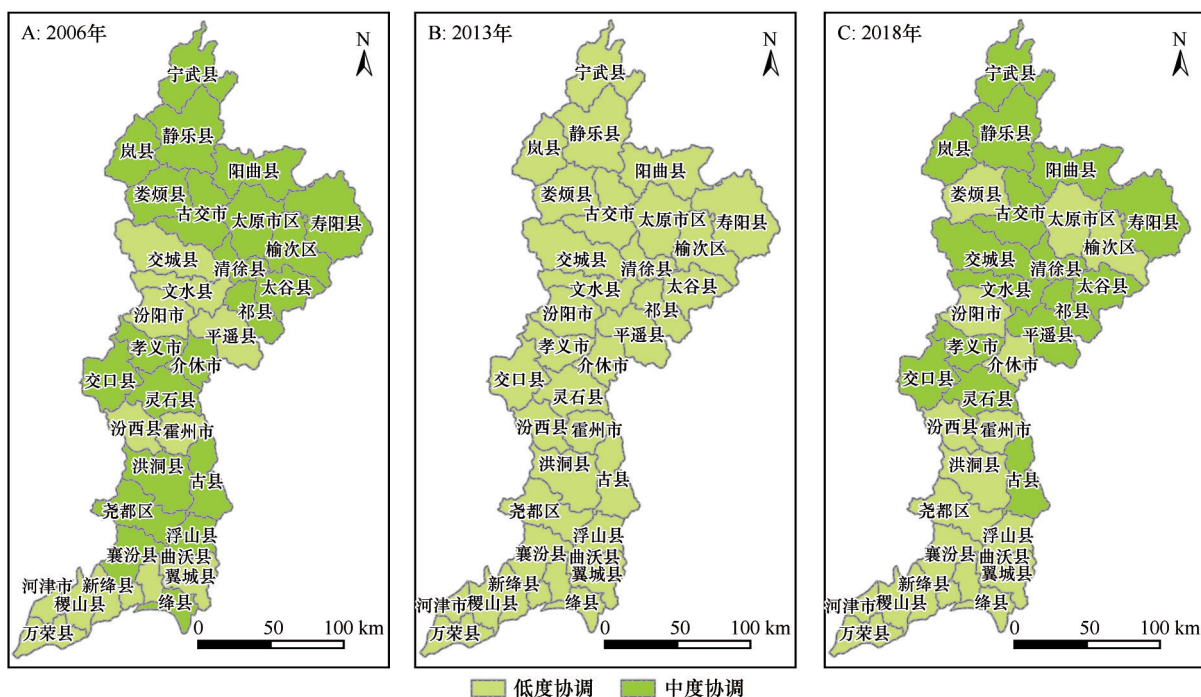


图2 2006、2013、2018年汾河流域水土资源耦合协调度空间格局

Fig.2 Spatial pattern of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin in 2006, 2013 and 2018

为0.41。2013年,全域均为低度协调,比2006年流域水土资源耦合协调水平明显下降。其中,最高值位于古县,为0.40;最低值位于文水县,为0.29。2018年,流域水土资源协调度水平略有上升,但仍未超过2006年,中度协调区相比2013年扩大了45.71%,均位于流域中上游区域,其中,最高值为0.50,位于寿阳县。低度协调区集中于下游,其中,最低值位于汾河入黄口万荣县。时间上,2006—2018年,流域耦合协调度呈现向上开口的抛物线的演变趋势,由中度协调向低度协调再向中度协调状态转变(图3)。3年横向比较,其中耦合协调值高于3年平均水平的县区包括古县、古交市、静乐县、寿阳县、阳曲县、祁县、静乐县等(图4)。汾河流域长期处于高强度的水土资源开发状态,故水土资源耦合协调水平整体偏低。2006年,流域经济社会发展水平相对较低,当年流域GDP、人口仅占山西省的42%、39%。对水土资源的需求及利用强度较低,水土资源耦合协调系统中正向驱动因子如人均水资源量(X_2)、生态用水量(X_6)、人均耕地面积(X_{12})及耕地比例(X_{13})等对流域水土资源耦合协调水平的总体贡献率达到76.9%,抵消了部分负向驱动因子的影响(贡献23.1%),使得2006年同比其他年份水土资源耦合协调度水平最高。到2013年,流域人口经济进一步集聚,人口、GDP进一步增长,水土资源系

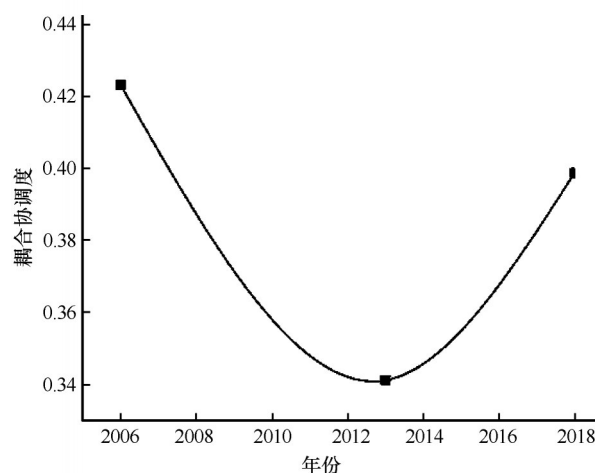


图3 2006—2018年汾河流域耦合协调度拟合趋势
Fig.3 The fitting trend of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin from 2006 to 2018

统中负向驱动因子如农业用水量占比(X_3)、工业用水量占比(X_4)、万元GDP用水量等显著增长且逐渐超过正向驱动因子的贡献率,正负指标系统相差35.8%,导致流域水土资源耦合协调整体水平下滑为流域低耦合协调水平。2018年,随着国家及省市加强生态环境保护及水土资源集约化治理,先后出台《汾河流域生态修复规划(2015—2030年)》《以汾河为重点的“七河”生态保护与修复总体方案》,政

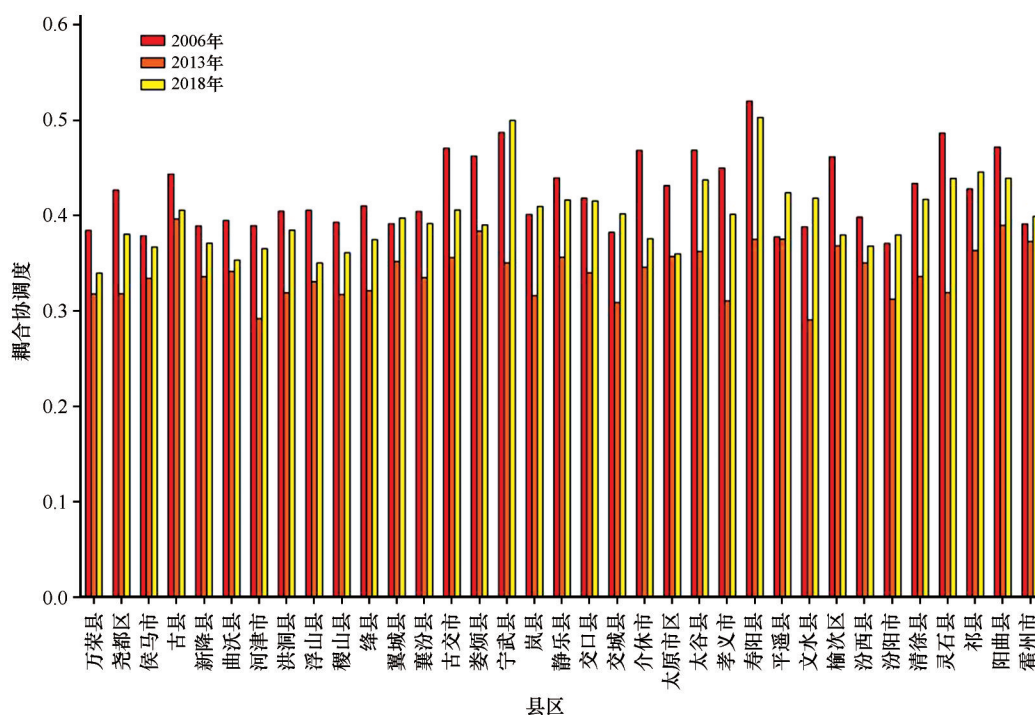


图4 2006,2013,2018年汾河流域县域水土资源耦合协调度变化

Fig.4 The change of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin in 2006,2013 and 2018

策变化是引导水土资源系统变化的间接因素,也是潜在因素,研究区不同时期先后出台的政策一定程度上主导了当年或未来规划年的水土资源利用效率与利用方式,使得水土资源系统中正向驱动因子的贡献率提高,同时,负向驱动因子的贡献率下降,促进了流域水土资源耦合协调水平的回升。

2.2 水土资源耦合协调度空间关联特征

2006、2013、2018年流域水土资源耦合协调 Moran's I 值分别为 0.274、0.266、0.195,均为正相关,总体经历高一高一低的下降过程,表明水土资源耦合协调度全局相关性水平下降,空间集聚效应相对降低,区域差异减小,空间发展态势趋于均衡(图5)。从局部自相关来看(图6),水土资源耦合协调度3年的局部自相关水平均较低,主要显示为高-高(H-H)和低-低(L-L)两类,2006年,汾河流

域仅出现一处H-H区,分布于流域中上游东北部榆次区及寿阳县,该区域因地处太榆都市圈,受经济牵引、政策试点影响等,水土资源的耦合协调水平较高。2013年,流域整体局部相关性显著下降,H-H区域消失,流域中下游的文水县、汾阳市及河津市出现L-L区,三县区为流域典型的资源开采及农业种植主导型的县区。采矿及高负荷的土地垦殖,导致区域水资源污染、土地退化等水土资源系统失调问题,形成了L-L区。2018年,流域总体局部相关性水平出现好转,虽未出现H-H区,但是L-L区分布由流域中上游向下游转移,说明汾河流域生态环境治理修复与保护工程取得阶段性成果,为汾河中上游流域水土资源系统改善起到了推动作用,而L-L区分布在汾河流域下游,主要由长期以来基于地理条件的优越建立的高负荷土地利用模式所形成。

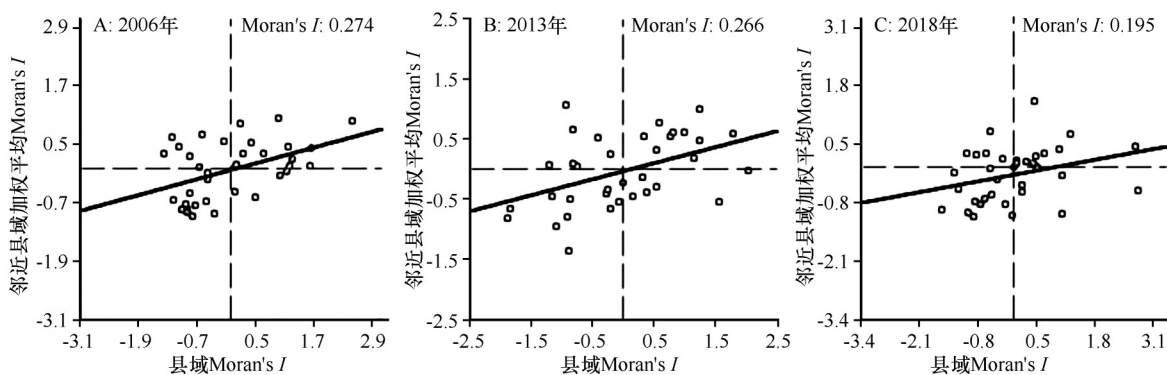


图5 2006、2013、2018年汾河流域水土资源耦合协调度 Moran's I 散点图

Fig.5 Moran's I scatter plot of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin in 2006, 2013 and 2018

2.3 水土资源耦合协调度影响因素

为探明汾河流域水土资源耦合协调空间分异的机制及主导驱动因子,采用地理探测器对其探测发现,影响汾河流域水土资源耦合协调度的主导因子依次为 X_1 (年均降水量)、 X_5 (生活用水量占比)、 X_8 (产水模数)、 X_{16} (人均建设用地面积)、 X_{21} (生活垃圾处理率)、 X_{22} (化肥施用强度)。依据上述主导因子分析表明,环境保护投入与治理力度(X_{21} 、 X_{22} 、 X_5)、水土资源利用效率(X_8 、 X_{16})和自然环境本底(X_1)等对研究区水土资源耦合协调度的空间分异起到主导作用(图7)。研究期内汾河流域经济发展水平逐年提高,为流域水土资源合理利用提供了充足的资金支持,同时,也为水土资源生态状况改善提供了

正驱动力。环境保护投入与治理力度直接关系水土资源系统的循环与修复,随着GDP的总体增长,流域内各县区也加大对环境保护的投入与治理,对流域水土资源的耦合协调水平提升具有促进作用。

由于水土资源耦合协调的复杂性与系统性,其空间分异也受到多因子的相互影响。因此,在主导因子探测的基础上,进一步对流域水土资源耦合协调度不同的影响因子展开交互探测,识别不同因子之间的交互影响,以此判断不同因子间的共同作用对水土耦合协调系统的影响。结果显示,研究区水土资源耦合协调分异结果并不是由单一影响因子造成的,而是由不同影响因素共同作用的结果(图8)。其中,年均降水量(X_1)和产水模数(X_8)影响因子间的交互作用最强,大于0.5。另外,年均降水

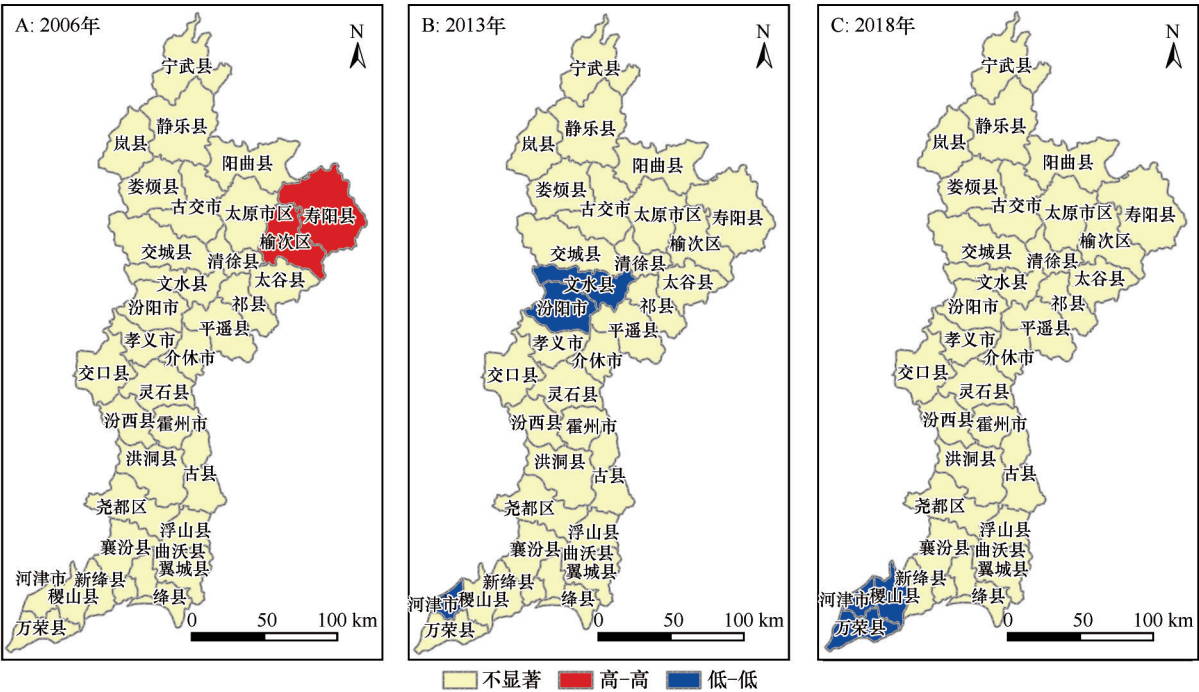


图6 2006、2013、2018年汾河流域水土资源耦合协调度局部空间自相关LISA集聚图

Fig.6 Local spatial autocorrelation LISA cluster diagram of coupling coordination degree of water-soil resources in Fenhe River Basin in 2006, 2013 and 2018

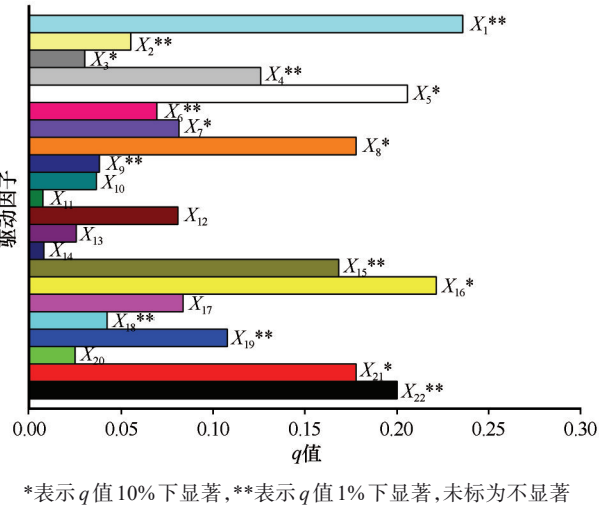


图7 水土资源耦合协调度驱动因子排名

Fig.7 Ranking of driving factors of coupling coordination degree of water-soil resources

量(X_1)与工业用水量占比(X_4)、生活用水量占比(X_5)与人均粮食产量(X_{15})等也较高。这表明自然环境因素为水土资源系统的基底,良好的降水条件对区域生态环境质量具有调节作用。经济发展和城镇化进程中,工业用水占比、生活用水占比、人均粮食产量、人均建设用地面积等相互作用也会对研究区水土资源耦合协调程度起到一定的作用。所以,未来应该加强流域水土资源的合理配置,优化

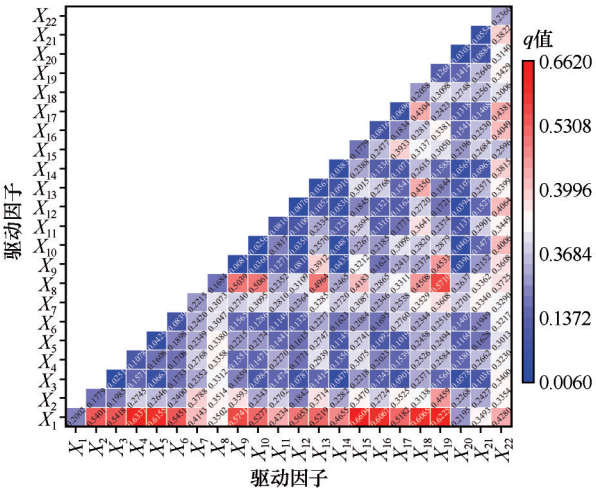


图8 水土资源耦合协调度驱动因子交互探测结果

Fig.8 Interactive detection results of driving factors of coupling coordination degree of water-soil resources

土地利用结构,协调统筹流域上中下游、大中小城镇之间的水土资源分配及用量,积极促进区域跨流域调水及土地资源的修复整治。

3 结论

2006、2013、2018年汾河流域水土资源耦合协调度以低度协调与中度协调为主,整体为[0.10, 0.50]。空间上,高值区主要位于流域中上游区域,

低值区域集中于中下游区域,且具有明显的时间异质性。2006—2013年,耦合协调度呈现向上开口的抛物线的演变趋势,由中度协调向低度协调再向中度协调状态转变。

研究期流域水土资源耦合协调 Moran's I 值分别为 0.274、0.266、0.195,总体经历高一高一低的下降过程,全局相关性水平下降,空间集聚效应降低,区域差异减小。局部自相关主要显示为高-高(H-H)和低-低(L-L)两类。

自然本底决定了流域的生态环境与社会经济发展基础,而人类扰动进一步影响甚至改变流域的生态环境。影响汾河流域水土资源耦合协调度空间分异的主导因子依次为年均降水量、生活用水量占比、产水模数、人均建设用地面积等,其中,年均降水量与产水模数影响因子间的交互作用最强。因此,为有效改善流域水土资源耦合协调水平,应加强流域上中下游水土资源的优化配置,统筹协调,加大产业结构优化,扩大生态用地与生态用水需求,促进流域水土资源的合理利用与可持续发展。

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] 杨宏铁,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] Cheng K, Fu Q, Chen X, et al. Adaptive allocation modeling for a complex system of regional water and land resources based on information entropy and its application[J]. Water Resources Management, 2015, 29(14):4977-4993.
- [4] 黄飞.粮代处出席《2021年世界粮食和农业领域土地及水资源状况》高级别发布会[J].世界农业,2022(1):133.
- [5] 李志赞,邓晓雅,龙爱华,等.三维生态足迹视角下塔里木河流域水土资源与生态承载状况评价[J].环境工程,2022,40(6):286-294.
- [6] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90.
- [7] 赵自阳,李王成,张宇正,等.基于 DPSIR 模型的宁夏农业水土资源安全评价[J].浙江农业学报,2017,29(8):1336-1346.
- [8] 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.
- [9] 马利邦,田亚亚,郭晓东,等.基于格网的河西绿洲乡村聚落时空演变及其与水土资源的耦合关系[J].自然资源学报,2018,33(5):775-787.
- [10] 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.
- [11] 张立杰,李健.西江流域环境资源公平性评价[J].中国沙漠,2018,38(3):673-680.
- [12] 李光勤,方徐兵.黄河流域绿色发展水平时空演变特征[J].中国沙漠,2021,41(4):129-139.
- [13] 谭琨,赵祖军,赵筱青,等.喀斯特山区文山市水土资源利用变化特征及耦合研究[J].水土保持研究,2021,28(4):324-332.
- [14] 王凌阁,朱睿,陈泽霞,等.甘肃河西地区 2000-2019 年水土资源耦合协调特征[J].中国沙漠,2022,42(2):44-53.
- [15] Lu W N, Liu W X, Hong 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.
- [16] 钞锦龙,李乐乐,杨朔,等.汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究[J].地理科学,2022,42(3):487-496.
- [17] 段丽军,于金贵,曹金亮,等.汾河流域矿山生态环境问题现状及治理修复对策[J].西部探矿工程,2022,34(2):169-170.
- [18] 申豪勇,李佳,王志恒,等.黄河支流汾河流域水资源开发利用现状及生态环境问题[J].中国地质,2022,49(4):1127-1138.
- [19] 谭琨.喀斯特山区文山市水土资源耦合及调控研究[D].昆明:云南大学,2020.
- [20] 胡航箫,戴文远,徐乙文,等.福州山区乡村聚落空间格局及其与水土资源的耦合态势[J].生态与农村环境学报,2021,37(2):164-171.
- [21] 文倩,孟天醒,范慧平,等.河南省水土资源与经济发展耦合效应及其时空分异[J].水土保持研究,2017,24(3):234-240.
- [22] 魏小芳,赵宇鸾,李秀彬,等.基于“三生功能”的长江上游城市群国土空间特征及其优化[J].长江流域资源与环境,2019,28(5):1070-1079.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 林晋大,多玲花,邹自力.城市扩张背景下景观破碎化动态演变及空间自相关分析:以南昌市为例[J].水土保持研究,2022,29(4):362-369.
- [28] 许锋.基于 Moran 指数和谱图论的空间自相关测度方法优化[J].城市发展研究,2021,28(12):92-101.
- [29] 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.
- [30] 王劲峰,葛咏,李连发,等.地理学时空数据分析方法[J].地理学报,2014,69(9):1326-1345.
- [31] 苏迎庆,刘庚,赵景波,等.2006-2018 年汾河流域土地生态安全预警测度及时空格局演变[J].水土保持通报,2021,41(1):144-151.
- [32] 刘海龙,王炜桥,王跃飞,等.汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J].生态学报,2021,41(10):3952-3964.

Coupling coordination pattern and driving factors of soil and water resources in Fenhe River Basin of China

Zhang Enyue¹, Su Yingqing^{2,3}, Zhang Yunfeng¹, Li Yuzhen¹, Li Kexuan¹, Liu Geng¹

(1. College of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 3. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin / Qilian Mountains Research Center of Eco-Environment in Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The research on coupling coordination of regional water and land resources aims to promote regional social and economic development and sustainable utilization of water and land resources. In this research, the Fenhe River Basin is selected as the research area. Based on the multi-source remote sensing data, socio-economic statistical data, and reanalysis product data in 2006, 2013, and 2018, the evaluation index system of water and soil resources coupling coordination is constructed. The coupling coordination degree model, spatial autocorrelation model, and geographic detector are used to measure the coupling coordination degree of water and soil resources in the study area from 2006 to 2018, and identify its dominant influencing factors. The results showed that: (1) In 2006, 2013, and 2018, the coupling coordination degree of water and land resources in the basin was mainly low coordination and moderate coordination, which was between [0.10, 0.50]. In space, the high-value area is mainly located in the middle and upper reaches of the basin, and the low-value area is concentrated in the middle and lower reaches and has obvious time heterogeneity. The multi-year evolution trend is characterized by an upward opening parabola. (2) The Moran's I values of coupling coordination of water and land resources in the study period were 0.274, 0.266, and 0.195, respectively. The whole basin experienced a high–low decline process, the global correlation level decreased, the spatial agglomeration effect decreased, and the regional differences decreased. Local autocorrelation is mainly shown as high-high (H-H) and low-low (L-L). (3) The dominant factors affecting the spatial differentiation of the coupling coordination degree of water and soil resources in the Fenhe River Basin are annual precipitation, the proportion of domestic water consumption, water production modulus, per capita construction land area, etc. Among them, the interaction between annual average precipitation and water production modulus is the strongest. Based on this, in the future we should strengthen the rational allocation of water and land resources in the basin, optimize the structure of land use, coordinate of water and land resources between the upper and middle reaches of the basin, large, medium, and small towns allocation and usage, and actively promote regional inter-basin water transfer and land resources remediation.

Key words: land and water resources; coupling coordination degree; spatial autocorrelation; geographical detector; Fenhe River Basin