

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.

# 甘肃河西地区2000—2019年水土资源 耦合协调特征

王凌阁<sup>1</sup>,朱睿<sup>1</sup>,陈泽霞<sup>1</sup>,尹振良<sup>2</sup>,卢睿<sup>1</sup>,方春爽<sup>1</sup>

(1.兰州交通大学 测绘与地理信息学院/地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心/甘肃省地理国情监测工程实验室,甘肃兰州730000;2.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,甘肃兰州730000)

**摘要:**以甘肃河西地区为研究区,采用耦合协调度模型和农业水土资源匹配系数法分别对河西五市和河西走廊三大内陆河中游地区水土耦合协调情况进行量化研究,并以此为基础通过灰色关联度法分析水土资源耦合协调度影响因素。结果表明:(1)2000—2019年,河西五市水土资源耦合协调度整体提升了64.65%,由濒临失调转换为初级协调,呈现不断改善的趋势。其中,张掖市、酒泉市水土资源耦合程度增长较高;(2)影响河西五市水土资源耦合协调的主要因素分别为水资源系统的人均水资源量、降水资源总量和水资源总量以及土地资源系统的地均粮食产量、耕地比例和地均农业总产值;(3)河西走廊三大内陆河中游地区水土匹配情况存在较大差异,疏勒河流域耦合度最高,但是却呈波动下降趋势,黑河流域和石羊河流域水土耦合程度变化小。应继续坚持节水技术推广,促进农业向高效益、低耗水方向发展,同时注重水土资源的合理开发和保护,因地制宜,逐步实现水土资源的高效配置。

**关键词:**水土资源耦合;河西;内陆河流域;匹配系数

**文章编号:**1000-694X(2022)02-044-10

**DOI:**10.7522/j.issn.1000-694X.2021.00108

**中图分类号:**F303.4

**文献标志码:**A

## 0 引言

水土资源是人类社会生存和发展的根本,随着社会经济的的发展和人口数量的不断膨胀,对于水资源和土地资源的需求不断增加。水资源作为区域农业土地利用的瓶颈因素,其数量的多寡影响着土地利用结构的合理程度<sup>[1-2]</sup>,而水土资源的不合理利用会严重制约地区经济发展和粮食的生产安全,因此对于区域水资源量和土地资源量之间的匹配关系,即水土资源耦合程度的研究是水土资源研究的热点问题之一<sup>[3]</sup>。

目前,关于区域水土资源耦合程度的研究,通常以行政区划为研究单元,采用传统的农业水土资源匹配系数法<sup>[4-6]</sup>、基于基尼系数的水土资源匹配模型<sup>[7-8]</sup>或者数据包络分析<sup>[9-11]</sup>(data envelopment analysis, DEA)等方法进行。例如,侯薇等<sup>[5]</sup>对关中市

区及所辖5个地级市的农业水土资源匹配程度进行分析和评价;李晓燕等<sup>[8]</sup>运用基尼系数法和农业水土资源当量系数评价了山东省水土资源匹配程度;Vitor<sup>[11]</sup>运用聚类分析和DEA模型分析了欧盟各国农业灌溉用水的效率。但是当水资源和土地资源均处于短缺或富足的状态时,则不能通过上述3种方式进行有效评价<sup>[6]</sup>,因此部分学者利用水土资源耦合协调度模型分析区域水土资源耦合协调水平。例如,文倩等<sup>[12]</sup>采用“压力-状态-响应”框架和耦合协调度模型对河南省18个地市1999—2013年的水土资源和经济发展状况进行量化研究;璩路路等<sup>[13]</sup>以乡村振兴为导向,结合物元模型和水土资源耦合协调度模型对宁夏盐池县水土资源系统承载力进行评价,揭示影响水土资源的短缺因素。结果表明,水土资源耦合协调度模型能较好地反映区域水

收稿日期:2021-07-13; 改回日期:2021-08-19

资助项目:国家自然科学基金项目(42161018);中国科学院青年创新促进会项目;甘肃省重点研发计划项目(20YF8FA002);兰州交通大学优秀平台(201806)

作者简介:王凌阁(1999—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事干旱区水土资源耦合研究。E-mail: 11200865@stu.lzjtu.edu.cn

通信作者:朱睿(E-mail: zhur@mail.lzjtu.cn)

土资源耦合协调水平。

在2013年,为了应对变化的全球形势,统筹协调区域发展所作的重大战略决策,国家提出了“一带一路”倡议<sup>[14]</sup>。河西走廊是连接丝绸之路经济带的重要通道,也是中国向西开放的战略大通道,这对该地区的经济社会发展和生态环境建设提出了更高的要求。而河西走廊地区降水量少,蒸散发强烈,地形条件复杂,多荒漠少耕地等情况突出,严重制约当地社会经济的发展,因此准确认识当地水土资源耦合协调水平、高效利用水土资源、优化水土资源时空配置成为促进河西走廊地区社会经济转型升级的关键,也是推动河西地区可持续发展的重要保障。本文利用耦合协调度模型和农业水土资源匹配系数法,对河西五市2000—2019年水资源系统和土地资源系统以及河西走廊三大内陆河中游地区的水土资源进行耦合分析评价,揭示其内部联系和变化发展趋势,同时运用灰色关联度分析法对河西五市水资源和土地资源系统的评价指标进行分析,确定主要影响因子,进一步提出水土资源优化路径,以为河西走廊地区的社会、经济与生态可持续发展提供科学依据和决策支撑。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

河西走廊位于甘肃省西北部,东起乌鞘岭,西与新疆接壤,南以祁连山与青海省相接,北到北山

山区与内蒙古毗邻<sup>[15]</sup>,经纬度范围 $37^{\circ}17'—42^{\circ}48'N$ 、 $92^{\circ}23'—104^{\circ}12'E$ (图1)。河西走廊属于大陆性干旱气候,气候干燥,降水稀少,日照时间较长,蒸发强烈<sup>[16]</sup>。该区域自东向西依次为武威市、金昌市、张掖市、嘉峪关市和酒泉市,总面积大约30.16万 $km^2$ ,占甘肃省总面积的60%以上,人口490万左右,占甘肃省总人口的19%左右。河西走廊以黑山、宽台山和大黄山为界分隔为石羊河、黑河和疏勒河三大内陆河流域,均发源于祁连山脉,由冰雪融水和降雨补给。石羊河流域位于河西走廊东部<sup>[17]</sup>,发源于祁连山北麓,消失于巴丹吉林和腾格里沙漠之间的民勤盆地,甘肃省内流域面积约3.98万 $km^2$ ,上游水系由黄羊河、杂木河、西营河等8条小河流组成<sup>[18]</sup>。黑河流域是中国西北地区第二大内陆河流域,位于河西走廊中段,发源于南部祁连山区,最后汇入居延海,全长821 km,甘肃省内流域面积约为5.6万 $km^2$ 。疏勒河流域位于河西走廊西段,发源于祁连山区疏勒南山与讨赖南山之间的沙果林那穆吉木岭,消失于库姆塔格沙漠,全长580 km,总面积约为13.01万 $km^2$ 。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 耦合协调度模型

##### 1.2.1.1 功效函数

由于各指标的数量单位不统一,需要采用无差标准化的方式对各指标数据标准化处理,以反映各指标值对系统贡献度大小。具体计算公式如下:

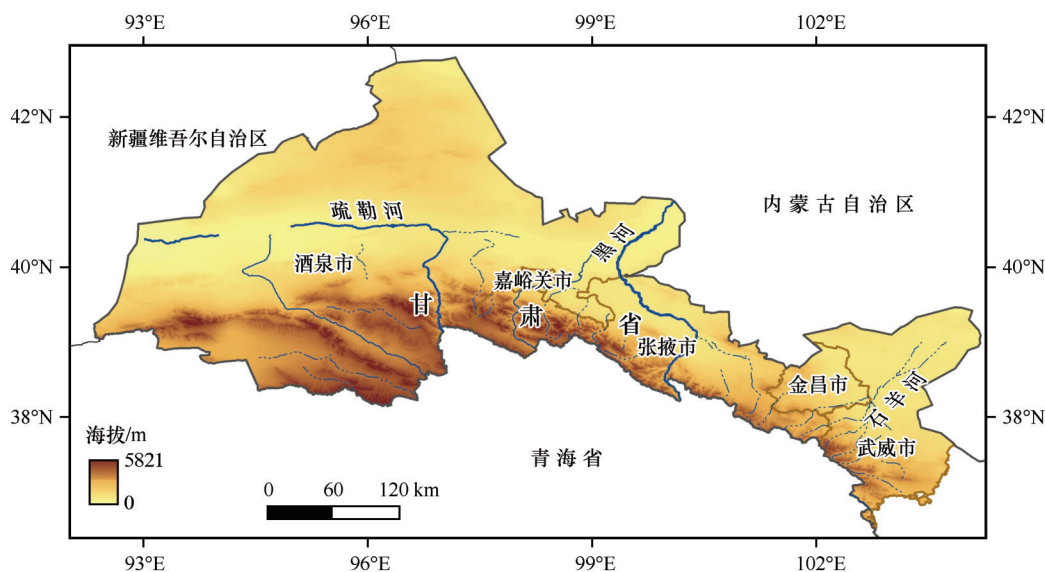


图1 河西走廊地区

Fig.1 Location of the Hexi Corridor Area

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & x_{ij} \text{具有正功效} \\ \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} & x_{ij} \text{具有负功效} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $x'_{ij}$  表示变量  $x_{ij}$  对系统的功效贡献值, 反映了各影响因子达到目标的满意程度, 取值范围为  $[0, 1]$ , 0 表示最不满意, 1 表示最满意<sup>[19]</sup>。  $x_{ij}$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  个序参量的第  $j$  个指标,  $x_{ij}$  具有正功效表示归一化值越大, 系统耦合程度越好, 反之, 具有负功效则表示归一化值越小越好。各子系统指标有序程度的贡献值计算方法如下:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \times x'_{ij} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_{ij} = 1 \quad (3)$$

式中:  $\lambda_{ij}$  为第  $i$  个序参量中第  $j$  个影响因子的权重;  $U_1$ 、 $U_2$  分别表示土地资源系统和水资源系统对总系统有序度的贡献值。

### 1.2.1.2 耦合协调指数

借鉴物理学中容量耦合概念以及容量耦合系数模型<sup>[12]</sup>, 采用耦合协调度模型来分析事物的协调发展水平。耦合度指两个或两个以上系统之间的相互作用影响, 实现系统协调发展的动态关联关系, 可以反映系统之间的相互依赖相互制约程度。协调度指耦合相互作用关系中良性耦合程度的大小, 可以体现出协调状况的好坏。计算公式如下:

$$C = m \left\{ \frac{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_m}{\prod (U_i + U_j)} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$T = \sqrt{\alpha \cdot U_1 + \beta \cdot U_2} \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中:  $C$  为系统耦合度;  $m$  为子系统个数;  $D$  表示系统耦合协调度;  $T$  表示区域水资源和土地资源综合协调指数;  $\alpha$ 、 $\beta$  为子系统贡献度待定系数, 反映区域水土资源系统的整体协调效应, 由于水资源与土地资源在水土资源耦合度中同等重要, 取  $\alpha = \beta = 0.5$ <sup>[20]</sup>。

### 1.2.2 农业水土资源匹配系数

由于河西走廊地区多荒漠戈壁, 河西走廊三大流域主要用水集中在中游地区, 因此本研究以河西走廊三大内陆河流域中游地区为研究区域。农业水土资源匹配系数是指单位耕地面积占有水资源量, 反映一个地区水资源与耕地资源空间协调程

度<sup>[21]</sup>。河西走廊地区农业用水包括耕地灌溉用水、林业用水以及牧渔畜用水 3 个方面, 因此, 本研究以农林牧渔畜单位耗水面积占有的水资源量来计算农业水土资源匹配系数<sup>[22]</sup>。农业水土资源系数大就表示该区域水资源和土地资源匹配程度好, 适合进行农业生产。计算公式如下:

$$R_i = \frac{W_i \cdot a_i}{L_i} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中:  $R_i$  为  $i$  研究区农业水土资源匹配系数;  $W_i$  为  $i$  研究区水资源可利用总量;  $a_i$  为  $i$  研究区农林牧渔畜用水占水资源总量的比例;  $L_i$  为  $i$  研究区农林牧渔畜总用水面积;  $n$  为河西走廊中游地区研究流域个数, 在本研究中为 3。

## 1.3 数据来源

数据主要分为两部分: 第一部分为河西五市水土资源耦合协调分析所需要的数据, 其中耕地面积、农业总产值、GDP、常住人口等来源于 2001—2020 年的《甘肃省统计年鉴》<sup>[23]</sup>, 降水资源总量、水资源总量、农业用水量等数据来源于 2001—2020 年的《甘肃省水资源公报》<sup>[24]</sup>; 第二部分为河西走廊内陆河三大流域中游地区水土资源匹配分析所需数据, 河西走廊流域中游地区用水主要集中于农业, 所需各流域农林牧渔畜业用水量、用水面积等相关数据均源于对应年份的《甘肃省水资源公报》<sup>[24]</sup>。

## 1.4 指标体系构建

建立全面、完善的指标体系是客观评价水土资源耦合程度的基础, 在遵循科学性、合理性、全面性等原则的基础上参考其他学者的相关研究成果并结合研究区域特点对指标进行设置和筛选。根据收集的河西五市 2000—2019 年土地资源和水资源数据, 分别从禀赋和利用两个方面筛选了 19 个评价指标, 构成了河西五市水土资源耦合指标体系。为避免主观赋权法导致指标计算主观性太强以及客观赋权法难以反映决策者对不同指标的重视程度的问题, 本研究采用主观赋权法(层次分析法)和客观赋权法(熵值法)相结合的组合赋权法来弥补单一赋权带来的不足。层次分析法采用专家打分表, 邀请具有水资源和土地资源不同专业背景的专家对各个指标的重要度给出意见, 经过计算确定层次分析法对应权重; 熵值法通过对原始数据标准化处理, 以各指标离散程度来计算熵值法对应权重; 将



主观赋权法和客观赋权法平均即可得到组合赋权法的权重值(表 1)。除农业、工业、生活、生态用水比例等指标为负功效之外,其余指标均表现为正功效。

表 1 耦合协调评价指标体系  
Table 1 Coupling coordination degree evaluation index system

| 子系统    | 指标类别   | 指标名称       | 指标单位                               | 指标类型 | 指标权重     |
|--------|--------|------------|------------------------------------|------|----------|
| 土地资源系统 | 土地资源禀赋 | 耕地比例       | %                                  | +    | 0.113149 |
|        |        | 人均耕地面积     | hm <sup>2</sup>                    | +    | 0.080497 |
|        | 土地资源利用 | 复种指数       | —                                  | +    | 0.055396 |
|        |        | 人均农业总产值    | 万元                                 | +    | 0.048031 |
|        |        | 地均农业总产值    | 万元·hm <sup>-2</sup>                | +    | 0.053585 |
|        |        | 地均粮食产量     | t·hm <sup>-2</sup>                 | +    | 0.055931 |
|        |        | 农业人均 GDP   | 元                                  | +    | 0.058808 |
|        |        |            |                                    |      |          |
| 水资源系统  | 水资源禀赋  | 降水资源总量     | 亿 m <sup>3</sup>                   | +    | 0.052527 |
|        |        | 水资源总量      | 亿 m <sup>3</sup>                   | +    | 0.081521 |
|        |        | 人均水资源量     | m <sup>3</sup>                     | +    | 0.071136 |
|        |        | 地均水资源量     | m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup>   | +    | 0.068958 |
|        |        | 产水系数       | %                                  | +    | 0.020621 |
|        |        | 产水模数       | 万 m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> | +    | 0.025118 |
|        |        |            |                                    |      |          |
|        | 水资源利用  | 广义水土资源匹配系数 | —                                  | +    | 0.051239 |
|        |        | 水资源开发利用率   | %                                  | +    | 0.052814 |
|        |        | 农业用水比例     | %                                  | —    | 0.045069 |
|        |        | 工业用水比例     | %                                  | —    | 0.013450 |
|        |        | 生活用水比例     | %                                  | —    | 0.029646 |
|        |        | 生态用水比例     | %                                  | —    | 0.022506 |
|        |        |            |                                    |      |          |

1.5 评价标准

为揭示水资源系统和土地资源系统之间的耦合协调发展程度,按照耦合协调度的大小,对水土资源耦合系统耦合协调发展程度进行类型划分。将河西地区耦合协调程度划分为失调型、过渡型和协调型三大类和 12 个亚类<sup>[12]</sup>,见表 2。

2 结果与分析

2.1 河西五市水土资源耦合评价

2.1.1 河西五市整体水土资源耦合年际变化特征

从河西五市整体角度来看,2000—2019 年水土资源耦合协调指数呈现波动上升的趋势(表 3)。水土资源耦合协调综合指数由最低 2003 年的 0.36043 上升至最高 2019 年的 0.59344,提高了 64.65%,总体由濒临失调转换为初级协调,甚至接近中度协调,

表 2 水土资源耦合协调评价分类体系及划分标准  
Table 2 Classification system and criteria for coupling evaluation of water-soil resources

| 协调程度 | 耦合协调度        | 耦合协调类型 |
|------|--------------|--------|
| 协调型  | (0.90, 1.00] | 极度协调   |
|      | (0.80, 0.90] | 优质协调   |
|      | (0.70, 0.80] | 良好协调   |
|      | (0.60, 0.70] | 中度协调   |
| 过渡型  | (0.55, 0.60] | 初级协调   |
|      | (0.50, 0.55] | 基本协调   |
|      | (0.45, 0.50] | 勉强协调   |
|      | (0.40, 0.45] | 濒临失调   |
| 失调型  | (0.30, 0.40] | 轻度失调   |
|      | (0.20, 0.30] | 中度失调   |
|      | (0.10, 0.20] | 严重失调   |
|      | (0, 0.10]    | 极度失调   |

表 3 河西五市整体水土资源耦合协调综合指数  
Table 3 Comprehensive coupling coordination index of water-soil resources in five cities of Hexi Corridor

| 年份   | $U_1$   | $U_2$    | 耦合度      | 协调度      | 综合指数      | 耦合协调类型 |
|------|---------|----------|----------|----------|-----------|--------|
| 2000 | 0.11443 | 0.270379 | 0.907490 | 0.192406 | 0.4133533 | 濒临失调   |
| 2001 | 0.09952 | 0.231041 | 0.903989 | 0.165282 | 0.3825275 | 轻度失调   |
| 2002 | 0.10176 | 0.282421 | 0.870822 | 0.192090 | 0.4024035 | 濒临失调   |
| 2003 | 0.07421 | 0.276906 | 0.777666 | 0.175556 | 0.3604346 | 轻度失调   |
| 2004 | 0.08258 | 0.231153 | 0.866462 | 0.156866 | 0.3608177 | 轻度失调   |
| 2005 | 0.12269 | 0.262505 | 0.919047 | 0.192597 | 0.4194203 | 濒临失调   |
| 2006 | 0.13071 | 0.262140 | 0.930914 | 0.196424 | 0.4262491 | 濒临失调   |
| 2007 | 0.08898 | 0.309973 | 0.829754 | 0.199477 | 0.4043660 | 濒临失调   |
| 2008 | 0.14876 | 0.181712 | 0.978574 | 0.165237 | 0.4014598 | 濒临失调   |
| 2009 | 0.16036 | 0.192938 | 0.980173 | 0.176647 | 0.4146316 | 濒临失调   |
| 2010 | 0.19475 | 0.242923 | 0.972107 | 0.218839 | 0.4589733 | 勉强协调   |
| 2011 | 0.15322 | 0.206902 | 0.987459 | 0.180058 | 0.4194179 | 濒临失调   |
| 2012 | 0.19088 | 0.258178 | 0.972654 | 0.224527 | 0.4654537 | 勉强协调   |
| 2013 | 0.21442 | 0.192470 | 0.996152 | 0.203444 | 0.4463752 | 濒临失调   |
| 2014 | 0.21261 | 0.227413 | 0.978708 | 0.220011 | 0.4631376 | 勉强协调   |
| 2015 | 0.21303 | 0.220861 | 0.995545 | 0.216947 | 0.4632473 | 勉强协调   |
| 2016 | 0.22761 | 0.281134 | 0.983276 | 0.254373 | 0.4984242 | 勉强协调   |
| 2017 | 0.23190 | 0.284580 | 0.983824 | 0.258240 | 0.5028473 | 基本协调   |
| 2018 | 0.35422 | 0.238312 | 0.975242 | 0.296264 | 0.5369644 | 基本协调   |
| 2019 | 0.40042 | 0.318490 | 0.981808 | 0.359456 | 0.5934378 | 初级协调   |

这在一定程度上反映了河西走廊地区水土资源匹配程度越来越好、水土资源管理效果显著。2000—2019年,土地资源系统贡献值总体呈上升的趋势,由2000年的0.11443上升到2019年的0.40042,表明土地资源对河西五市地区的水土资源匹配程度的贡献率逐年上升。水资源系统贡献值波动但总体变化不大,说明河西走廊地区水资源总量趋于平衡,由于水资源总量平衡而水土资源耦合程度越来越好。可见,河西地区水资源的合理利用对于水土资源匹配程度的提升也起到了促进作用。近些年,国家推行农田退耕、自然封育任务,并积极调整干旱地区作物种植结构,限制高耗水作物,大力推广高效节水灌溉技术,调整工农业产业结构,因地制宜,逐步实现水土资源的高效配置<sup>[25]</sup>。

2.1.2 河西五市市域水土资源耦合时空差异特征

以5 a为间隔,将2000—2019年分为4个周期即2000—2004年,2005—2009年,2010—2014年和2015—2019年。由图2可知,河西五市水土资源耦

合协调度存在空间差异,且随时间推移,空间差异变化较大。整体来看,河西五市水土资源耦合协调类型由失调型变为过渡型,其中张掖市水土资源耦合协调度提升最为显著,其次为酒泉市,其余各市均保持平稳缓慢增长态势。2000—2004年,河西五市水土资源耦合协调度差异明显,张掖市水土资源耦合协调程度最差,其次为金昌市,最优的为嘉峪关市;2005—2009年,嘉峪关市耦合协调程度最差,其余四市耦合协调程度基本持平;2010—2014年,张掖市和酒泉市水土资源耦合协调度上升明显;2015—2019年,张掖市水土资源耦合协调程度变为最佳,嘉峪关市则变为最差。

水土资源禀赋反映了区域水资源和土地资源天然表现出的特征,是探究水土资源协调的前提和基础,而水土资源利用与其耦合协调程度息息相关,间接决定水土资源的匹配状况<sup>[13]</sup>。从水土资源禀赋耦合协调度来看,除嘉峪关市略微下降以外,其他四市均有不同程度的增长,其中,张掖市和金昌市增长较

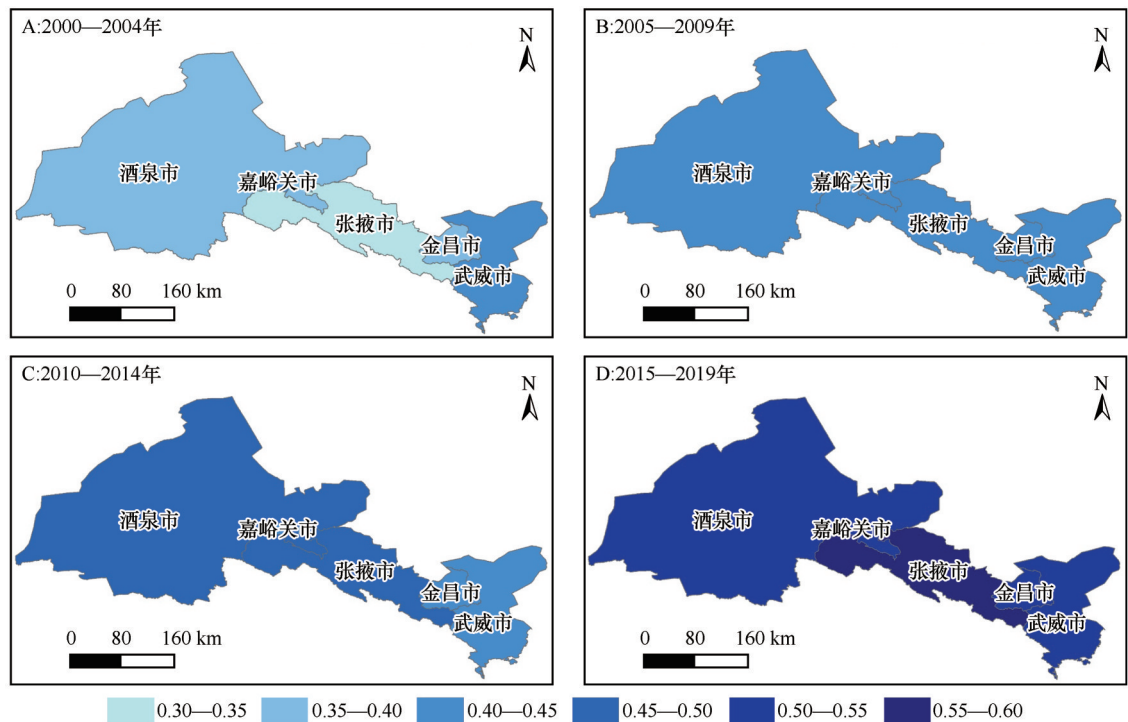


图 2 河西五市水土资源耦合协调度不同年份空间变化

Fig.2 Spatial variation of coupling coordination degree of water-soil resources in five cities of Hexi Corridor in different years

快,嘉峪关市和武威市在 2010—2014 年水土资源禀赋耦合协调度略微下降,但在 2015—2019 年又回归到正常水平(图 3)。从水土资源利用耦合协调度来

看,河西五市差别不大且都在稳步提升,机械化水平提高、种植结构调整、节水灌溉技术的推广等措施共同促进了水土资源利用耦合协调度越来越高。

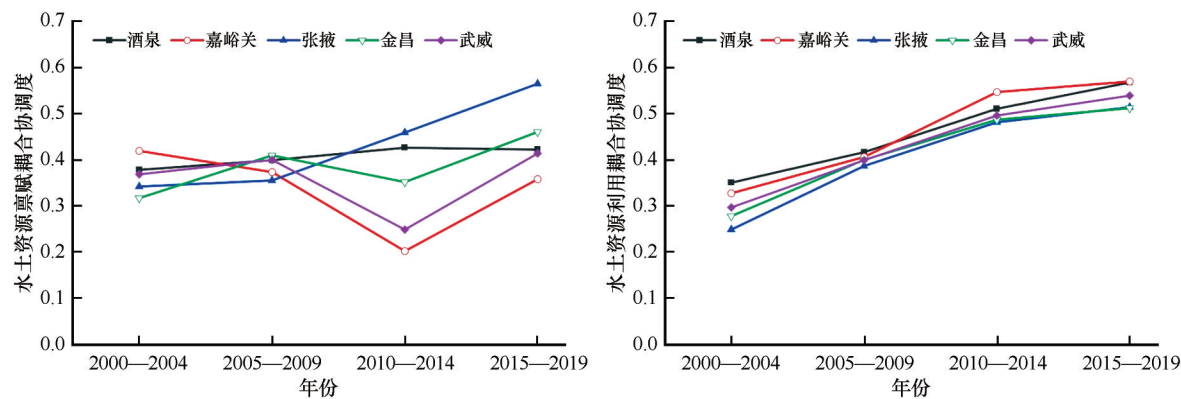


图 3 河西五市水土资源禀赋及水土资源利用耦合协调度

Fig.3 The coupling coordination model of water-soil resources endowment and water-soil resources utilization in Hexi Corridor five cities

2.1.3 河西五市水土资源耦合影响因子

以 2000—2019 年水、土资源系统各项指标的原始数据为子序列,水、土资源评价综合指数为母序列,对原始数据进行归一化处理,采用灰色关联度分析法得到水资源系统中影响程度最高的 3 个指标依次为人均水资源量、降水资源总量和水资源总

量,土地资源系统中影响程度最高的 3 个指标为地均粮食产量、耕地比例和地均农业总产值。由于大陆性干旱气候的影响,河西五市水资源匮乏,所以水资源在土地的利用率及人口是制约当地水土资源耦合协调度的关键性因素,应通过加强水土资源管理,使水资源、土地资源和当地人口适配,并根据

地区特点种植低耗水型作物,采取有效的节水灌溉措施,提高水资源利用率。

2.2 河西走廊三大流域中游地区水土资源耦合评价

基于河西走廊三大内陆河流域中游地区的水资源利用量、用水面积等数据,运用农业水土资源匹配系数法计算水土资源耦合度,计算结果如表4所示。

2000—2019年,河西走廊不同内陆河流域中游地区农业水土资源匹配程度不同,并且存在较大差异(图4)。整体来看,疏勒河中游地区的水土资源匹配程度均高于黑河和石羊河<sup>[22]</sup>,3个流域2000—2019年的平均值分别为1.5605万、0.6065万、0.6246

万 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ,由此可知河西走廊内陆河流域中游地区水土资源匹配程度疏勒河>石羊河>黑河。疏勒河流域中游地区水土资源匹配程度呈波动下降的趋势,且波动幅度较大,极差可达1.51904万 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。黑河和石羊河流域水土资源匹配程度差异不大且波动幅度较小,极差分别为0.3743万 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 和0.5744万 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。自2000年西部大开发战略实施以来,耕地资源大规模开发,高耗水农业的长期发展造成地下水资源过度开发,耕地资源退化,土壤侵蚀和土壤盐渍化现象加重,降低土壤肥力,造成河西地区三大内陆河流域水土资源匹配程度均未有提升,疏勒河流域甚至下降明显<sup>[25]</sup>。

表4 2000—2019年河西走廊内陆河流域中游地区农业水土资源匹配系数(单位:万 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )  
Table 4 Matching coefficients of agricultural water-soil resources of Middle reaches of inland river basin in Hexi Corridor from 2000 to 2019 (Unit:  $10^4 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )

| 年份   | 疏勒河     | 黑河      | 石羊河     | 年份   | 疏勒河     | 黑河      | 石羊河     |
|------|---------|---------|---------|------|---------|---------|---------|
| 2000 | 2.23837 | 0.78676 | 0.59485 | 2010 | 1.81459 | 0.76615 | 0.65747 |
| 2001 | 1.61847 | 0.41249 | 0.58579 | 2011 | 1.41302 | 0.63465 | 0.60420 |
| 2002 | 2.25140 | 0.67357 | 0.58451 | 2012 | 1.36804 | 0.64520 | 0.70352 |
| 2003 | 1.81402 | 0.54865 | 0.96796 | 2013 | 1.52588 | 0.50361 | 0.39359 |
| 2004 | 1.75922 | 0.55381 | 0.64604 | 2014 | 1.22136 | 0.47879 | 0.55357 |
| 2005 | 1.76697 | 0.65135 | 0.74974 | 2015 | 1.40545 | 0.50063 | 0.50261 |
| 2006 | 1.93700 | 0.57439 | 0.79286 | 2016 | 1.81346 | 0.53296 | 0.55885 |
| 2007 | 1.43559 | 0.78214 | 0.79907 | 2017 | 1.63453 | 0.56975 | 0.57954 |
| 2008 | 1.29608 | 0.68170 | 0.58509 | 2018 | 0.73236 | 0.49442 | 0.51711 |
| 2009 | 1.36844 | 0.74605 | 0.61164 | 2019 | 0.79601 | 0.59296 | 0.50427 |

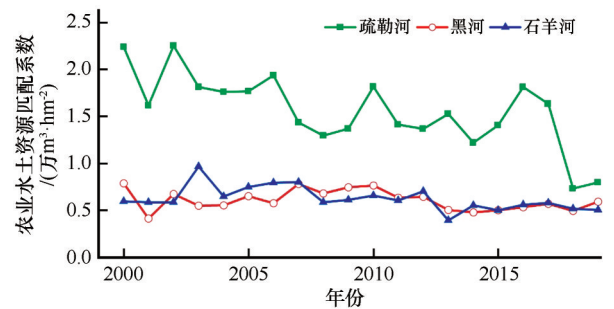


图4 2000—2019年河西走廊内陆河流域中游地区农业水土资源匹配系数

Fig.4 Matching coefficient of agricultural water-soil resources in the middle reaches of inland river basin in Hexi Corridor from 2000 to 2019

疏勒河流域水土资源匹配程度最高,但酒泉市水土资源耦合协调水平却低于黑河流域的张掖市(表5)。酒泉市土地资源中影响程度最大的3项依

次为耕地比例、地均农业总产值、地均粮食产量,而张掖市则为耕地比例、地均粮食产量、人均耕地面积;酒泉市水资源影响程度最大的3项依次为降水资源总量、水资源开发利用、水资源总量,张掖市则为农业用水比例、水资源开发利用和降水资源总量。两市水土资源耦合协调水平差异较大的原因主要与人口规模、降水量、农业生产水平等因素有关。甘肃省疏勒河流域总人口约53.63万,远小于黑河流域的207.93万人和石羊河流域的217.77万人;而疏勒河流域内第一产业生产总值仅占国内生产总值的10.9%,说明疏勒河流域对于水土资源合理利用的重视程度不够<sup>[22]</sup>,因此疏勒河流域水土资源匹配程度逐年下降,所以需要加强水土资源统一管理、统一调度,节约用水和提高水土资源利用率相结合,合理分配水土资源,建立健全水土资



表 5 河西五市 2000—2019 年水土资源耦合协调类型

Table 5 Coupling coordination types of water-soil resources in five cities of Hexi Corridor from 2000 to 2019

| 流域  | 市域  | 2000—2004 年 |        | 2005—2009 年 |        | 2010—2014 年 |        | 2015—2019 年 |        |
|-----|-----|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
|     |     | 耦合协调度       | 耦合协调类型 | 耦合协调度       | 耦合协调类型 | 耦合协调度       | 耦合协调类型 | 耦合协调度       | 耦合协调类型 |
| 疏勒河 | 酒泉  | 0.39385     | 轻度失调   | 0.42999     | 濒临失调   | 0.48714     | 勉强协调   | 0.52198     | 基本协调   |
| 黑河  | 嘉峪关 | 0.42333     | 濒临失调   | 0.38954     | 轻度失调   | 0.42098     | 濒临失调   | 0.50040     | 基本协调   |
|     | 张掖  | 0.34628     | 轻度失调   | 0.41223     | 濒临失调   | 0.50403     | 基本协调   | 0.55105     | 初级协调   |
| 石羊河 | 金昌  | 0.35416     | 轻度失调   | 0.41819     | 濒临失调   | 0.43264     | 濒临失调   | 0.50678     | 基本协调   |
|     | 武威  | 0.40193     | 濒临失调   | 0.41618     | 濒临失调   | 0.41359     | 濒临失调   | 0.51472     | 基本协调   |

源高效管理体制和运行机制。除此之外,石羊河流域的武威市在 2000—2014 年均处于濒临失调的状态,但在 2015—2019 年转为基本协调状态。其原因与武威市用水结构的调整和石羊河流域水土资源治理有着密不可分的关系。在“西部大开发”政策实行的早期,为促进社会经济发展大规模开发水土资源,流域农业灌溉面积过大,种植结构不合理,致使灌溉用水量过大,水资源利用率不高;随后国家批复《石羊河流域重点治理规划》方案<sup>[26]</sup>,优化了用水结构,发展高效节水农业,提高了水资源利用效率和效益,并且武威市紧紧围绕石羊河流域综合治理这一主线,全力推进水权水价改革、关井压田和日光温室建设等重点工作,促进了武威市节水型社会的建设,为其水土资源耦合协调的发展提供了保障。而黑河流域和石羊河流域水土资源匹配程度虽然没有较大变化,但其对应的地级市水土资源耦合协调程度却在不断增加,说明水土资源利用率虽然还有一定的进步空间,但也一直在缓慢上升。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本文从水资源、土地资源入手,开展了河西五市水土资源耦合协调评价和甘肃省河西走廊内陆河流域中游地区水土资源匹配分析研究,并确定河西五市水土资源耦合协调的主要影响因子,所得结论与已有研究基本一致<sup>[25]</sup>,即河西走廊地区水土资源耦合协调度不高,耕地资源较丰富,水资源较少,水土资源空间分布不均匀<sup>[27]</sup>。河西走廊深居大陆腹地,降水量少而蒸散发强烈,水资源匮乏且空间分布不均等问题制约着当地水土资源耦合发展,在这种情况下,需要进行祁连山水源涵养区建设,增

强水库上游水源涵养力度,采用封育为主,涵养、管护相结合的方式,保护上游水源;还可以采用工程调水的方式,在最大限度挖掘节水潜力、充分利用非常规水源、合理配置水资源的基础上,解决城镇发展、工业发展以及农业灌溉的季节性、工程性和区域性缺水问题,改善地区生态环境<sup>[28]</sup>。随着农业机械化水平的提高和高效节水灌溉技术的发展,水土资源耦合协调度在缓慢提升,但与国内其他地方相比仍有差距,因此今后应继续坚持节水技术推广,促进农业向高效益、低耗水方向发展,强调循环用水,提高用水循环利用率,同时注重水土资源的合理开发和保护,因地制宜,逐步实现农业水土资源的高效配置<sup>[25]</sup>。

本文对于河西走廊水资源和土地资源的耦合协调度研究,重点在于社会经济条件下的水土资源的耦合情况,但水土资源耦合应该是水土资源的社会经济和自然状态相结合,包括土地类型、土壤质量、降雨量、蒸散发等自然条件。未来应加强基于水文条件下的水土资源耦合协调机理的研究及生态水文过程模拟<sup>[13]</sup>,推进干旱区水土资源耦合协调和优化配置,为干旱区社会经济和生态的发展提供技术和理论支撑。

3.2 结论

2000—2019 年,河西五市水土资源耦合协调度整体提升了 64.65%,由濒临失调转换为初级协调,呈现不断改善的趋势。近 20 年,河西五市水土资源耦合协调程度均有所提升,其中,张掖市、酒泉市水土资源耦合程度较高,嘉峪关市耦合程度较低;从水土资源禀赋来看,张掖市和金昌市水土资源禀赋耦合程度增长较快,嘉峪关市略有下降;从水土资源利用来看,河西五市水土资源利用程度差别不大



且都在稳步提升。

水资源系统的人均水资源量、降水资源总量和水资源总量以及土地资源系统的地均粮食产量、耕地比例和地均农业总产值是影响河西五市水土资源耦合协调的主要因素。受河西地区自然环境的影响,要提升水土资源耦合协调度,需要加强水土资源管理,发展高效节水农业,采取有效的节水灌溉措施,提高水土资源利用率。

河西走廊内陆河流域中游地区水土匹配情况存在较大差异。疏勒河流域耦合度最高,但是却呈波动下降趋势,经分析认为疏勒河流域第一产业不发达,需要加强水土资源统一管理、统一调度,节约用水和提高水土资源利用率相结合,建立健全水土资源高效管理体制;黑河流域和石羊河流域水土资源耦合协调度变化小,但流域对应的地级市水土资源耦合协调度均在缓慢上升,说明河西地区水土资源利用率虽然还有进步空间,但也一直在缓慢进步。

#### 参考文献:

- [1] 姚华荣,吴绍洪,曹明明,等.区域水土资源的空间优化配置[J].资源科学,2004,26(1):99-106.
- [2] Luc C, Charles H, Edward R, et al. Effect of historical changes in land use and climate on the water budget of an urbanizing watershed [J]. Water Resources Research, 2006, 42(3): W03426.
- [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] 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] 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.
- [6] 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].咸阳: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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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): 632-632.
- [11] Vitor J. Efficient water management: an analysis for the agricultural sector[J]. Water Policy, 2020, 22(3): 396-416.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 田青,李宗杰,宋玲玲,等.甘肃河西地区1986—2011年水土保持生态安全格局[J].中国沙漠,2014,34(6):1692-1698.
- [16] 朱陇强,王晓云,刘佳敏,等.甘肃河西地区历史遗址分布及其自然环境背景[J].中国沙漠,2021,41(4):121-128.
- [17] 李玲萍,卢泰山,刘明春,等.基于标准化流量指数(SDI)的石羊河流域水文干旱特征[J].中国沙漠,2020,40(4):24-33.
- [18] 张晓晓,张钰,徐浩杰,等.河西走廊三大内陆河流域出山径流变化特征及其影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):66-72.
- [19] 吕杰.滇东南岩溶山区水土资源利用与生态环境耦合协调模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2014.
- [20] 姜秋香,周智美,王子龙,等.基于水土资源耦合的水资源短缺风险评价及优化[J].农业工程学报,2017,33(12):136-143.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 甘肃统计局.甘肃统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2001-2020.
- [24] 甘肃省水利厅.甘肃水资源公报[R].北京:中国统计出版社,2000-2019.
- [25] 梁变变,石培基,王伟,等.甘肃省农业水土资源时空匹配格局[J].资源开发与市场,2016,32(12):1461-1465.
- [26] 徐娜,张军,张仁陟,等.基于DEA的农业水土资源匹配特征研究:以甘肃省5流域为例[J].中国农业资源与区划,2020,41(6):277-285.
- [27] 程清平,钟方雷,左小安,等.美丽中国与联合国可持续发展目标(SDGs)结合的黑河流域水资源承载力评价[J].中国沙漠,2020,40(1):204-214.
- [28] 许杰玉,蒋蕾,毛磊,等.典型西北干旱区水资源开发利用及保护对策研究:以武威市为例[J].水利发展研究,2016,16(5):34-37.

## Coupling effect of water-soil resources in Hexi Area of Gansu, China in 2000–2019

Wang Lingge<sup>1</sup>, Zhu Rui<sup>1</sup>, Chen Zexia<sup>1</sup>, Yin Zhenliang<sup>2</sup>, Lu Rui<sup>1</sup>, Fang Chunshuang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geomatics / National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring / Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Ecohydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, we take the Hexi Corridor of Gansu as the research area, use the coupling coordination model and the agricultural water-soil resource matching coefficient method to quantify the water-soil coupling coordination in the five cities of Hexi Corridor and the middle reaches of the three inland river basins in Hexi Corridor, and on this basis, the influencing factors of soil resources and water resources are analyzed by grey correlation analysis. The main research results are as follows: (1) From 2000 to 2019, the overall coupling coordination degree of water-soil resources in five cities of Hexi has increased by 64.65%, and it is on the verge of imbalance to primary coordination, showing a trend of continuous improvement. Among them, the coupling degree of water-soil resources in Zhangye City and Jiuquan city increased higher. (2) The main factors affecting the coupling coordination of water-soil resources in the five cities of Hexi are the per capita water resources, the total precipitation resources and the total water resources of the water resources system, and the average grain yield, the proportion of cultivated land and the average agricultural output value of the land resources system. (3) In the middle reaches of the three inland rivers in Hexi Corridor, the coupling degree of Shule River Basin is the highest, but it shows a fluctuating downward trend, while the coupling degree of Heihe River Basin and Shiyang River Basin changes little. Therefore, we should continue to adhere to the promotion of water-saving technology, promote the development of agriculture to the direction of high efficiency and low water consumption, pay attention to the rational development and protection of water-soil resources, and gradually realize the efficient allocation of water-soil resources according to local conditions.

**Key words:** coupling effect of water-soil resources; Hexi Corridor; inland river basins; matching coefficient