

滕 伦,张飞云,李 倩,等.新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调关系研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1556-1567.

Teng L, Zhang F Y, Li Q, et al. Study on the coupling and coordination relationship between ecosystem service and water use efficiency in Xinjiang [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1556-1567.

## 新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调关系研究

滕 伦<sup>1</sup>,张飞云<sup>1\*</sup>,李 倩<sup>2,3,4</sup>,李建强<sup>1</sup>,马丽娜<sup>1</sup> (1.新疆农业大学公共管理学院,新疆 乌鲁木齐 830052; 2.中国科学院新疆生态与地理研究所,新疆 乌鲁木齐 830011; 3.新疆干旱区水循环与水利用重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011; 4.天山积雪雪崩新疆野外科学观测研究站,新疆 新疆 835800)

**摘要:** 基于 2005~2020 年新疆土地利用和用水量等数据,测算并分析新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调关系.结果表明:2005~2020 年新疆食物生产呈明显增加趋势,其他各项生态系统服务变化不明显.2005~2020 年新疆农业用水效率在 0.649 以上,且存在上升趋势(上升率 0.023/a);生态用水效率以 0.013/a 的速率呈波动下降,且存在较为明显的区域差异;生活工业用水效率整体较高但变幅较小.2005~2020 年生态系统服务与用水效率的耦合协调度变化明显.其中,食物生产和农业用水效率的耦合协调度以 0.057/a 的速率上升,到 2020 年达到高度协调(0.995);但生境质量与生态用水效率的耦合协调度在以 0.052/a 的速率降低,到 2020 年达到轻度失调(0.251)).表明新疆在农业生产方面水资源的配置和利用效率已经达到了高度协调的状态,但对生态环境用水的关注有待提升.

**关键词:** 生态系统服务; 用水效率; 耦合协调; 新疆

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1556-12

**Study on the coupling and coordination relationship between ecosystem service and water use efficiency in Xinjiang.** TENG Lun<sup>1</sup>, ZHANG Fei-yun<sup>1\*</sup>, LI Qian<sup>2,3,4</sup>, LI Jian-qiang<sup>1</sup>, MA Li-na<sup>1</sup> (1.School of Public Management, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3.Key Laboratory of Water Cycle and Water Use in Arid region of Xinjiang, Urumqi 830011, China; 4.Tianshan Snow Avalanche Xinjiang field Scientific Observation and Research Station, Xinyuan 835800,China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1556~1567

**Abstract:** The coupling and coordinated relationship between ecosystem services and water use efficiency is calculated and analyzed according to the land use and water consumption data from 2005 to 2020 in Xinjiang.The results indicated that food production increased significantly from 2005 to 2020, while other ecosystem services had no significant change. The agricultural water efficiency was greater than 0.649 and increased with rate of 0.023/a from 2005 to 2020. The ecological water use efficiency decreased with rate of 0.013/a, and had significant regional difference. The water efficiency in domestic industry was higher and changed little. The coupling coordination degree of food production and agriculture water efficiency increased with rates of 0.057/a, and achieved highly coordination (0.995) in 2020. The coupling coordination degree of habitat quality and ecological water use efficiency decreased with rate of 0.052/a, and achieved slightly dysregulation (0.251) in 2020. The results indicated that the allocation and utilization efficiency of water resources in agricultural production reached highly coordination in Xinjiang, but the attention of ecological environment water use needs to be improved.

**Key words:** ecosystem service; water use efficiency; coupling coordination; xinjiang

水土资源作为生态系统的重要组成部分,两者协调发展对推进生态系统可持续发展具有重要作用<sup>[1]</sup>.随着社会经济的快速发展和人口的增加,水土资源压力日渐增大.干旱半干旱地区降水少蒸发大,生态环境受水资源影响非常脆弱,且水资源短缺,生态系统恶化,探究干旱半干旱区生态系统和用水效率之间的关系,对维持生态系统健康和可持续发展意义重大.因此急需科学评价生态系统服务与用水

效率之间的关系,助力水土资源的高效利用和可持续发展.

目前国内外对生态系统服务与用水效率的研究多集中于水土资源方面,张祥永等采用耦合协调

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 新疆干旱区水循环与水利用实验室开放课题(XJYS0907-2023-06)

\* 责任作者, 副教授, feiyun42265@126.com

度模型分析我国省域水资源可持续性和生态系统服务价值的耦合协调关系,表明两者耦合协调度先减少后增加,整体处于初级协调类型<sup>[2]</sup>;张文睿等研究发现河西走廊区域水资源-生态系统的耦合协调度在2006~2021年波动较大<sup>[3]</sup>;Ying等认为中亚国家间水土资源匹配程度存在较大差异,咸海上游国家匹配度优于下游国家<sup>[4]</sup>。现有的水土资源研究成果丰富,但在“水”和“土”上的研究重点不同,“土”以耕地面积<sup>[5]</sup>,流域土地面积<sup>[6]</sup>等为主,“水”是以水资源使用量<sup>[7-8]</sup>,水足迹<sup>[5]</sup>等。其中张雯等认为山东省水土资源数量及质量匹配系数在空间上呈现出一致性,水土资源空间配置水平高的地区同时面临着较大的农业面源污染压力<sup>[5]</sup>;Sun等<sup>[9]</sup>认为受人类活动的影响,我国水资源与潜在耕地资源的匹配程度极差,农业水资源与耕地资源的匹配程度优于潜在耕地与水资源,同样黄梓鑫等认为我国农业水土资源整体高度不匹配且呈不显著变差的趋势,处于高度不平衡状态<sup>[7]</sup>。Geng等<sup>[10]</sup>结合蓝水和绿水对我国水土资源匹配进行分析,由于蓝水的影响,新疆农业用水和土地资源的匹配度最高,且水土匹配与降水的分布并不完全一致。土地对人类的影响主要是通过它所能提供的生态系统服务来体现;干旱区的水量是有限的,开发利用主要是通过提高用水效率来实现。因此本文拟从土地的生态系统服务和用水效率来分析干旱区水土资源之间的关系。

从国内外研究可知,对生态系统服务和用水效率单方面已经展开了大量研究并取得一定的成果<sup>[11-12]</sup>。对生态系统服务的研究集中在时空演变<sup>[12-13]</sup>,影响因素<sup>[7,14]</sup>,供需匹配<sup>[15-16]</sup>,权衡协同<sup>[17]</sup>,其中Niu等通过探究松花江流域生态系统服务协同/权衡趋势,发现土壤固存,水土保持和生物多样性在空间上有显著的协同关系,食物生产和产水在时间上是协同的<sup>[17]</sup>。Jia等<sup>[13]</sup>基于1995,2005和2016年三期芜湖市遥感数据,分析生态系统服务时空演变规律,表明芜湖市生态系统服务持续下降,且与生态风险存在正相关关系。Wang等<sup>[14]</sup>结合当量因子法等定量分析新疆生态系统服务价值变化的驱动力,认为新疆生态系统服务总值逐年递增,其中人类活动因素影响程度较大。Tian等<sup>[16]</sup>认为杭州生态系统服务碳储存供小于求,产水量,土壤保持,食物生产和休闲娱乐供大于求,且生态系统服务供需空间异质性显

著,城区供需失衡,西部供需较协调。而学者们对用水效率的研究则更偏向于农业用水效率<sup>[18]</sup>,工业用水效率<sup>[19]</sup>及生活用水效率<sup>[20]</sup>,对生态用水效率的探究较少。Geng等<sup>[21]</sup>通过数据包络法对我国31个省区的农业用水效率研究发现,2008年后我国农业用水效率有所提高。苗峻瑜等<sup>[19]</sup>基于超效率SBM模型测算黄河流域工业水资源效率,认为黄河流域整体工业水资源效率整体呈上升趋势,但未达到有效水平。HAI等基于京津冀城市群用水数据,表明城市群联动协调管理水资源有利于生活用水效率的提高<sup>[22]</sup>。用水效率测算方法主要采用超效率SBM模型<sup>[23]</sup>,DEA模型<sup>[24]</sup>等方法测算效率;其中超效率SBM模型适用于期望产出和非期望产出等指标,三阶段超效率SBM是剔除环境因素和随机误差等因素对效率值的影响,DEA-CCR模型适用于多投入-单产出的指标体系。而本文研究区新疆生产用水中约96%以上都用于农业生产<sup>[25]</sup>,故在生产用水效率分析时以农业用水效率为主;生态用水中的地表及地下水资源量对于干旱半干旱的新疆来说至关重要,影响植被覆盖度,对水源涵养和防风固沙等具有重要意义,亟需探究生态用水效率;生活用水和工业用水方面在整个新疆占比相对较小,将其合并进行综合分析;因此结合新疆实际情况,基于本文构建的用水效率指标体系,采用DEA-CCR模型测算农业、生活工业及生态用水效率。

这些成果为生态系统及其相关应用研究已经奠定了基础,但对生态系统服务和用水效率之间关系的探究较少。干旱半干旱地区生态环境脆弱,水资源短缺,生态系统恶化,探究干旱半干旱区生态系统和用水效率之间的关系,对维持生态系统健康和可持续发展意义重大。因此,本研究基于土地利用数据及相关经济数据,采用生态系统测算方法及数据包络法等对新疆生态系统服务和用水效率的关系进行分析,以期能够为新疆水资源高效利用提供理论支撑和生态环境保护提供科学指导,从而推动新疆地区的可持续发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区(73°40'~96°18'E,34°25'~48°10'N),是我国典型的西北干旱区,由于其脆弱和

敏感性,极易受到人类活动与自然环境的影响.新疆山脉与盆地相间排列盆地与高山环抱,喻称“三山夹两盆”,北部阿尔泰山,南部为昆仑山系;天山横亘于新疆中部,南部是塔里木盆地,北部是准噶尔盆地.新疆远离海洋,深居内陆,四周有高山阻隔,海洋气流不易到达,形成明显的温带大陆性气候;气温温差较大,日照时间充足,降水量少,气候干燥.因此新疆面临着水资源短缺、土地沙漠化、水土流失等一系列生态挑战,这些因素始终制约着社会经济及生态系统的可持续发展.

## 1.2 数据来源

新疆土地利用数据(1km)、NDVI(1km)、逐年降水量和行政区划数据均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>);潜在蒸散发数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>);土壤数据来源于世界土壤数据库(HWSD);农业用水量、农业机械总动力、农作物播种面积、生活用水量等数据来源于《新疆统计年鉴》和《新疆水资源公报》;部分缺失数据采用插值法补充完整.

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务测算方法

基于新疆水资源短缺,耕地面积广,生态环境脆弱,土壤盐碱化、土地沙漠化、水土流失等生态问题严重,本研究结合研究区实际情况和数据的可获取性,重点对食物生产(FD)、生境质量(HQ)、碳储存(CS)、土壤保持(SDR)、产水量(WY)及绿地休闲(RS)六项生态系统服务进行测算和分析.

#### (1)食物生产(FD)

利用 NDVI 数据对食物生产进行空间化,根据 NDVI 值将新疆统计数据的粮食产量分配到耕地像元上<sup>[26]</sup>,从而得出食物生产.计算如下:

$$FS_i = G_{\text{sum}} \cdot \frac{NDVI_i}{NDVI_{\text{sum}}} \quad (1)$$

式中:FS<sub>i</sub>为食物生产 t;G<sub>sum</sub>为新疆粮食、油料、蔬菜、水果的总产量 t;NDVI<sub>i</sub>为第 i 个栅格的归一化植被指数;NDVI<sub>sum</sub>为新疆耕地 NDVI 之和.

#### (2)生境质量(HQ)

采用 InVEST 模型中的生境质量模块进行评估,通过退化程度和生境适宜性计算得到新疆的生境

质量<sup>[27]</sup>.计算公式如下:

$$HQS_{mn} = H_n \cdot \left[ 1 - \left( \frac{S_{mn}^z}{S_{mn}^z + K^z} \right) \right] \quad (2)$$

式中:HQS<sub>mn</sub>为土地利用类型 m 的第 n 个栅格的生境质量;S<sub>mn</sub>为土地利用类型 m 的第 n 个栅格的生境胁迫度;K 为半饱和参数;z 为归一化常数.

#### (3)碳储存(CS)

InVEST 模型的碳储量模块将生态系统服务碳储量分为地上碳储量、地下碳储量、土壤碳储量和死亡有机质碳储量 4 个部分<sup>[28]</sup>,本研究基于 InVEST 模型中的碳储存模块评估新疆生态系统服务的碳储量.计算如下:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (3)$$

式中:C<sub>tot</sub>为总碳储量,t/hm<sup>2</sup>;C<sub>above</sub>为地上生物碳,t/hm<sup>2</sup>;C<sub>below</sub>为地下生物碳,t/hm<sup>2</sup>;C<sub>soil</sub>为土壤有机碳,t/hm<sup>2</sup>;C<sub>dead</sub>为死亡有机物,t/hm<sup>2</sup>.

#### (4)土壤保持(SDR)

土壤保持由土壤潜在侵蚀量和土壤实际侵蚀量决定的,本研究采用修正通用流失方程估算新疆生态系统土壤保持量<sup>[29]</sup>.利用 InVEST 模型的土壤保持模块计算,计算如下:

$$SD = RKLS - USLE$$

$$RKLS = R \cdot K \cdot LS \quad (4)$$

$$USLE = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

式中:SD 为土壤保,t;RKLS 为潜在土壤侵蚀量,t;USLE 为实际土壤侵蚀量,t;R 为降雨侵蚀因子;K 为土壤可蚀性因子;LS 为坡长坡度因子;C 为植被覆盖和管理因子;P 为土壤保持措施因子.

#### (5)产水量(WY)

采用 InVEST 模型的产水量模块评估新疆产水量,基于水量平衡原理,综合考虑植被覆盖、土地利用、地形及土壤质地等因素进行计算<sup>[30]</sup>.计算如下:

$$Y(x) = \left( 1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right) P(x)$$

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} \cdot \left[ 1 + \frac{PET(x)^w}{P(x)} \right]^{1/w}$$

$$PET(x) = K_{c(x)} \cdot ET_{O(x)}$$

$$W(x) = \frac{AWC(x) \cdot Z}{P(x)} + 1.25 \quad (5)$$

式中:Y(x)为年产水量,mm;AET(x)为年实际蒸发量,mm;P(x)为年降水量;K<sub>c(x)</sub>为作物蒸散系数;ET<sub>O(x)</sub>为参考植物蒸散量;AWC(x)为植物有效可利用水

量; $W(x)$ 为经验参数; $Z$ 为经验常数.

(6)绿地休闲(RS)

参照 Li 等<sup>[31]</sup>的研究,通过 ArcGIS 软件中的渔网工具将每个栅格的林地、草地和水域进行提取,以此来量化新疆绿地休闲的供给.

2.2 用水效率测算方法

本研究中用水效率测算采用数据包络分析法<sup>[15]</sup>,采用 DEA-CCR 模型对多投入-单产出的结构进行效率分析,避免了单独衡量一个角度的局限性.模型公式如下:

$$\begin{cases} \min \left[ \theta - \varepsilon \left( \sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+ \right) \right] = A \\ \sum_{j=1}^n \chi_{ij} \lambda_j + S_i^- = \theta \chi_{i0} \\ \sum_{j=1}^n \gamma_{rj} \lambda_j - S_r^+ = \gamma_{rj0} \\ (S_i^-, S_r^+ \geq 0, \theta, \lambda_j \geq 0) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A$  是目标产出最大化的对偶规划, $\theta$ 为生产用水效率值, $\varepsilon$ 为非阿基米德无穷小量; $S_i^-$ 、 $S_r^+$  分别是输

入、输出的松弛变量; $n$  为决策单元数量,14 个决策单元,每个决策单元有  $m$  个输入变量和  $s$  个输出变量,农业用水包括 5 个输入变量和 1 个输出变量; $\chi_{ij}$  和  $\gamma_{rj}$  分别为第  $j$  个决策单元第  $i$  个输入和第  $r$  个输出指标值; $\chi_{i0}$  和  $\gamma_{rj0}$  分别为  $j_0$  个决策单元第  $i$  个输入和第  $r$  个输出指标值; $\gamma_j$  为输入和输出植被指标的权重.

根据前人经验<sup>[32]</sup>,在划分“三生”用水效率的基础上,结合新疆实际情况,将用水效率细分为农业用水效率、生活工业用水效率及生态用水效率进行分析.在指标选取上,参照投入-产出关系,选取农业用水量、农业机械总动力、化肥使用量、农作物播种面积、就业人口、生活用水量、财政支出、总人口、生态用水量、降雨量、气温、地表水资源量和地下水资源量等 13 个指标作为投入指标,农业生产总值、生产总值及 NDVI 数据作为产出指标,其中生活工业用水效率中的产出指标生产总值具体是指地区生产总值与农业生产总值的差值.具体见表 1.

表 1 新疆用水效率评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of water use efficiency in Xinjiang

用水效率分类	指标类型	指标分类	变量说明
农业用水效率	投入指标	农业水资源投入	单位农作物播种面积农业用水量
		农业资本投入	单位农作物播种面积农业机械总动力
		农业中间投入	单位农作物播种面积化肥使用量
	劳动力投入	单位地区面积农作物播种面积	
产出指标	农业总产值	就业人口	
生活工业用水效率	投入指标	水资源投入	单位农作物播种面积农业生产总值
		资本投入	生活用水量
	劳动力投入	财政支出	
产出指标	生产总值	总人口	
生态用水效率	投入指标	水资源投入	单位地区面积生产总值
		自然因素	生态用水量
		地表水资源	年均降雨量
	地下水资源	年均气温	
产出指标	植被指数	单位 NDVI 地表水资源量	
			单位 NDVI 地下水资源量
			NDVI

2.3 耦合协调度模型

耦合协调度反映的是系统内部要素之间在发展过程中彼此和谐一致的程度,该值越大,表明两者越趋于协调发展,反之亦然<sup>[33]</sup>.因此本研究运用耦合协调度模型测算新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调关系.计算如下:

$$C = \frac{2\sqrt{U_1 U_2}}{U_1 + U_2} \quad (7)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (9)$$

式中: $C$  为耦合度, $T$  为协调度, $D$  为耦合协调度,取值范围 $[0,1]$ ;  $U_1$  和  $U_2$  分别为每项生态系统和对应用水

效率综合值; $\alpha$ 和 $\beta$ 为系统权重,和为 1.

依据现有研究<sup>[34]</sup>将耦合协调度划分为高度失调、轻度失调、轻度协调、基本协调和高度协调五个阶段,具体结果见表 2.

表 2 生态系统与用水效率耦合协调度等级划分  
Table.2 Classification of coupling coordination degree between ecosystem and water use efficiency

耦合协调度范围	$0 \leq D \leq 0.2$	$0.2 < D \leq 0.4$	$0.4 < D \leq 0.6$	$0.6 < D \leq 0.8$	$0.8 < D < 1$
耦合协调度类型	高度失调	轻度失调	轻度协调	基本协调	高度协调

### 3 结果与讨论

#### 3.1 新疆生态系统服务演变分析

由图可知,食物生产从 2005 年到 2020 年呈明显增长的态势,从  $12.66\text{t}/\text{km}^2$  增长到  $27.64\text{t}/\text{km}^2$ ,增幅 118.33%,这与农作物播种面积的增加、农业机械设备的优化及管理水平的提高是息息相关的<sup>[35]</sup>;FD 集中分布在绿洲地区,包括塔里木河流域、伊犁河流域、孔雀河流域、额尔齐斯河流域等.从 2005 年到 2020 年,食物生产分布从各绿洲区域向四周延伸.

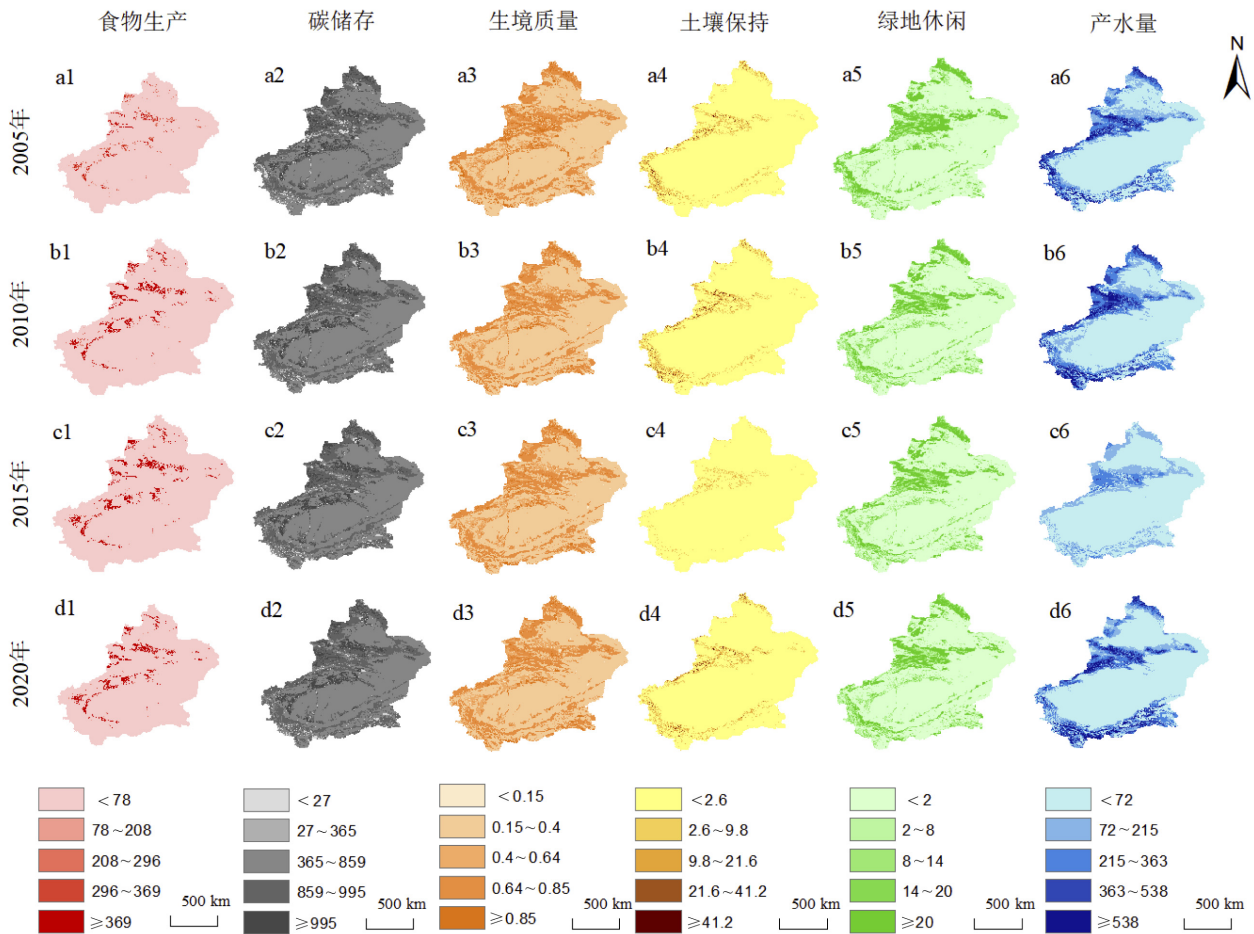


图 1 新疆生态系统服务空间分布格局

Fig.1 Spatial distribution pattern of ecosystem services in Xinjian

碳储存从 2005 年到 2020 年呈少量增加状态,变化幅度较小,从  $549.67\text{t}/\text{km}^2$  增加到  $559.51\text{t}/\text{km}^2$ ,增幅仅为 1.79%.生境质量在 2005~2020 年期间变幅较小,保持在 0.45~0.46 之间.绿地休闲在 2005~2020 年期间呈少量减少状态,从  $4.71\text{km}^2/\text{km}^2$  减少到

$4.53\text{km}^2/\text{km}^2$ ,减幅为 3.82%.CS、HQ 及 RS 的空间分布格局相似,这与研究区的土地覆盖类型密切相关,其中单位面积  $HQ \geq 0.64$ ,单位面积  $CS \geq 859\text{t}$  及单位面积  $RS \geq 14\text{km}^2$  的区域主要分布于“三山”及主要河流流域的林草地分布的区域,空间格局变化较小.这表

明新疆推广实施退耕还林(草)等政策的有效性,使林地有所增加,沙漠化防治取得一定效果,但可能受人类生产生活等活动的影响,绿地休闲服务能力有所下降。

土壤保持从 2005 年到 2020 年呈增加趋势,从  $8540.97\text{t}/\text{km}^2$  增加到  $8718.59\text{t}/\text{km}^2$ ,增幅为 2.08%。单位面积  $\text{SDR} \geq 21.6 \times 10^4 \text{t}/\text{km}^2$  的区域主要分布在伊犁、阿尔泰山北坡及昆仑山西部地区。从 2015 到 2020 年,昆仑山南部、阿尔泰山北部及伊犁河谷西部土壤保持减少明显,表明新疆整体土壤侵蚀量减少,水体保持情况良好,土壤保持服务能力提高,区域生态环境向好发展。

产水量在 2005~2020 年呈增加趋势,从  $102.38\text{m}^3/\text{km}^2$  增加到  $105.73\text{m}^3/\text{km}^2$ ,增幅为 3.27%;单位面积  $\text{WY} \geq 363\text{m}^3/\text{km}^2$  的区域集中分布在天山、昆仑山及阿尔泰山等山脉附近及伊犁河等降水丰沛、蒸散量较小的地区。其空间格局变化与土壤保持比较类似。从 2010 年到 2015 年,昆仑山北部、昆仑山南部及伊犁北部单位面积产水量  $\geq 363\text{m}^3/\text{km}^2$  的区域缩减明显。2015~2020 年,“三山”附近及伊犁地区的产水量又呈增加态势。而新疆 NDVI 和降水的增加可能是导致产水量增加的重要因素。

### 3.2 新疆用水效率时空演变分析

如图 2 所示,新疆农业用水效率整体较高(0.649 以上)且存在上升趋势(上升率 0.023/a)。2005~2013 年持续上升,从 0.649 升至 1(54.08%);2013~2020 年变化相对稳定,在 0.914~1 之间波动。这与农业生产中耕地面积和人工灌溉水量的增加等有所相关,说明在一定程度上新疆水资源利用由粗放型转向集约型取得了一定效果。新疆生活工业用水效率除 2009 年外整体变化比较稳定,保持在 0.899 以上。2009 年生活工业用水效率为 0.777,可能是因为 2009 年新疆气候异常,极端天气频繁,属于枯水年。由水资源公报数据可知,2009 年洪旱交替,降水少,总体以干旱为主,各河道、水库等蓄水偏少,较 2008 年减少了 23.5%;各地区都出现了不同程度的旱情,居民日常生活也受到一定限制。新疆生态用水效率变化较大,呈波动下降趋势(下降率 0.013/a)。在 2005~2008 年生用水效率保持在 0.91 以上,但逐年降低;2009~2020 年除 2019 年外变化较稳定,效率在 0.645~0.784 波动。2019 年生态用水效率为 1,可能是因为该年 NDVI 较 2018 年提高了 46.49%,且地表及地下水资源量分别增加 8.31%和 28.01%,植被覆盖程度向好发展。

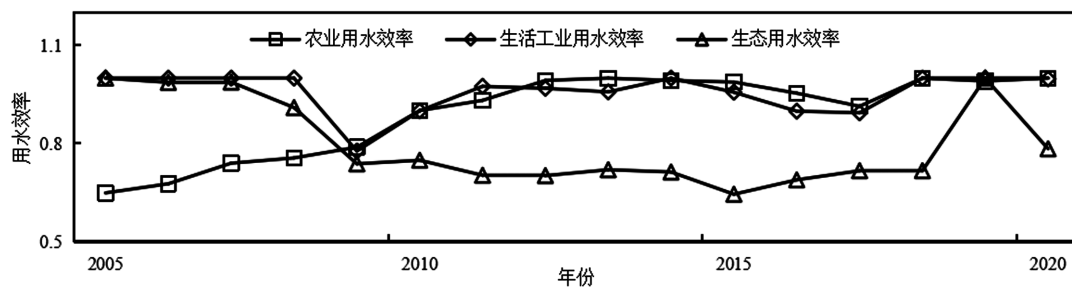


图 2 新疆农业用水、生活工业用水及生态用水效率时间变化

Fig.2 Change of agricultural water, domestic industrial water and ecological water efficiency in Xinjiang

通过新疆 14 个行政区农业用水、生活工业用水及生态用水效率的计算结果,借助 ArcGIS 软件展现新疆用水效率的空间演变(图 3)。为了便于直观展示用水效率的空间分布,本研究采用自然断点法将新疆 2005 年和 2020 年用水效率水平分为四级,分别是低水平(0~0.6)、中等水平(0.6~0.8)、较高水平(0.8~0.9)及高水平(0.9~1)。

新疆各地区农业用水效率整体提升,在 2005~2020 年都转变为高水平;说明新疆农业生产

方式有所改进,合理且有效的利用水资源进行生产活动。2005~2020 年乌鲁木齐、克拉玛依、吐鲁番、昌吉、伊犁、塔城、阿克苏地区农业用水效率分别从 0.56、0.57、0.44、0.713、0.563、0.657、0.663 增加到 1(分别增加 78.57%、75.44%、127.27%、40.25%、77.62%、52.21%、50.83%)。这些地区在研究期内农业用水效率增长较快,资源集约化程度提高,农业发展倾向于采取更先进的机械设备和管理水平,因此会推动农业用水效率的高效利用。

新疆生态用水效率呈下降趋势,在 2005~2020 年生态用水效率水平由高水平转为低水平和中等水平;从空间格局看,北疆用水效率为高水平,南疆及哈密地区生态用水效率水平较低,南疆等地区生态用水效率仍然具有一定的提升潜力.2005~2020 年哈密和喀什地区生态用水效率分别从 0.247 和 0.294 下降至 0.114(53.85%)和 0.151(48.64%),效率水平维持在低水平;和田和巴州地区生态用水效率分别从 0.983 和 1 降至 0.637 和 0.744(35.20%和 22.60%),都由高水平转为中等水平,这可能与人类活动有一定关系.哈密地下水超采已对哈密盆地绿洲带的生态环境造成巨大影响<sup>[36-37]</sup>;和田地区水资源开发利用强度远远超过地区水资源生态承载力,用水效率较低<sup>[38]</sup>;巴州和喀什地区水资源压力较高,水资源承载力呈轻度超载状态,人类活动在其中起一定作用<sup>[39]</sup>.

生活工业用水效率整体变幅较小,效率水平以高水平为主.除伊犁、阿勒泰、克拉玛依和博州地区外,其他地区的生活用水效率空间格局变化较稳定.2005~2020 年伊犁地区生活工业用水效率从 0.652 增加到 0.838(28.53%),由中等水平转为较高水平;阿勒泰地区从 0.845 增加到 0.976(15.50%),博州地区从 0.455 增加到 1(119.78%),两者由较高水平和低水平都转为高水平.这说明随着节水工具的推行等生活用水管理措施加强,生活工业用水效率相对落后的区域不断改进,水资源浪费的行为也在日渐减少.克拉玛依生活工业用水效率从 0.956 减少到 0.774(19.04%),由高水平转为中等水平,可能是因为克拉玛依地区地下水(开采量  $12890 \times 104 \text{m}^3$ )超采严重,导致水资源承载力超载<sup>[40]</sup>,水资源供需矛盾突出,节约集约利用率低,效率有所下降.

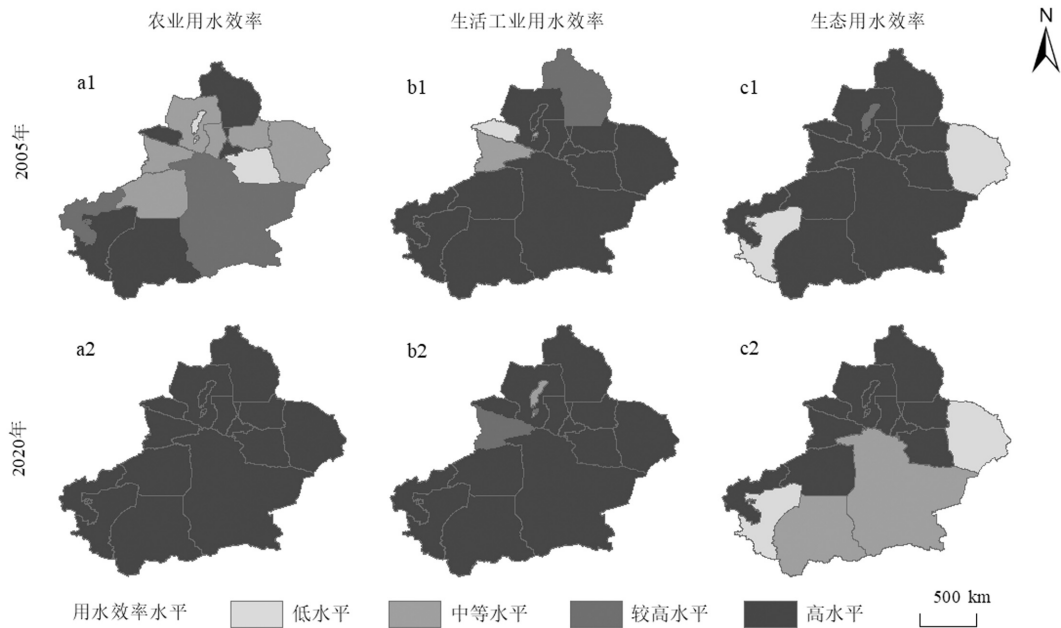


图 3 2005 年和 2020 年新疆用水效率空间分布

Fig.3 Spatial distribution of water use efficiency in Xinjiang in 2005 and 2020

### 3.3 新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调度分析

农业用水效率涉及到的用水量、农业机械总动力等对食物生产产量等具有重要影响;碳储存与人类生活活动等息息相关;生境质量、土壤保持、产水量及绿地休闲更多涉及到远离人类生产生活活动的区域,与生态用水效率密切相关.因此本文对食物

生产与农业用水效率(FD&SC)、生境质量与生态用水效率(HQ&ST)、碳储存与生活工业用水效率(CS&SH)、土壤保持与生态用水效率(SDR&ST)、绿地休闲与生态用水效率(RS&ST)及产水量与生态用水效率(RS&ST)的关系进行耦合协调分析.

#### 3.3.1 新疆生态系统服务与用水效率的耦合协调度时间变化分析

据表 2 划分标准,判定其各项生

态系统服务与用水效率的耦合协调水平(图 4).从 2005 年到 2020 年,食物生产和农业用水效率、绿地休闲和生态用水效率的耦合协调度分别以 0.057/a 和 0.013/a 的速率上升;碳储存与生活工业用水效率的耦合协调度以 0.006/a 的速率下降;生境质量、土壤保持、产水量与生态用水效率的耦合协调度分别以 0.052/a、0.024/a、0.023/a 的速率下降.

2005~2020 年,FD&SC 耦合协调度处于稳定上升趋势,从 0.1 升到 0.995,表明食物生产和农业用水效率的协调性逐渐增强,已达到高度协调水平,这与新疆各地州农业技术及机械设备的提高都有一定关系.RS&ST 耦合协调度呈波动上升趋势,从 2005 年的 0.315 上升至 2020 年的 0.671,耦合协调度水平也从轻度失调上升为基本协调.表明绿地休闲与生态用水效率的协调性以波动的方式逐渐增强,且逐渐达到基本协调的状态.

CS&SH 耦合协调度呈先降低后升高的趋势,从 2005 年的 0.995 降至 2020 年的 0.746,由高度协调转

为基本协调.其中 2005~2010 年耦合协调度减少了 89.95%,由高度协调转为高度失调;2010~2020 年耦合协调度大幅增加,由高度协调转为基本协调,整体说明碳储存与生活工业用水效率的协调性呈减弱趋势.

2005~2020 年,SDR&ST 和 WY&ST 耦合协调度呈先减少后增加的态势,与生态用水效率的变化趋势近似.2015 年 SDR&ST 和 WY&ST 耦合协调度均达到了最低值 0.1(高度失调),在 2020 年又升至 0.757 和 0.764(基本协调);2020 虽有回升,但远低于 2005 年(0.947 和 0.933),说明 SDR&ST 和 WY&ST 协调性总体呈降低趋势,在 2020 年都处于基本协调的状态.HQ&ST 耦合协调度呈逐年降低趋势.2005~2020 年从 0.995 逐年降低至 0.251(74.77%),由高度协调转为轻度失调,表明 HQ&ST 耦合协调度的协调性呈减弱趋势,这与生态用水效率的变化是一致的,与区域降水量的减少相关,2005~2020 年新疆降水量从 2281.9mm 降至 1517.2mm(33.51%).

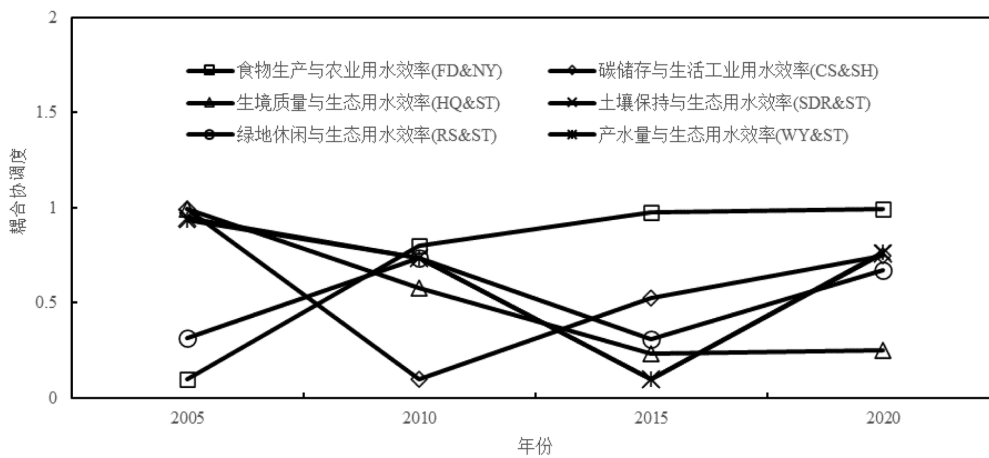


图 4 新疆各生态系统服务与用水效率耦合协调度时间变化

Fig.4 Time series changes of coupling coordination degree between ecosystem services and water use efficiency in Xinjiang

3.3.2 新疆生态系统服务与用水效率耦合协调度的空间演变分析 由图 5 可知,新疆生态系统服务与用水效率耦合协调度存在明显的空间分异规律.2020 年 FD&SC 的耦合协调度整体较高,以高度协调为主,HQ&ST 耦合协调度整体较差,以轻度失调为主,CS&SH 呈“西北低东南高”空间分布, RS&ST、SDR&ST 及 WY&ST 呈北高南低的分布.

新疆 FD&SC 的耦合协调度在 2005 年以高度失调为主(88.87%),其余 11.13%为轻度失调;2020 年都

转为高度协调(100%).说明新疆各地州食物生产与农业用水效率关联度较强,近年来新疆用水大部分都应用于农业生产方面,且受流域内气候等影响,各地州 FD&SC 的耦合协调度水平逐渐上升.新疆 HQ&ST 的耦合协调度在 2005 年以高度协调(51.82%)为主,集中在北疆和南疆西部,到 2020 年高度协调的范围减少到 4.49%,范围向西部缩减;轻度失调的范围从 2005 年的 43.84%增加到 2020 年的 73.36%,范围向西部延伸;高度失调的范围从 2005 年

的 4.35% 增加到 2020 年的 21.38%, 增加区域集中在哈密和田。

新疆 CS&SH 的耦合协调度在 2005 年以基本协调为主(34.05%), 集中在巴州和阿勒泰地区, 到 2020 年基本失调的范围增加到 44.25%, 增加范围集中在和田; 高度协调的范围从 2005 年的 31.21% 增加到 2020 年的 51.50%, 范围向南延伸; 轻度失调的范围从 2005 年的 34.74% 减少到 2020 年的 21.89%, 范围向北缩减。

新疆 RS&ST 的耦合协调度在 2005 年以高度协调(57.63%)为主, 集中在新疆中部地区, 到 2020 年减

少到 19.42%, 范围向北部缩减, 减少范围集中在巴州和吐鲁番地区, 且巴州地区转为高度失调范围; 轻度失调的范围从 2005 年的 40.96% 增加到 2020 年的 51.33%; 轻度协调变化较小。新疆 SDR&ST 和 WY&ST 的耦合协调度的分布和空间演变基本一致, 2005 年 SDR&ST 和 WY&ST 都以高度协调(82.55%)为主, 到 2020 年都减少到 45.15%, 范围向北部缩减; SDR&ST 和 WY&ST 基本协调和高度协调的范围从 2005 年(17.03% 和 82.55%) 到 2020 年的转为轻度失调和轻度协调(48.18% 和 6.68%), 轻度失调范围大幅增加, 扩张范围集中在南疆。

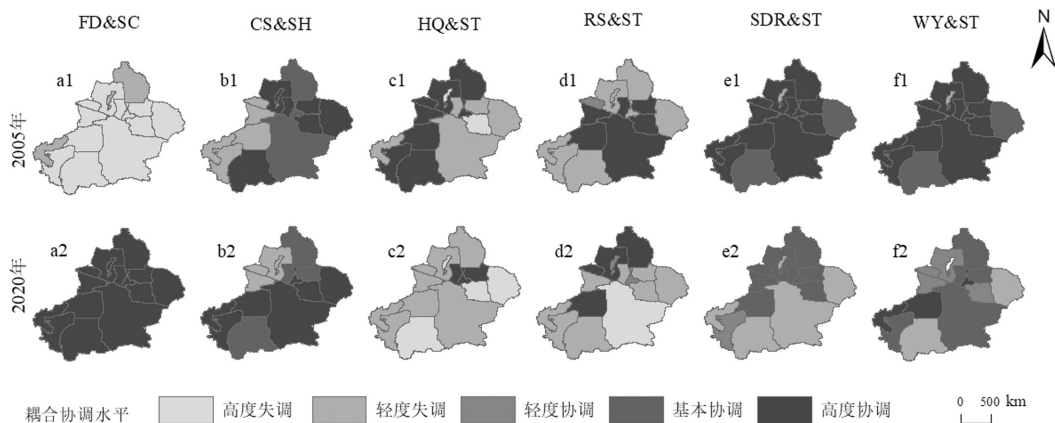


图 5 新疆各生态系统服务与用水效率耦合协调度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of coupling coordination degree between ecosystem services and water use efficiency in Xinjiang

### 3.4 讨论

新疆 FD&NY 的耦合协调度处于稳定上升趋势, 与农业用水效率的上升密切相关, 而农业用水效率上升与褚家琦等用 SBM 及 Malmquist 模型测算新疆农业水资源绿色效率<sup>[41]</sup>的结论一致。FD&SC 耦合协调度的提升可能是由于农业技术的进步导致的,

滴灌、喷灌等节水灌溉技术作用于棉花等作物<sup>[35]</sup>, 大幅提高了全疆农业水资源利用效率, 播种面积(34.95%)和农业机械动力(57.54%)的增加也对食物生产产量有正向作用。并且国务院在 2012 年印发《国家农业节水纲要(2012~2020 年)》, 新疆积极响应政策, 大力发展农业节水, 促使新疆农业水资源利用效率不断提高。新疆 CS&SH 的耦合协调度呈先降低后升高的趋势, 从高度协调降至高度失调, 又升至基本协调, 这与新疆生活工业用水效率的变化趋势基本一致。加之滞后性的影响<sup>[42]</sup>, 生活工业用水效率在 2009 年达到最低值(0.777), 而 CS&SH 的耦合协

调度在 2010 年达到最低值(0.1)。

新疆 RS&ST 的耦合协调度呈上升趋势, 可能是因为绿地休闲的增加(5.8%), 而生境质量、土壤保持、产水量与生态用水效率的耦合协调度呈下降趋势, 这与新疆生态用水效率的降低有一定关系。研究期间生态用水效率有恶化趋势, 尤其到 2020 年处于低水平的哈密和喀什地区, 地下水位埋深的林草地的实际蒸散发量远大于降水量, 植被的生长只能依靠有限且少量的降水, 且 2005~2020 年哈密和喀什地区年均降水量和地表水量减幅明显(降水量 67.47% 和 53.9%, 地表水量 18.04% 和 11.04%)。除自然因素对生态用水效率的影响外, 人类活动在一定程度上也影响生态用水效率的变化; 哈密和喀什地区在 2005~2020 年总人口和地区生产总值大幅增加(分别增加 18.36% 和 688.25%), 水资源需求缺口较大, 其中哈密地区地下水利用量达 63.6%, 地下水严重超采对哈密盆地绿洲带的生态环境造成巨大影

响<sup>[36]</sup>;据倪明霞等<sup>[39]</sup>的研究知喀什需水量不断增加(年均增加量 $(2.56 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{年})$ ),且多年处于高水压力状况下(水压力指数  $0.63 \pm 1.08$ )并呈不断增加的趋势(年均增加量 0.02)。

新疆 HQ&ST 和 RS&ST 高度失调的区域增加明显,尤其 HQ&ST 的吐鲁番、和田和哈密地区以及 RS&ST 的巴州地区都由高度协调和轻度失调转为高度失调,恶化情况比较严重,可能是由气候因素与人类活动共同造成的。盐渍和风蚀使土壤生产力下降<sup>[35]</sup>,土地荒漠化加剧,这些地区人口不断增加(18.42%),对水资源需求增大,但地区降水量不断减少(39.62%),通过降水补给地下水的可行性较小,有限的地表水资源造成地下水超量开采的问题,加剧土地荒漠化和土壤次生盐渍化,生态环境逐渐恶劣<sup>[39]</sup>。这些地区要警惕其耦合协调关系今后可能进一步恶化的风险,需采取措施以改善生态系统服务与用水效率之间的互馈关系。

新疆产水量较水资源总量来说偏低,这可能与研究区冰川积雪融水等因素有关,与郑续等<sup>[43]</sup>研究结果类似。InVEST 模型中的产水量模块以水量平衡为基础,模型运算以降水量为主,而新疆属于干旱区,降水少,蒸散大,日常生产生活用水均来源于高山冰雪融水,且新疆境内除克拉玛依地区无冰川分布外,其余地州均有冰川分布。加之全球气温变暖的背景,新疆各地区冰川加速消融;据相关研究显示,阿克苏河流域冰川面积减少 25.88%<sup>[44]</sup>,玛纳斯河流域冰川平均减薄 11m<sup>[45]</sup>,萨吾尔山冰川总面积减少 12.3%<sup>[46]</sup>,新疆“三山”冰川(阿尔泰山、天山及昆仑山)均呈现不同程度的冰川面积退缩现象,冰川消融面积分别达 0.75%/a、0.36%/a 和 0.34%/a<sup>[47]</sup>,由此使冰川融水径流量快速增加,而冰川面积分布较广的阿克苏河、渭干河、叶尔羌河、和田河及克里雅河等冰川融水径流分别占总径流量的 53.1%、30.8%、64.3%、59.5%及 69.0%<sup>[48]</sup>。冰川融水极大的增加了各流域来水量,导致模型计算的产水量相对偏少;而江西、无锡等地区由于没有冰雪覆盖,降水量丰富,蒸散小<sup>[48-50]</sup>,因此产水量与水资源相差较小。这些不足有待在今后的研究中改善,通过不断改进模型以适应干旱区以及冰雪覆盖等地区。

针对以上问题和新疆实际情况,结合《新疆维吾尔自治区国土空间规划》,提出以下建议:(1)筑牢绿

色生态屏障。生态用水效率低水平区集中分布在哈密和喀什地区,加强对冰川、重要水源涵养区以及湖泊湿地生态恢复,保障水资源生态循环。(2)统筹自然资源保护利用。HQ&ST 和 RS&ST 耦合协调度中高度失调范围增加,恶化情况比较严重,要实行严格水资源管理制度,加强经济社会用水量控制,适量开采地下水,强化对地下水资源的利用管控。(3)立足区域协调发展。SDR&ST、RS&ST 及 WY&ST 耦合协调度的结果具有明显的南北差异,因此在保护生态系统可持续的同时要坚持以北疆与南疆为重点的深度融合发展战略,推动基础设施互联互通、缩小南北疆差异,形成更加融合平衡的发展格局。(4)合理配置水资源。充分发挥政府和市场配置的双重作用,综合考虑满足人们生活、保证粮食安全、维系生态系统等基本用水需求。新疆各地州用水效率不一,农业用水方面要依据各灌区的配水定额合理分配水源;生活工业方面要依据实际居住人口及相关工业企业等按节水型社会建设进行用水控制;生态环境方面用水要进行断面水量控制。将水资源在经济社会系统和生态环境系统之间合理调配,使水资源配置格局与经济社会发展及生态环境保护相协调。

## 4 结论

4.1 2005~2020 年新疆食物生产呈明显增加趋势,有由绿洲区域向四周扩展的趋势,生境质量、碳储存、土壤保持、产水量和绿地休闲变幅较小;新疆各项生态系统服务具有明显的空间分异特征,土壤保持和产水量都在 2010~2015 年大幅缩减。

4.2 2005~2020 年,新疆各地区农业用水效率整体提升;新疆生态用水效率变化较大,呈波动下降趋势(下降率 0.013/a),且有较为明显的区域差异,北疆为高水平,南疆及哈密地区是低水平和中等水平;生活用水效率整体较高但变幅较小。

4.3 2005~2020 年各项生态系统服务与用水效率的耦合协调度变化明显。其中,食物生产和农业用水效率的耦合协调度以 0.057/a 的速率上升,到 2020 年达到高度协调(0.995);但生境质量与生态用水效率的耦合协调度以 0.052/a 的速率降低,到 2020 年达到轻度失调(0.251)。这表明新疆在农业生产方面水资源的配置和利用效率已经达到了高度协调的状态,但对生态环境用水的关注有待提升。

## 参考文献:

- [1] 樊慧丽,付文阁.水足迹视角下我国农业水土资源匹配及农业经济增长——以长江经济带为例 [J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(10):193-203.  
Fan H L, Fu W G. Analysis of water and soil resources matching and agricultural economic growth in china from the perspective of water footprint—taking the yangtze river economic belt as an example [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020,41(10):193-203.
- [2] 张祥永,曹阳,吴文飞.我国省域水资源可持续性与生态系统服务耦合协调关系 [J]. 人民黄河, 2022,44(12):73-78,100.  
Zhang X Y, Wu W F. Study on coupling coordination relationship between water resources sustainability and ecosystem services in china's provinces [J]. Yellow River, 2020,41(10):193-203.
- [3] 张文睿,孙栋元,王亦可,等.河西走廊水资源-生态环境-社会经济系统耦合关系及时空分异 [J]. 干旱区研究, 2024,41(9):1527-1537.  
Zhang W R, Sun D Y, Wang Y K, et al. Coupling relationship and spatio-temporal differentiation of the resources-ecological environment-social economic system in the Hexi Corridor [J]. Arid Zone Research, 2024,41(9):1527-1537.
- [4] Zhang Y, Yan Z, Song J, et al. Analysis for spatial-temporal matching pattern between water and land resources in Central Asia [J]. Hydrology Research, 2020,51(5):994-1008.
- [5] 张雯,刘倩倩,王慧,等.基于水足迹的山东省农业水土资源匹配特征及短缺压力分析 [J]. 生态学报, 2023,43(12):4943-4953.  
Zhang W, Liu Q Q, Wang H, Chen B. Analysis of matching characteristic: And scarcity of agricultural water and land resources in Shandong Province based on water footprint. Acta Ecologica Sinica [J]. 2023.43(12):4943-4953.
- [6] 李桂娥,李杰,赵冲,等.生态系统服务时空演化的非线性影响因素——以钱塘江流域为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(12):5941-5952.  
Li G E, Li J, Zhao C, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem services and their nonlinear influencing factors—A case study in the Qiantang River Basin [J]. China Environmental Science, 2022,42(12): 5941-5952.
- [7] 黄梓鑫,李晶,楚晶晶,等.中国农业水土资源时空匹配特征及影响因素研究 [J]. 人民长江, 2024,55(2):116-124.  
Huang Z X, Li J, Chu J J, et al. Spatiotemporal matching characteristics and influencing factors of agricultural water and soil resources in China [J]. Yangtze River, 2024,55(2):116-124.
- [8] 张超正,孙小宇,张寒,等.基于土地利用变化的长江中游地区生态系统服务供需平衡研究 [J]. 水土保持学报, 2024,38(3):227-238.  
Zhang C Z, Sun X Y, Zhang H, et al. Supply-demand balance of ecosystem services in the middle reaches of the Yangtze river based on land use change [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3):227-238.
- [9] 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.
- [10] Geng Q, Liu H, He X, et al. Integrating Blue and Green Water to Identify Matching Characteristics of Agricultural Water and Land Resources in China. Water, 2022,14:685.
- [11] 权小丫,苏维词,勾容,等.FAST 宁静区生态系统服务时空分异特征及权衡/协同关系分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(9):5145-5159.  
Quan X Y, Su W C, Gou R, et al. Analysis on spatio-temporal distribution characteristics and tradeoff-synergy of ecosystem services in the FAST Tranquility Zone [J]. China Environmental Science, 2024, 44(9):5145-5159.
- [12] Costanza R, Arge, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630): 253-260.
- [13] Jia Y, Tang X, Liu W. Spatial-temporal evolution and correlation analysis of ecosystem service value and landscape ecological risk in wuhu City [J]. Sustainability, 2020,12,2803.
- [14] Wang Y, Shataer R, Zhang Z, et al. Evaluation and analysis of Influencing Factors of Ecosystem Service Value Change in Xinjiang under Different Land Use Types. Water, 2022,14,1424.
- [15] 赵晓阿,苏军德,王建,等.甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(10):4926-4941.  
Zhao X J, Su J D, Wang J, et al. A study on the relationship between supply-demand relationship of ecosystem services and impact factors in Gansu Province [J]. China Environmental Science, 2021,41(10): 4926-4941.
- [16] Tian P, Li J, Cao L, et al. Assessing matching characteristics and spatial differences between supply and demand of ecosystem services: A case study in Hangzhou, China [J]. Land, 2021,10:82.
- [17] Niu T, Yu J, Yue D, et al. The Temporal and Spatial Evolution of Ecosystem Service Synergy/Trade-Offs Based on Ecological Units. Forests, 2021,12,992.
- [18] Tito R, Cruz R, Nina A, et al. Evapotranspiration, carbon dynamics and water use efficiency in a drip-irrigated olive orchard in arid coastal western South America [J]. Agricultural Water Management, 2024,297:108813-.
- [19] 苗峻瑜,张春英.黄河流域工业水资源效率与经济协调发展特征及时空演变 [J]. 环境科学研究, 2024,37(1):114-121.  
Miao J Y, Zhang C Y. Characteristics and spatial-temporal evolution of industrial water resources efficiency and coordinated economic development in the Yellow River Basin [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(1):114-121.
- [20] 张蕊,张玲玲,郝伦.中国生活用水效率时空异质性分析 [J]. 生态经济, 2023,39(11):143-147.  
Zhang R, Zhang L L, Hao L. Analysis on Spatio-temporal heterogeneity analysis of domestic water use-efficiency in China [J]. Ecological Economy, 2023,39(11):143-147.
- [21] Geng Q, Ren Q, Nolan R H, et al. Assessing China's agricultural water use efficiency in a green-blue water perspective: A study based on data envelopment analysis [J]. Ecological Indicators, 2019,96:329-335.
- [22] Hai X, Li W F, Han L J. Study on the domestic water use efficiency between urban and rural areas of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, China [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018,29:27-33.
- [23] 马慧君,杨肖丽,高甜.我国中部地区水资源利用效率评价及归因分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2662-2672.  
Ma H J, Yang X L, Gao T. Evaluation and attribution of water resource utilization efficiency in the central China [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2662-2672.
- [24] 姜德娟,李丽娟.2011~2020 年山东省水资源利用效率及动态分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2023,34(3):10-18.  
Jiang D J, Li L J. Analysis of water use efficiency and its dynamics in Shandong Province during 2011~2020 [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2023,34(3):10-18.
- [25] 杨雅雪,杨井,许玉凤,等.基于 LMDI 方法的新疆生产用水变化分析 [J]. 干旱区地理, 2016,39(1):67-76.  
Yang Y X, Yang J, Xu Y F, et al. Industrial water use change in Xinjiang based on LMDI method [J]. Arid Land Geography, 2016,39(1):67-76.
- [26] 庞彩艳,文琦,丁金梅,等.黄河上游流域生态系统服务变化及其权衡协同关系 [J]. 生态学报, 2024,44(12):5003-5013.  
Pang C W, Wen Q, Ding J M, et al. Ecosystem services and their trade-offs and synergies in the reaches of the Yellow River basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024,44(12):5003-5013.
- [27] 许静,刘慧.甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测 [J]. 中国环境科学, 2024,44(4):1863-1874.

- Xu J, Liu H. Assessment and prediction of ecosystem services trade-offs and synergies relationships in Gansu Province [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(4):1863-1874.
- [28] 张爽,高启晨,张戎,等.基于 PLUS-InVEST 模型碳储量时空演变及驱动因素分析—以纳帕河流域为例 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(9):5192-5201.  
Zhang S, Gao Q C, Zhang R, et al. Evaluating the changes and driving factors of carbon storage using the PLUS-InVEST Model: A case study of Napa Sea Basin [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(9):5192-5201.
- [29] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains [M]. *US Department of Agriculture Handbook*, No292, 1965.
- [30] 陈武迪,刘晓煌,李洪宇,等.基于 InVEST 模型的新疆 1990~2018 年产水服务时空变化及驱动因素分析 [J]. *现代地质*, 2024,38(3):636-647.  
Chen W D, Liu X H, Li H Y, et al. Spatiotemporal changes and driving factors of water yield service based on InVEST model in xinjiang from 1990 to 2018 [J]. *Geoscience*, 2024,38(3):636-647.
- [31] Li K, Hou Y, Andersen P S, et al. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: A case study of the Jinan metropolitan area in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,305:114371.
- [32] 董洁芳,李德山,张亮林.中国农业用水效率区域差异与空间交互机理研究 [J]. *水生态学杂志*, 2023,44(3):26-34.  
Dong J F, Li D F, Zhang L L. Regional disparities and spatial interactions of agricultural water use efficiency in China [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023,44(3):26-34.
- [33] Xing L, Xue M, Hu M. Dynamic simulation and assessment of the coupling coordination degree of the economy-resource-environment system: Case of Wuhan City in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019,230:474-487.
- [34] 张宁,杨肖,陈彤.中国西部地区水-能源-粮食系统耦合协调度的时空特征 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(9):4444-4456.  
Zhang N, Yang X, Chen T. Research on the coupling coordination of water-energy-food system and its temporal and spatial characteristics [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(9):4444-4456.
- [35] 王洁萍,刘国勇,朱美玲.新疆农业水资源利用效率测度及其影响因素分析 [J]. *节水灌溉*, 2016,(1):63-67.  
Wang J P, Liu G Y, Zhu M L. Measurement and influential factors of irrigation water use efficiency in xinjiang [J]. *Water Saving Irrigation*, 2016,(1):63-67.
- [36] 阿哈提·克力木,曾侯杰,刘德地.干旱区水资源供需平衡分析方法研究——以新疆哈密市伊州区为例 [J]. *中国农村水利水电*, 2023,(6): 21-26,35.  
Ahati K L M, Zeng Y J, Liu D D. An analysis of the balance between water demand and supply in arid areas: A case study of the yizhoudistrict of Hami City of Xinjiang uygur automons region [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023,(1):21-26,35.
- [37] Mirdashtvan M, Najafinejad A, Malekian A, et al. Sustainable water supply and demand management in semi-arid regions: Optimizing water resources allocation based on RCPs scenarios [J]. *Water Resources Management*, 2021,35:5307-5324.
- [38] 张丽丽,邓晓雅,龙爱华,等.基于农业足迹的水资源安全时空变化分析——以新疆和田地区为例 [J]. *干旱区研究*, 2022,39(2):436-447.  
Zhang L L, Deng X Y, Long A H, et al. Spatial-temporal assessment of water resource security based on the agricultural water footprint: A case in the Hotan Prefecture of Xinjiang [J]. *Arid Zone Research*, 2022,39 (2):436-447.
- [39] 倪明霞,普拉提·莫合塔尔,孙婷宇,等.基于气候变化与人类活动双重作用的南疆水资源供需关系分析 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2024,32(2):331-348.  
Ni M X, Plt M, Sun T Y, et al. Analysis on the supply-demand relationship of water resources based on the dual role of climate change and human activities in southern xinjiang [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2024,32(2):331-348.
- [40] 杨明杰,杨广,高普章,等.基于 SD 模型的干旱区城市水资源供需分析——以新疆克拉玛依市为例 [J]. *人民长江*, 2018,49(5):45-51,73.  
Yang M J, Yang G, Gao P Z, et al. Analysis of the supply and demand of water resources for city in arid region based on SD model: a case of Karamay, Xinjiang [J]. *Yangtze River*, 2018,49(5):45-51,73.
- [41] 褚家琦,蒋志辉.新疆农业水资源绿色效率时空演变及影响因素研究 [J]. *干旱区地理*, 2024,47(7):1231-1241.  
Zhu J Q, Jiang Z H. Spatiotemporal evolution and influencing factors of green efficiency of agricultural water resources in Xinjiang [J]. *Arid Land Geography*, 2024,47(7):1231-1241.
- [42] Aubert A H, Gascuel-Oudou C, Merot P. Annual hysteresis of water quality: A method to analyse the effect of intra-and inter-annual climatic conditions [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,478:29-39.
- [43] 郑续,魏乐民,郭建军,等.基于地理探测器的干旱区内陆河流域产水量驱动力分析——以疏勒河流域为例 [J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6):1477-1485.  
Zheng X, Wei L M, Guo J J, et al. Driving force analysis of water yield in inland river basins of arid areas based on geo-detectors: A case of the Shule River [J]. *Arid Land Geography*, 2020,43(6):1477-1485.
- [44] Zhang Q, Chen Y, Li Z, et al. Glacier changes from 1975 to 2016 in the Aksu River Basin, Central Tianshan Mountains [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019,29(6):984-1000.
- [45] 赵贵宁,张正勇,刘琳,等.基于多源遥感数据的玛纳斯河流域冰川物质平衡变化 [J]. *地理学报*, 2020,75(1):98-112.  
Zhao G N, Zhang Z Y, Liu L, et al. Changes of glacier mass balance in Manas river basin based on multi-source remote sensing data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(1):98-112.
- [46] 王炎强,赵军,李忠勤,等.1977~2017 年萨吾尔山冰川变化及其对气候变化的响应 [J]. *自然资源学报*, 2019,34(4):802-814.  
Wang Y Q, Zhao J, Li Z Q, et al. Glacier changes in the Sawuer Mountain during 1977~2017 and their response to climate change [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019,34(4):802-814.
- [47] 朱弯弯,上官冬辉,郭万钦,等.天山中部典型流域冰川变化及对气候的响应 [J]. *冰川冻土*, 2014,36(6):1376-1384.  
Zhu W W, Shanguan D H, Guo W Q, et al. Glaciers in some representative basins in the middle of the Tianshan Mountains: change and response to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014,36(6):1376-1384.
- [48] 倪明霞,段峥嵘,夏建新.气候变化下南疆主要河流径流变化及水资源风险 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022,30(4):834-845.  
Ni M X, Duan Z R, Xia J X. Runoff Variation and Water Resources Risks in the Major Rivers of Southern Xinjiang due to Climate Change [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022,30(4):834-845.
- [49] Duan P, Xu Y, Guo X, et al. Study on Multi-Scale Characteristics and Influencing Factors of Trade-Offs and Synergies between Ecosystem Services in Jiangxi Province [J]. *Forests*, 2023,14(3):598.
- [50] 包逸涛,吴朝明,朱骊,等.耦合 InVEST 与 FLUS 模型的无锡市产水量时空变化与预测 [EB/OL]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 1-9 [2024-12-21]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/32.1161.S.20240819.1338.002.html>.  
Bao Y T, Wu C M, Zhu L, et al. Temporal and spatial variation and prediction of water yield in Wuxi City by coupling InVEST and FLUS models [EB/OL]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 1-9 [2024-12-21]. <https://kns-cnki-net.webvpn.xjau.edu.cn/kcms/detail/32.1161.S.20240819.1338.002.html>.

作者简介: 滕 伦(2000-),女,内蒙古宁城人,新疆农业大学硕士研究生,主要从事生态系统服务研究.2357376224@qq.com.