

中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务 供需风险评价及分区

钟孟君, 蒋贵国, 陆忆文, 程珍旒, 董威威

(四川师范大学 地理与资源科学学院, 西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 四川 成都 610000)

摘要: [目的] 研究中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需状况, 科学识别产水服务供需风险区并制定合理的风险防范措施, 为中巴经济走廊实现绿色发展提供重要依据。[方法] 以中巴经济走廊巴基斯坦段为研究区, 基于 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 年遥感影像数据和社会经济数据, 采用 InVEST 模型和以人定需法估算产水服务供给量与需求量, 结合供需指数及趋势评估产水服务供需风险并进行风险划区。[结果] ① 2000—2020 年总产水量呈先增后减的趋势, 产水服务供给能力中部高南北低; 20 a 来产水需求总量增幅达 58.44%。② 2000—2020 产水服务供需指数变化趋势较弱, 整体稳定。严重赤字区主要分布于印度河平原与俾路支省西部, 高度盈余区集中分布于吉尔吉特—巴尔蒂斯坦与俾路支省东部。③ 产水服务供需高风险区面积占 22.69%, 其供需匹配类型以低供给低需求为主 (47.57%)。[结论] 动态评估中巴经济走廊巴基斯坦段产水量, 制定区域水资源保护措施, 构建生态补偿机制, 使产水服务供需达到平衡, 有助于促进中巴经济走廊的绿色发展。

关键词: 产水服务; 供给与需求; 供需风险; InVEST 模型; 中巴经济走廊

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0225-09

中图分类号: X171.1, K903

文献参数: 钟孟君, 蒋贵国, 陆忆文, 等. 中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需风险评价及分区[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 225-233. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.03.027; Zhong Mengjun, Jiang Guiguo, Lu Yiwen, et al. Risk assessment and zoning on supply and demand of water yield services in Pakistan Section of China-Pakistan economic corridor [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 225-233.

Risk Assessment and Zoning on Supply and Demand of Water Yield Services in Pakistan Section of China-Pakistan Economic Corridor

Zhong Mengjun, Jiang Guiguo, Lu Yiwen, Cheng Zhenni, Dong Weiwei

(Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education,
School of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: [Objective] The supply and demand of water yield services in the Pakistan section of China-Pakistan economic corridor were analyzed, the risk areas for water yield services were identified scientifically, and the risk prevention measures were formulated reasonably in order to provide an important basis for the green development of the China-Pakistan economic corridor. [Methods] Based on remote sensing image data and socio-economic data for 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020 from the research area (the Pakistan section of the China-Pakistan economic corridor), the InVEST model and the human-demand method were used to estimate the supply and demand of water yield services. The supply and demand index and trends were used to assess the supply and demand risks of water yield services and to delineate risk areas. [Results] ① Total water yield from 2000 to 2020 initially increased and then decreased. The water yield service supply capacity was high in the center of the study area and low in the north and south. The total demand for water yield increased by 58.44% over the past 20 years. ② From 2000 to 2020, the supply and demand index of water

收稿日期: 2022-07-06

修回日期: 2022-10-02

资助项目: 教育部规划基金项目“基于充分均衡发展视角下的彝汉交错深度贫困区生态稳定脱贫机制研究” (18XJA630005)

第一作者: 钟孟君 (1997—), 女 (汉族), 四川省通江县人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态评价。Email: 1376934545@qq.com。

通信作者: 蒋贵国 (1971—), 男 (汉族), 江苏省靖江县人, 博士, 教授, 主要从事土地评价等方面研究。Email: dlxyjgg@sicnu.edu.cn。

yield services had a weak trend and was generally stable. Severe deficit areas were mainly located in the Indus Plain and Western Balochistan, and high surplus areas were concentrated in Gilgit-Baltistan and Eastern Balochistan. ③ The high-risk areas accounted for 22.69% of the national area, and the type of supply and demand match was mainly low supply and low demand (47.57%). [Conclusion] Dynamically assessing water yield in the China-Pakistan economic corridor (Pakistan section), formulating regional water resource protection measures, and constructing an ecological compensation mechanism to balance the supply and demand of water yield services are conducive to promoting the green development of the China-Pakistan economic corridor.

Keywords: water yield service; supply and demand; supply-demand risk; InVEST model; China-Pakistan economic corridor

产水服务作为生态系统服务的一项重要分支,对维持生态系统的稳定与和谐,促进区域经济的可持续发展具有极其重要的作用^[1]。近年来随着全球生态环境的变化与人类活动的加剧,产水服务供需矛盾日益凸显。IPBES 发布的《全球生物多样性和生态系统服务评估报告》指出,包括产水服务在内的绝大多数生态系统服务功能迅速下降^[2]。在此背景下,研究区域生态系统产水服务供需状况、识别产水服务供需风险区并制定合理的风险防范措施对促进区域可持续发展显得尤为重要。

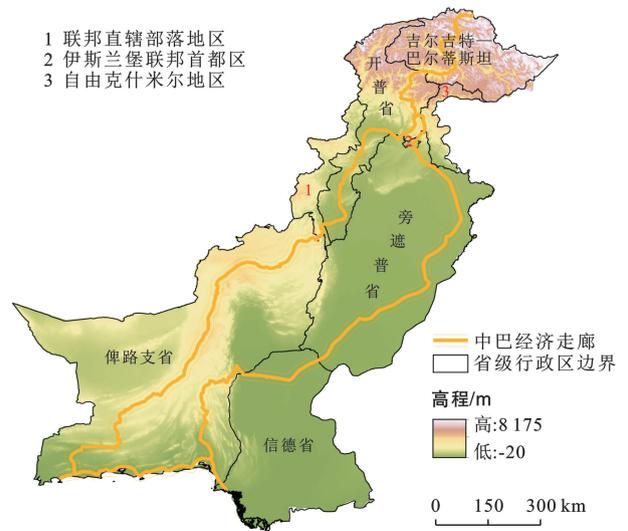
目前国内外学者大多采用模型模拟法研究区域产水量,评估产水服务供需风险。模型模拟法包括 ARIES 模型和 InVEST 模型等,其中 InVEST 模型操作简便在国内外应用广泛。包玉斌等^[3]以黄土高原为研究区,采用 InVEST 模型定量评估水源涵养功能,开展水源涵养的空间分区研究。吕乐婷等^[4]利用 InVEST 模型的产水量模块对大连市产水量的时空分布特征及其成因进行研究。Mansoor D.K,Leh 等^[5]利用 InVEST 模型对西非加纳和科特迪瓦河流域产水量进行评估,取得良好效果。产水量评估方法的不断发展为产水服务生态风险的评估奠定了良好的基础^[6]。现阶段众多学者对产水服务生态风险评估的研究更多考虑到了供给与需求间的耦合关系^[7-8]。Baro F 等^[9],Boithias L 等^[10]以欧洲的 5 个城市、西班牙 Ebro 盆地为研究区,将流域产水服务供需结合共同评估在空间上的匹配度来确定区域产水服务生态风险。王壮壮等^[11],Li Delong 等^[12]分别对陕西省、京津冀地区产水服务进行研究,揭示产水服务供需风险时空变化格局、量化淡水生态系统服务流量对下游地区的影响。

2013 年 5 月,中国国家领导人访问巴基斯坦时提出中巴经济走廊远景规划,得到国际社会的广泛关注^[13]。由于中巴经济走廊地缘价值的重要性,该走廊也成为“一带一路”倡议的样板工程和旗舰项目^[14]。然而一系列的生态环境问题制约着中巴经济

走廊项目的发展,而且项目的建设也会对巴基斯坦脆弱的生态环境产生一定的负面影响^[15]。Aziz 等^[16]研究发现巴基斯坦产水服务价值由于开放水域的减少等原因在 2015 年和未来土地使用方案中急剧下降。为秉持“绿色发展”理念,在建设中巴经济走廊过程中就需充分考虑生态风险的问题。鉴于此,本研究选取 2000,2005,2010,2015,2020 年 5 个时间节点,采用 InVEST 模型和以人定需法研究巴基斯坦产水服务供需状况,识别产水服务供需风险区并提出风险防范措施为优化区域生态系统管理提供科学依据。

1 研究区概况

中巴经济走廊覆盖中国新疆维吾尔自治区和巴基斯坦全境,北至新疆的喀什,南至巴基斯坦的西南港口城市瓜达尔港^[17]。结合中巴经济走廊项目的实际分布以及已有研究,选取巴基斯坦全境(包括巴控自由克什米尔地区)作为研究区(图 1)。



注:本图地理底图源于全球行政区划数据库,并基于自然资源部标准地图服务系统 GS(2020)4393 号标准地图校准制作。下同。

图 1 中巴经济走廊巴基斯坦段地形图

Fig.1 Topographic map of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section)

巴基斯坦地处南亚次大陆西北部(23°—37°N, 60°—80°E),总面积约 $8.80 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。巴基斯坦位于亚热带,气候干旱、降水少,植被稀疏,森林面积仅占巴基斯坦总面积的 4.80%。巴基斯坦设旁遮普省、开伯尔—普什图省(简称开普省)、俾路支省、信德省、伊斯兰堡首都特区和联邦直辖部落区等 6 个省级行政区,此外还包括吉尔吉特—巴尔蒂斯坦、自由克什

米尔地区,各省区的自然环境和社会经济发展具有较大的差异。缺水、土壤侵蚀、森林的过度砍伐等是巴基斯坦目前面临的主要生态问题。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

本研究所需数据来源如表 1 所示。

表 1 数据来源及预处理
Table 1 Data source and preprocessing

数据名称	来源	预处理
降水数据	NASA 的 TRMM(TMPA/3B43)数据集	结合 NDVI 数据降尺度为 1 km 分辨率
NDVI 数据	Terra 卫星 MODIS 传感器的植被指数数据 MOD13A3 数据集	通过 MRT 软件处理成 1 km 分辨率
参考作物潜在蒸发量数据	NASA 的 MOD16A3 GF 数据集	通过 MRT 软件和 ArcGIS 软件处理成 1 km 分辨率
植物有效水分含量	世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD)	由 SPAW 的 Soil Water Characteristics 模块计算
土壤数据	世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database,HWSD)	
土地利用数据	NASA 的数据集 MCD12Q1	
人口密度数据	世界人口网(www.worldpop.org/)	通过 ArcGIS 软件处理成 1 km 分辨率
人均需水量数据	联合国粮食及农业组织(http://www.fao.org/home/en)	
DEM 数据	SRTM 数据集	

2.2 研究方法

2.2.1 产水服务供给量化方法 InVEST 模型产水模块以水量平衡原理为基础,产水量为降水量减去蒸散发量^[18],公式如下:

$$Y(x) = \left[1 - \frac{\text{AET}(x)}{P(x)} \right] \cdot P(x) \quad (1)$$

$$\frac{\text{AET}(x)}{P(x)} = 1 + \frac{\text{PET}(x)}{P(x)} - \left\{ 1 + \left[\frac{\text{PET}(x)}{P(x)} \right]^\omega \right\}^{\frac{1}{\omega}} \quad (2)$$

$$\omega(x) = Z \frac{\text{AWC}(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (3)$$

$$\text{PET}(x) = kc(lx) \cdot \text{ET}_0(x) \quad (4)$$

式中:AET(x)为栅格的年度实际蒸散发量;P(x)为栅格的年降水量;PET(x)为潜在蒸散发量; $\omega(x)$ 是表征自然气候土壤特性的非物理参数。AWC(x)为植物可用水分的体积(毫米)。ET₀(x)为该位置生长的参考植被(例如草或苜蓿)的蒸散量。kc(lx)取决于该像素栅格上的土地覆被营养特征。Z 是一个经验常数,与 N(每年降水事件的数量)呈正相关。

2.2.2 产水服务需求量化方法 每个像元的需水量是由人口密度与人均水需求量的乘积求得,人均水需求量包括工业用水量、农业用水量和生活用水量。人均水需求量一般由人均用水量表示,但由于 2000 年后巴基斯坦面临着非常严重的缺水问题,人均用水量

不可替代为人均需水量,因此,本研究将 2005,2010,2015,2020 年人均需水量统一为 2000 年的人均需水量($1\ 223.10 \text{ m}^3/\text{人}$)。

$$\text{ES}_{\text{demand},i} = \rho_i \times D_i \quad (5)$$

式中:ES_{demand,i}为像元栅格上的水资源需求量; ρ_i 为像元栅格的人口密度(人/km²);D_i为人均水资源需求量。

2.2.3 产水服务供需指数及趋势 本研究采用供需指数 supply-demand index(SDI)^[19-20]来刻画生态系统服务供给与需求在空间上的矛盾和差异。SDI 的取值范围为-1 至 1,当 SDI>0 时,供给量大于需求量,处于盈余状态;当 SDI=0 时,供给量等于需求量,处于供需平衡状态;当 SDI<0 时,供给量小于需求量,处于赤字状态,且其数值越小,供需矛盾越突出。SDI 的计算公式如下:

$$\text{SDI}_i = \frac{\text{ES}_{\text{supply},i} - \text{ES}_{\text{demand},i}}{\text{ES}_{\text{supply},i} + \text{ES}_{\text{demand},i}} \quad (6)$$

式中:SDI_i为第 i 个像元上的产水服务供需指数;ES_{supply,i}为第 i 个像元上的产水服务供给量;ES_{demand,i}为第 i 个像元上的产水服务需求量。

根据相关文献^[21-23],将供需指数的值域分为 6 个等级,不同等级的供需指数代表不同的供需状况,具体分级标准如表 2 所示。

表 2 产水服务供需状况分级标准

Table 2 Supply and demand grading standard of water supply-demand index

分级标准	严重赤字	中度赤字	轻度赤字	轻度盈余	中度盈余	高度盈余
SDI 数值范围	-1~-0.6	-0.6~-0.3	-0.3~0	0~0.3	0.3~0.6	0.6~1

供需指数在时间上有不同的变化趋势,采用最小二乘法拟合供需指数的变化趋势表示,斜率 k 表示空间上不同区域的供需指数变化趋势。当 $k > 0$, 供需指数呈上升趋势,供需矛盾缓解;当 $k < 0$, 供需指数呈下

降趋势,供需矛盾加剧。显著性检验置信度为 95%。

2.2.4 产水服务供需风险 结合巴基斯坦 2020 年产水服务供需状况及供需指数趋势这 2 项指标,将产水服务供需风险划分为 7 个等级^[11](表 3)。

表 3 产水服务供需风险等级划分标准

Table 3 Supply and demand risk classification standards of water supply-demand index

风险等级	高度危险		中度危险		危险		供给不足		脆弱		安全		富足
	严重赤字	严重赤字	中度赤字	中度赤字	轻度赤字	轻度赤字	轻度盈余	轻度盈余	轻度盈余	中度盈余	中度盈余	高度盈余	高度盈余
供需指数趋势	下降	上升	上升										

2.2.5 产水服务供需匹配 本研究在评估产水服务供需的基础上,采用 Z-score 方法将供给量和需求量标准化,坐标系中 X 轴表示供给,Y 轴表示需求^[24],第一象限表示高供给高需求,第二象限表示低供给高需求,第三象限表示低供给低需求,第四象限表示高供给低需求,计算公式如下:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

式中: x 为标准化后的供给值、需求值; x_i 为第 i 个单元的供给值、需求值; \bar{x} 为平均值; s 为标准差; n 为评价单元的总数。

3 结果与分析

3.1 产水服务时空演变特征

3.1.1 产水服务供给时空分析 为定量分析巴基斯坦 2000—2020 年产水服务供给量和需求量,本研究将 2000—2020 年巴基斯坦平均产水深度、平均降水量、平均实际蒸发量进行了统计和计算(表 4),由人均需水量与人口密度的乘积得出产水需求量,并将产水服务供给与需求相结合计算出产水服务供需指数(表 5)。从时间变化上看,2000—2020 年巴基斯坦产水供给量的变化较为明显,呈现先增后减的趋势。产水服务供给量明显增大的两个时间段为 2000—2005 年和 2005—2010 年,增幅分别为 34.50% 和 31.82%。从 2010 年产水量达到峰值后开始下降,2010—2015 年有轻微下降的趋势,降幅为 1.90%;2015—2020 年,产水供给量明显减少,降幅为 19.61%,在这期间降水量的减少以及蒸发量的增加导致产水量的降低。

表 4 2000—2020 年平均产水深度、平均降水量、平均实际蒸散发量

Table 4 Average water depth, average precipitation and average actual evapotranspiration from 2000 to 2020

年份	平均产水深度/mm	平均降水量/mm	平均实际蒸散发量/mm
2000	149.62	230.33	80.72
2005	201.22	313.06	111.84
2010	265.19	383.33	118.15
2015	260.47	370.97	110.50
2020	209.15	340.73	131.58

表 5 2000—2020 年产水服务供给量、需求量及供需指数变化
Table 5 Changes in supply, demand, supply and demand index of water yield services from 2000 to 2020

年份	供给量/ 10^8 m^3	需求量/ 10^8 m^3	供需指数
2000	1 323.28	1 756.46	-0.140 7
2005	1 779.78	1 982.74	-0.053 9
2010	2 346.06	2 236.51	0.023 9
2015	2 301.47	2 525.34	-0.046 4
2020	1 850.16	2 782.89	-0.201 3

从空间分布上看,2000—2020 年产水量空间分布格局相似(图 2),主要表现为中部高南北低。以 2020 年为例,产水量高值区主要集中在开普省的东部、旁遮普省的北部以及自由克什米尔地区,产水量低值区主要集中在俾路支省西部和信德省大部分地区,产水量中值区则开普省南部和旁遮普省中部地区。这种空间分布格局与研究区植被分布状况和土地利用类型有关系,例如高值区地形以丘陵和山地为主,地类以林地为主,低值区植被稀疏,荒漠化严重。从空间变化上看,2000—2005 年产水量空间格局变化不大,2005—2010 年巴基斯坦东南部产水量显著增加,2010—2020 年空间变化不明显。

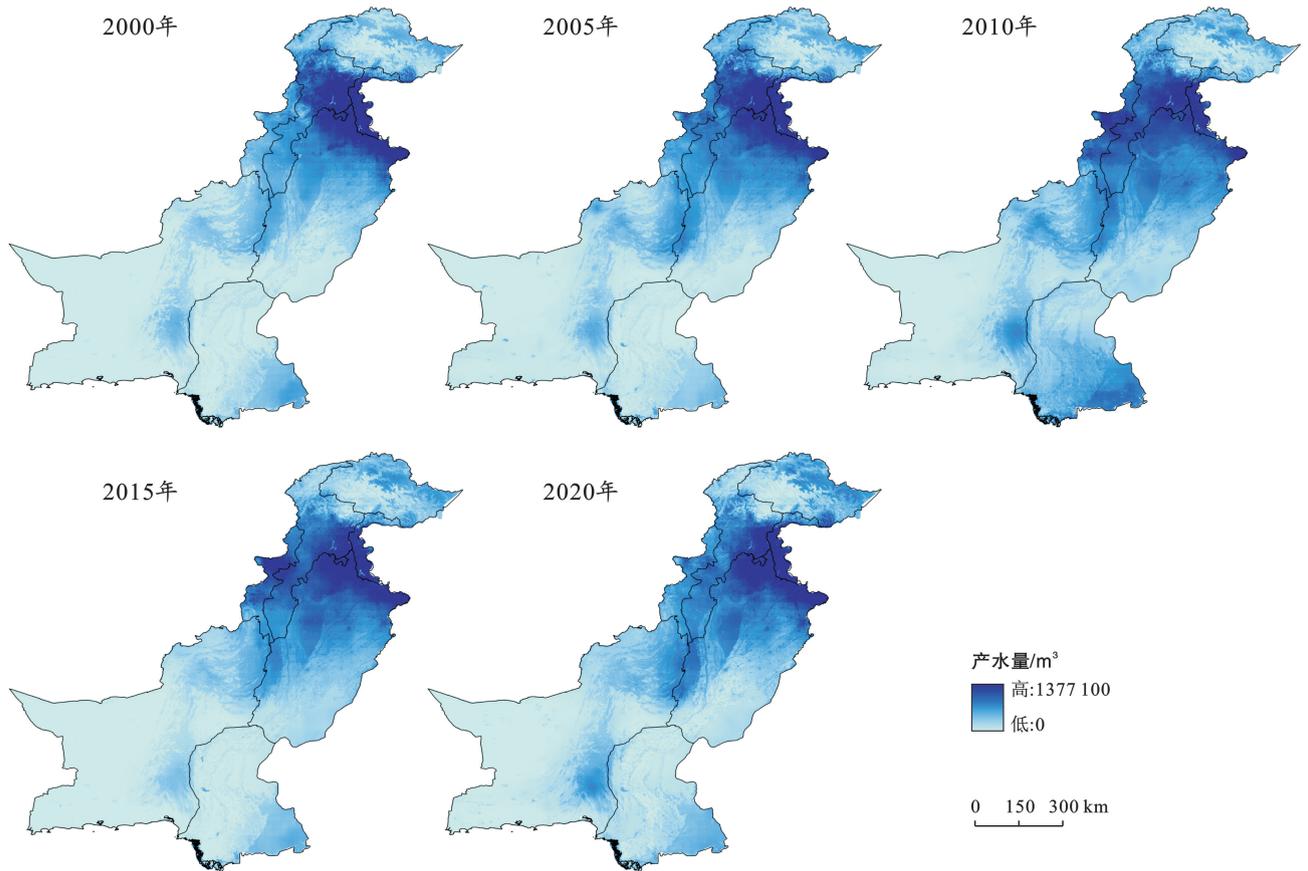


图2 2000—2020年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供给量时空分布

Fig.2 Temporal and spatial distribution of water yield services supply of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) from 2000 to 2020

3.1.2 产水服务需求时空分析 从时间变化上看,2000—2020年水需求总量呈上升趋势(表5),由2000年的 $1.76 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 上升到2020年的 $2.78 \times 10^{11} \text{ m}^3$,水需求总量增加了58.44%。产水服务需求量的变化与人口密度高度相关。2000年巴基斯坦人口数量为 1.42×10^8 ,至2020年人口达 2.21×10^8 ;2000年巴基斯坦GDP为 8.20×10^{10} 美元,至2020年GDP达 2.63×10^{11} 美元。鉴于此,经济和人口的增长致使水需求量不断增加。

从空间变化上看,2000—2020年水需求量空间分布格局基本稳定(图3),以2020年为例,水需求高值区域集中分布于伊斯兰堡首都区、开普省中部、旁遮普省和信德省中部,水需求低值区域集中分布于俾路支省、吉尔吉特—巴尔蒂斯坦以及开普省的东南部和信德省的东北部。这种空间分布格局与巴基斯坦人口密度、土地利用类型、经济发展状况等有关,即水需求高值区主要为城市建成区和耕地区,人口密度大,工业发达,需水量大,而水需求低值区多为自然环境恶劣的荒漠地区,人口稀少,经济欠发达,需水量小。

2.1.3 产水服务供需指数时空分析 将供需指数值域按照表2标准进行分级得到2000—2020年产水服务供需指数分级(图4),由图可知,严重赤字区集中于整个印度河平原和俾路支省的西部,高度盈余区集中分布在吉尔吉特—巴尔蒂斯坦和俾路支省东部,中度盈余区广泛分布于巴基斯坦的中部,这种空间分布状况与土地覆被类型、植被分布状况、人口密度等有较强的关联。从时间变化上看(图5),2000—2020年巴基斯坦产水服务的供需空间匹配状况先有所好转继而变差。与2000年相比,2010年严重赤字区面积减少了23.54%,高度盈余区增加了16.98%;而与2010年相比,2020年严重赤字区面积增加了10.19%,高度盈余区减少了10.83%。这说明2010年供需状况良好,巴基斯坦70.12%的地区处于产水盈余状态,但2000年与2020年的供需状况较差,全国近一半地区缺水,产水供需矛盾突出。2000—2010年,严重赤字区在俾路支省西部和下印度河平原地区大面积收缩;俾路支省东南部、信德省东部和旁遮普省东南部高度盈余区域扩张。2010—2020年,俾路支省西部和下印度河平原的严重赤字区扩张,高度盈余区域的面积变化不大。

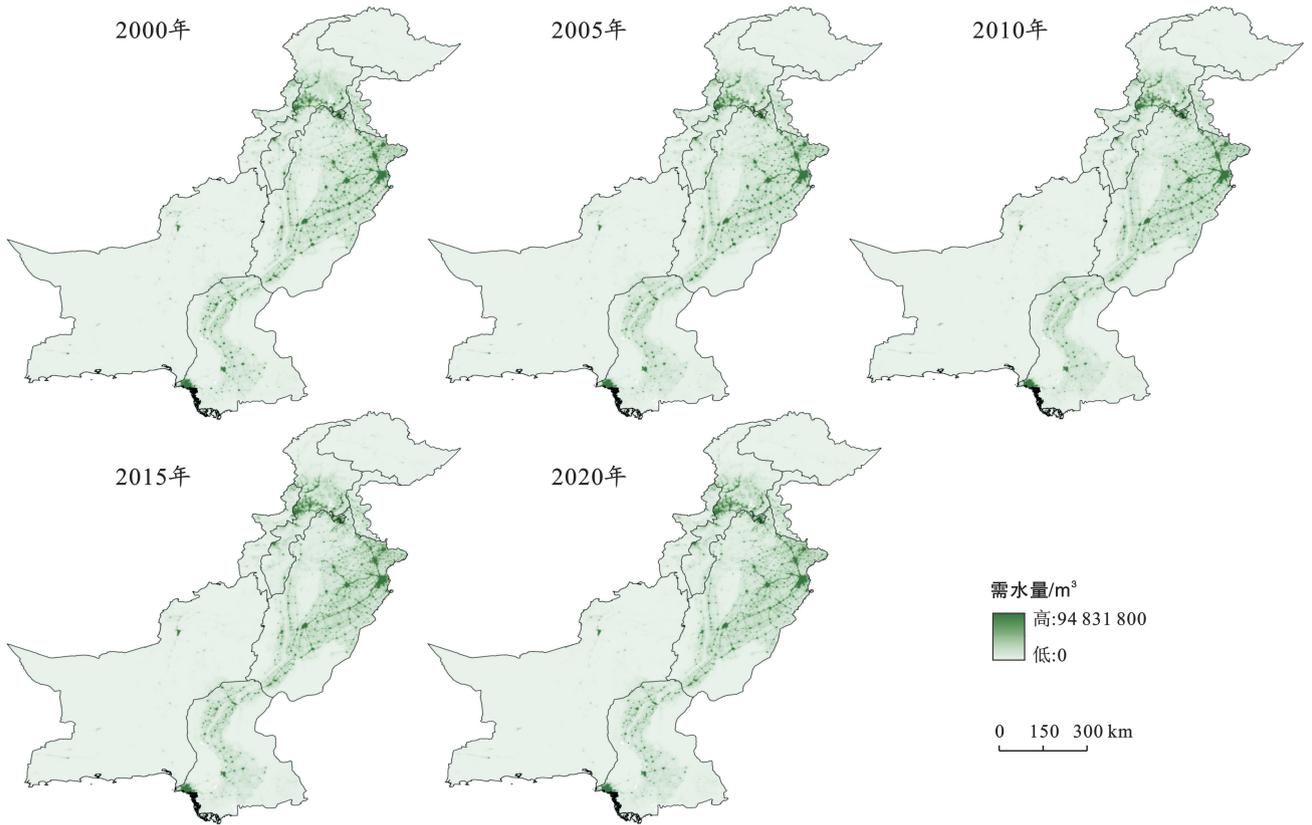


图 3 2000—2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务需求量时空分布

Fig.3 Temporal and spatial distribution of water yield services demand of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) from 2000 to 2020

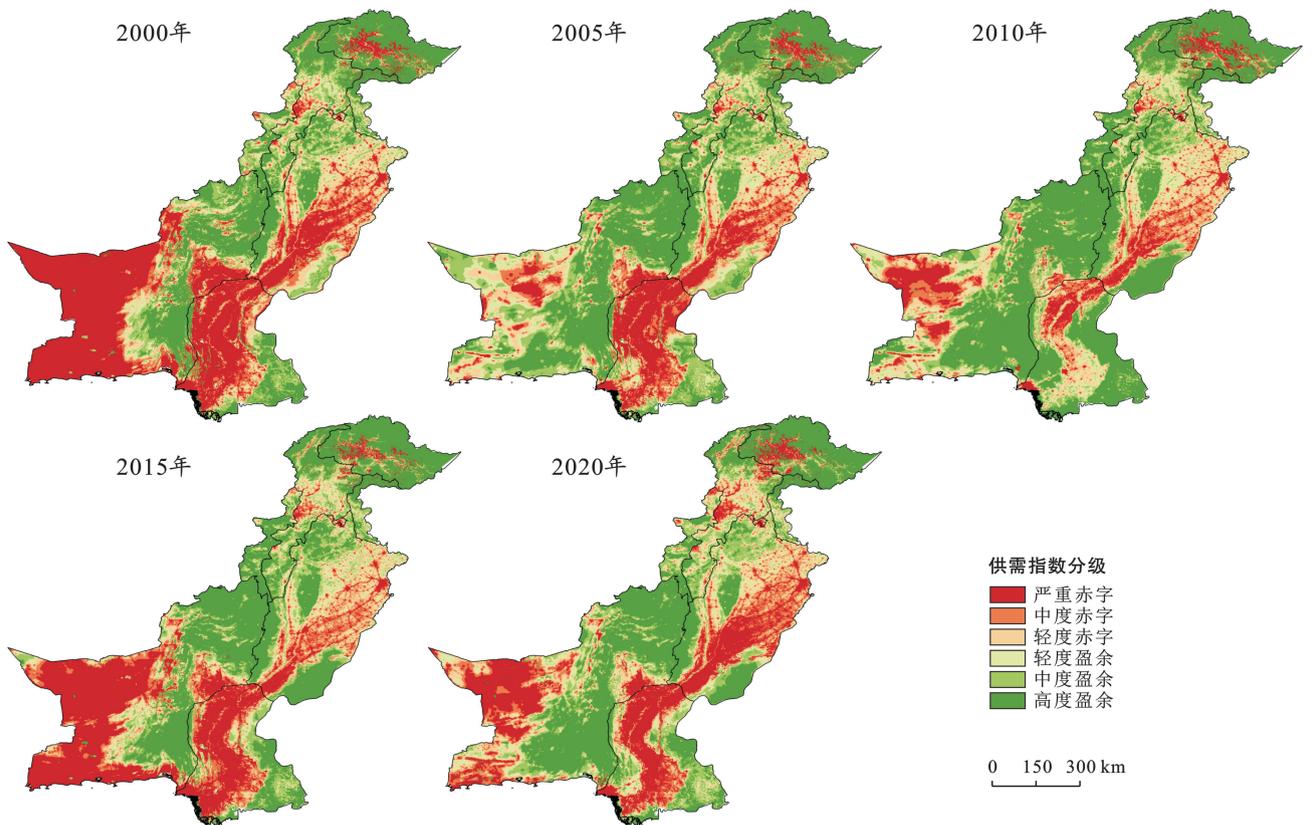


图 4 2000—2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需指数分级

Fig.4 Water yield services supply and demand index classification of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) from 2000 to 2020

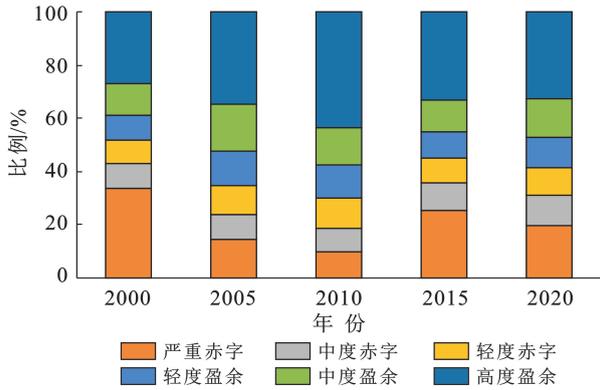


图 5 2000—2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需指数等级比例

Fig.5 The proportion of water yield services supply and demand index grades of China - Pakistan economic corridor (Pakistan section) from 2000 to 2020

根据栅格单元的变化趋势及显著性水平,将产水服务供需指数趋势划分为 4 类:显著上升区($k > 0, p < 0.05$)、不显著上升区($k > 0, p > 0.05$)、不显著下降区($k < 0, p > 0.05$)、显著下降区($k < 0, p < 0.05$)。拟合五期供需指数得出巴基斯坦产水服务供需指数趋势(图 6),结果表明巴基斯坦产水服务供需指数变化趋势以不显著上升和下降为主(94.30%),显著上升区占 2.26%,显著下降区占 3.44%。显著上升区集中分布于吉尔吉特—巴尔蒂斯坦和俾路支省北部。显著下降区集中分布于开普省、旁遮普省北部。不显著上升区广泛分布于俾路支省、旁遮普省、信德省等地。不显著下降区集中于巴基斯坦北部和西部,其他区域较分散。总体来看,巴基斯坦大部分地区变化趋势较弱,产水服务相对稳定。

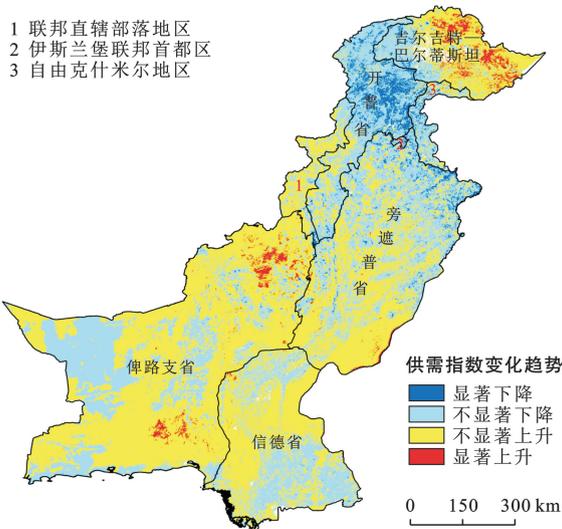


图 6 2000—2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水供需指数空间变化趋势

Fig.6 Spatial change trend of water yield services supply and demand index of China - Pakistan economic corridor (Pakistan section) from 2000 to 2020

3.2 产水服务供需风险分区

结合产水服务供需指数和趋势划分出产水服务供需风险(图 7)。由表 6 可知,2020 年巴基斯坦产水服务高风险区面积比例为 22.69%,主要分布于俾路支省西部、开普省中部、吉尔吉特—巴尔蒂斯坦西部、东部省区的印度河平原地区。低风险区面积占比为 36.13%,集中分布于各省份的中部和边界地区。无风险区面积占比为 41.19%,分布于吉尔吉特—巴尔蒂斯坦大部分地区、联邦直辖部落区南部、俾路支省东部、旁遮普省东南部和信德省东部。高风险区土地利用类型主要为农耕区、城市建成区、荒漠区等,农耕区和城市建成区需大量水源,产水服务供不应求,风险等级高。荒漠区降水稀少,产水服务供需矛盾突出。

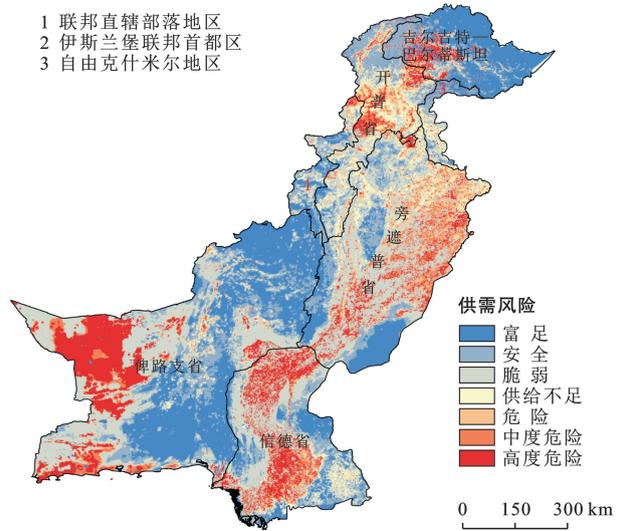


图 7 中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需风险

Fig.7 Supply and demand risks of water yield services of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section)

将高风险区基于 Z-score 标准化后得出 2020 年产水服务高风险区供需匹配空间类型(图 8)与分布(表 7)。

2020 年巴基斯坦产水服务高风险区供需匹配类型以低供给低需求为主,其比例为 47.56%,主要分布于俾路支省西部和吉尔吉特—巴尔蒂斯坦,这些地区虽人口密度小,需求量也低,但产水供给满足不了需求导致供需矛盾恶化。高供给高需求区(占 25.19%)分布于开普省南部和旁遮普省北部,这些地区产水供给虽高,但人口密集,水需求量远远超过供给量。低供给高需求区(占 26.74%)集中于印度河中下游平原,这些地区降水稀少且人口密度大,水需求量大,供需矛盾严重。

表 6 2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务供需风险等级比例

Table 6 Proportion of risk levels of supply and demand for water yield services of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) in 2020

风险划区	风险等级	比例/%	主要分布区域
无风险区	富足	23.98	吉尔吉特省—巴尔蒂斯坦大部分地区、联邦直辖部落区中部南部、俾路支省北部南部、旁遮普省东南部、信德省东部
	安全	17.21	
低风险区	脆弱	31.49	各省份中部和省边界周围地区
	供给不足	4.64	
高风险区	危险	4.37	俾路支省西部、开普省中部、吉尔吉特—巴尔蒂斯坦中部、旁遮普省东部和信德省中部的印度河平原地区
	中度危险	5.47	
	高度危险	12.85	

表 7 2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务高风险区供需匹配空间类型分布

Table 7 Spatial distribution of supply and demand matching in high-risk areas of water yield services of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) in 2020

供需匹配空间类型	面积比例/%	分布地区
低供给高需求	26.74	印度河中下游平原
高供给高需求	25.19	开普省南部和旁遮普北部
低供给低需求	47.56	俾路支省西部和吉尔吉特—巴尔蒂斯坦以及印度河平原两侧
高供给低需求	0.50	—

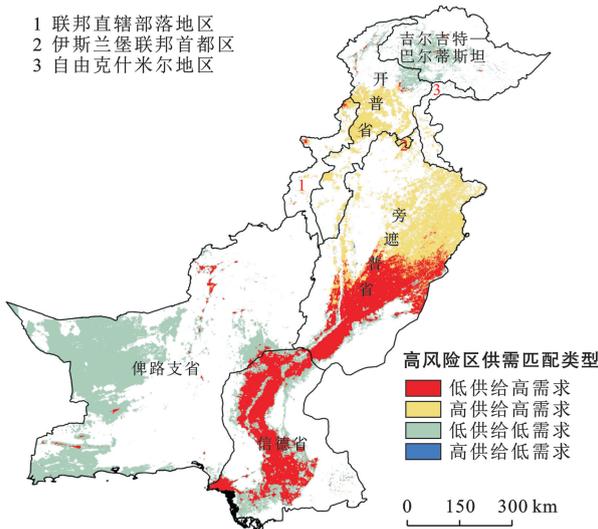


图 8 2020 年中巴经济走廊巴基斯坦段产水服务高风险区的供需匹配空间类型

Fig.8 Types of supply and demand matching spaces in high-risk areas of water yield services of China-Pakistan economic corridor (Pakistan section) in 2020

4 讨论

产水服务作为生态系统服务的一项重要分支,对维持生态系统的稳定与和谐、促进区域经济的可持续发展具有极其重要的作用。产水量的变化受降水量、植被分布状况和土地利用/覆被等因素的影响。近年来多位学者对降水量、土地利用/覆被与区域生态系统产水量之间的关系进行了大量研究。杨洁等^[25]在对黄河流域产水量的时空格局研究中发现降水对产水量的影响比较显著。李怡颖等^[26]通过研究发现影

响张家口市产水量的主要因素是降水,其次为土地利用方式。谢余初等^[27]在白龙江流域的研究也得到相似结论。由于不同土地利用类型的土壤含水量、蒸散发能力、凋落物持水能力及冠层截留量均存在差异,因此不同土地利用类型产水能力不同^[25]。本研究的 5 个时间节点中 2010 年降水量最大,产水量也最高;同时本研究区内产水量较高的地区地类以耕地、林地为主,植被覆盖率高。另外产水服务需求量的变化与人口密度高度相关,随着人口的增长,水需求量也逐年增加;在空间格局上,研究区内水需求量高值区通常为人口密集区。

本研究结合供需指数与最小二乘法拟合的供需指数趋势动态评估了巴基斯坦产水服务供需风险,高风险区生态脆弱、生态敏感性高,在未来发展中要密切关注风险区内项目的开发建设,监测产水服务动态变化,防止其进一步退化;加强水源地生物多样性保护,依托水土保持等工程措施进行生态保护;推行节水农业,采取跨流域调水等方式弥补用水需求;借鉴中国的生态补偿机制,结合供给与需求确定补偿主体、补偿受体、补偿金额,使产水服务供需相对平衡。

由于数据的可获得性以及研究水平的限制等原因,本研究还存在一些局限和不足。例如未考虑未来土地利用、气候变化以及区域间产水服务流动等,因此在未来研究中可从这些方面进行完善,将多情景模拟纳入产水服务供需风险研究,考虑生态系统服务的流动性,将其量化以便动态识别产水服务在空间上的供需匹配。

5 结论

(1) 在产水服务供需时空变化方面,2000—2020年总产水量呈先增后减的趋势,产水服务供给能力中部高南北低;20 a来水需求量增幅高达58.44%,水需求量高值区集中分布于人口密集的城市建成区和耕地区。

(2) 在产水服务供需指数方面,供需指数趋势以不显著上升和下降为主(94.30%),总体来看巴基斯坦大部分地区变化趋势较弱,产水服务相对稳定;严重赤字区主要分布于印度河平原与俾路支省西部,高度盈余区集中分布于吉尔吉特—巴尔蒂斯坦与俾路支省东部。

(3) 在产水服务供需风险方面,2020年产水服务供需高风险区面积比例为22.69%,低风险区面积比例为36.13%,无风险区面积比例为41.19%,其中高风险区供需匹配类型以低供给低需求为主(47.56%),其次为低供给高需求(26.74%)、高供给高需求(25.19%),高供给低需求(0.50%)。

[参 考 文 献]

[1] 戴尔阜,王亚慧.横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J].地理学报,2020,75(3):607-619.

[2] 吴会慧,赵艳玲,李素萃.基于GEE的淮南市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].生态经济,2021,37(2):146-152.

[3] 包玉斌,李婷,柳辉,等.基于InVEST模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化[J].地理研究,2016,35(4):664-676.

[4] 吕乐婷,任甜甜,李赛赛,等.基于InVEST模型的大连市产水量时空变化分析[J].水土保持通报,2019,39(4):144-150.

[5] Leh M D K, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2013,165:6-18.

[6] Wei Hejie, Fan Weiguo, Wang Xuechao, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review [J]. *Ecosystem Services*, 2017,25:15-27.

[7] 白杨,王敏,李晖,等.生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J].生态学报,2017,37(17):5846-5852.

[8] 赵文武,刘月,冯强,等.人地系统耦合框架下的生态系统服务[J].地理科学进展,2018,37(1):139-151.

[9] Baró F, Haase D, Gómez-Baggethun E, et al. Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European Cities [J]. *Ecological Indicators*, 2015,55:146-158.

[10] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, et al. Assessment of the water supply: Demand ratios in a Mediterranean

Basin under different global change scenarios and mitigation alternatives [J]. *Science of the Total Environment*, 2014,470/471:567-577.

[11] 王壮壮,张立伟,李旭谱,等.区域生态系统服务供需风险时空演变特征:以陕西省产水服务为例[J].生态学报,2020,40(6):1887-1900.

[12] Li Delong, Wu Shuyao, Liu Laibao, et al. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81:159-170.

[13] 玛依努尔,赵军.中巴农产品贸易增长特质及影响因素研究:基于贸易引力模型的实证分析[J].价格月刊,2019(11):32-37.

[14] 楚新元.中巴经济走廊研究的热点、趋势与动态演进:基于CiteSpace的文献计量分析[J].金融发展评论,2020(9):26-41.

[15] Muhammad Salim. “中巴经济走廊”开启中巴合作新模式[J].中国投资,2015(7):54-57.

[16] Aziz T. Changes in land use and ecosystem services values in Pakistan, 1950—2050 [J]. *Environmental Development*, 2021,37:100576.

[17] 田丰.中巴经济走廊新愿景[J].中国外资,2018(3):28-30.

[18] Zhang Liwei, Fu Bojie, Lü Yihe, et al. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting [J]. *Landscape Ecology*, 2015,30(3):535-546.

[19] 刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究:以兰州市为例[J].地理学报,2019,74(9):1921-1937.

[20] 陈骏宇,王慧敏,刘钢,等.“水—能—粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(3):542-553.

[21] 赵晓同,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.

[22] 王晓峰,程昌武,尹礼唱,等.新疆生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J].生态学报,2020,39(3):990-1000.

[23] 孟庆香,张莉坤,位贺杰,等.基于土地利用/覆被变化的伊河流域生态系统服务供需风险时空演变[J].生态学报,2022,42(5):2033-2049.

[24] 刘春芳,王伟婷,刘立程,等.西北地区县域生态系统服务的供需匹配:以甘肃古浪县为例[J].自然资源学报,2020,35(9):2177-2190.

[25] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于InVEST模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应[J].应用生态学报,2020,31(8):2731-2739.

[26] 李怡颖,范继辉,廖莹.基于InVEST模型的张家口市水源涵养功能时空差异分析[J].草业科学,2020,37(7):1313-1324.

[27] 谢余初,巩杰,齐姗姗,等.基于InVEST模型的白龙江流域水源供给服务时空分异[J].自然资源学报,2017,32(8):1337-1347.