

山西省产水服务供需时空变化

赵奕博¹, 于 洋^{1,2}, 孙保平¹

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083)

摘要: 为了解生态系统服务供需匹配、供需时空变化趋势及其影响因素。以山西省产水服务为切入点,基于 1990 年、2000 年、2010 年和 2020 年自然地理和社会统计数据,利用地理统计分析和 InVEST 模型,分析其供需时空变化特征。结果表明:(1)在产水服务供需时空格局方面,山西省产水服务供给与需求总量在 30 年呈增加趋势。山西东南地区(晋中市、长治市、晋城市)是主要的产水服务供给区;而产水服务需求较大的地区主要为太原、大同、长治和阳泉市区。(2)在产水服务供需匹配方面,1990—2000 年产水服务供给不足的区域面积由 1.82% 急剧增加至 16.80%,而在 2010—2020 年由 16.95% 急剧减少至 5.34%,供需空间匹配状况有所好转。(3)通过空间自相关分析,山西省产水服务供给和需求之间存在明显空间不匹配。研究结果为全面梳理山西省生态系统服务供需匹配特征提供理论支撑。

关键词: 生态系统服务; 供给与需求; 产水服务; 山西省; 空间自相关

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)06-0126-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.06.017

Research on the Spatiotemporal Changes of Supply and Demand for Water Yield in Shanxi Province

ZHAO Yibo¹, YU Yang^{1,2}, SUN Baoping¹

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University,

Beijing 100083; 2. Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station,

CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: To understand the match between supply and demand of ecosystem services, the spatial and temporal trends of supply and demand and their influencing factors. Using water production services in Shanxi Province as an entry point, and based on physical geography and social statistical data for 1990, 2000, 2010, and 2020, used geostatistical analysis and InVEST model to analyze the spatio-temporal changes characteristics of supply and demand. The results showed that: (1) In terms of the spatiotemporal patterns supply and demand for water production services in Shanxi Province showed an increasing trend over the 30-year period. The southeast region of Shanxi (Jinzhong, Changzhi and Jincheng cities) was the main supply area for water production services, while the areas with high demand for water production services were mainly the urban areas of Taiyuan, Datong, Changzhi and Yangquan. (2) In terms of matching the supply and demand of water production services, the area of regions undersupplied with water production services increased sharply from 1.82% to 16.80% in 1990 to 2000, while it decreased sharply from 16.95% to 5.34% in 2010 to 2020, with the spatial matching of supply and demand improving. (3) Through spatial autocorrelation analysis, there was an obvious spatial mismatch between the supply and demand of water production services in Shanxi Province. The research results provide theoretical support for comprehensively sorting out the supply and demand characteristics of ecosystem services in Shanxi Province.

Keywords: ecosystem services; supply and demand; water yield; Shanxi Province; Moran's I

收稿日期:2023-05-22

资助项目:国家自然科学基金项目(42177310)

第一作者:赵奕博(1998—),男,山西太原人,硕士研究生,主要从事生态系统服务研究。E-mail:gszhaoyibo@163.com

通信作者:于洋(1985—),男,河北承德人,博士,副教授,主要从事水土保持与流域治理研究。E-mail:theodoreyy@gmail.com

生态系统服务是人们直接或间接从生态系统中获得的惠益^[1]。生态系统服务主要分为供给、调节、支持和文化服务^[2-3]。而从生产与使用的角度可以分为生态系统服务供给和需求 2 个方面^[4-5]。千年生态系统研究报告^[6]指出,由于人类对生态资源无节制地开发利用,全球近 2/3 的生态系统服务供给能力正在下降,生态系统服务供给面临着巨大的压力和挑战,区域供需失衡现象越来越普遍,同时也伴随一系列的生态问题(如植被退化、水源匮乏等)。因此,对生态系统服务的供需进行量化并分析其匹配特征,准确识别供需失衡区域,可以为改善区域生态系统服务供需状况、提升区域内居民生活水平以及为生态系统服务管理策略的制定提供决策依据。

近年来,关于生态系统服务供需方面的研究^[7]逐渐成为研究者所关注的热点。生态系统服务供需的研究^[8]起始于本世纪初,国外学者^[9]在对各种生态系统服务进行空间量化时发现,大多数的服务供给和需求区域之间存在明显的空间差异,表明生态系统服务供需之间存在某些生物物理或人为的动态过程,供需之间的联系逐渐成为生态系统服务概念的关键特征。Fisher 等^[10]将其命名为生态系统服务流,是生态系统供给和受益区域之间的时空关联过程。国内学者主要聚焦于生态系统服务供需的时空动态及匹配分析,王壮壮等^[11]以陕西省产水服务为例,评估 2000—2010 年产水服务的时空格局,计算其供需比和供需比趋势,揭示产水服务供需风险时空格局变化特征;孟庆香等^[12]基于土地利用矩阵对河南省伊河流域多种生态系统服务的供给与需求进行匹配分析,并评估流域生态系统服务供需风险的动态趋势。现有研究^[13]主要关注粮食生产和水资源相关热点生态系统服务的供需状况,而对一些支持类服务系统报道较少。此外,由于生态系统服务研究存在尺度效应,为更精确量化和评估供需及其背后的影响因素,目前,已有的区域生态系统服务权衡、供需分析研究^[14]大部分集中在县、市区域或者流域尺度,而对整体省域尺度的研究相对较少,探索生态环境严峻情境下生态系统服务消费的替代方式成果也较缺乏。

山西省是典型的生态脆弱地区,过度的资源开发导致环境加速退化,反过来又制约着当地经济社会的发展,人口、资源、生态系统和环境充满矛盾,其中水资源的匮乏是制约山西省发展的主要因素之一^[15]。在山西省典型生态脆弱区开展水资源相关生态系统服务研究,既可以丰富省域尺度供需匹配分析的现有成果,同时也可当地政府生态系统供需格局优化、以生态为导向的产业链构建等规划的制定提供思路。因此,以典型的生态脆弱区山西省为例展开分析,利

用 InVEST 模型对山西省 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年产水服务供给与需求进行空间制图,通过计算供需比与空间自相关分析,揭示山西省产水服务供需时空变化,并进一步对生态系统服务供需平衡的影响因素进行分析。研究结果旨在揭示生态系统服务供需间的联系,并对优化山西省区域生态系统服务,促进区域生态空间有效保护具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山西省位于华北平原西部的黄土高原(110°14′—114°33′E,34°34′—40°44′N),地跨黄河、海河两大水系,包括大同、朔州等 11 个地级市(图 1)。地势呈东北斜向西南的平行四边形,山区占总面积的 80.1%。属于温带大陆性季风气候,年降水量 358~621 mm,夏季降水约占全年降水量的 60%,降水季节分布不均,地形特征是影响降水的主要因素。此外,山西省是我国生态典型脆弱地区之一,存在严重的水土流失、植被和土壤退化等问题,是黄土高原最危重的土壤侵蚀地区之一^[16]。

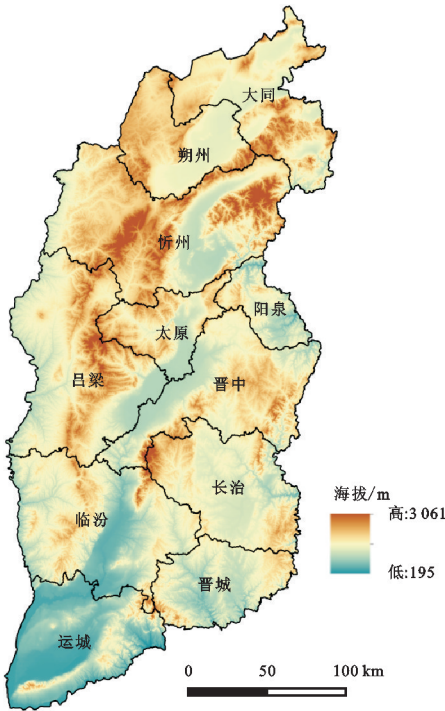


图 1 山西省概况

1.2 数据来源

采用的数据包括土地利用数据、气象数据、人口空间分布数据、土壤类型数据等。气象降水和蒸散发数据为 1 年中 12 个月的月降水数据加和而成的栅格数据。利用 ArcGIS 10.8 软件对栅格数据进行处理。数据来源见表 1。

1.3 研究方法

1.3.1 产水服务供给量化 产水服务供给的量化是

通过 InVEST 模型和 ArcGIS 10.8 软件实现的。利用 InVEST 模型中的年产水量模块,依据水量平衡

方程基本原理,利用 ArcGIS 对土地利用、气象和土壤等数据进行处理后导入模型,从而量化产水服务。

表 1 数据源汇总

数据名称	数据描述	数据类型	分辨率/km	数据来源
行政区划	山西省及各市、县区边界	矢量	—	http://www.resdc.cn/
流域数据	山西省一级、二级河流空间分布	栅格	1	http://www.resdc.cn/
LULC 数据	全国土地利用数据	栅格	0.3	http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/
降水数据	全国年降水数据	栅格	1	http://www.geodata.cn/index.html
潜在蒸散发数据	全国年蒸散发数据	栅格	1	http://www.geodata.cn/index.html
土壤数据	基于世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(v1.2)	栅格	1	https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/
单位用水量	山西省水资源公报	栅格	—	http://slt.shanxi.gov.cn/
人口数据	中国人口空间分布公里网格数据集	栅格	1	http://www.resdc.cn/

基于 Budyko 水热耦合平衡假设^[17]计算年尺度的产水量,公式为:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x}\right) * P_x \quad (1)$$

式中: Y_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格 x 的年产水量(mm/a); AET_{xj} 为土地利用类型 j 在栅格 x 上的年蒸散量(mm/a); P_x 为栅格 x 上的年降水量(mm/a)。 $\frac{AET_{xj}}{P_x}$ 为蒸散量与降水量的比值,其依据 Zhang 等^[18]的改进方法进行计算,公式为:

$$\frac{AET_{xj}}{P_x} = \frac{1 + \omega_x + R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + (1/R_{xj})} \quad (2)$$

$$\omega_x = Z \times \frac{PAWC_x}{P_x}, R_{xj} = \frac{k_{ij} \times ET_o}{P_x} \quad (3)$$

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times SAN - 0.003 \times SAN^2 - 0.055 \times SIL - 0.006 \times SIL^2 - 0.738 \times CLA + 0.007 \times CLA^2 - 2.688 \times C + 0.501 \times C^2 \quad (4)$$

式中: R_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格单元 x 的干燥指数; ω_x 为修正植被年可利用水量与预期降水量的比值; Z 为 Zhang 系数; $PAWC_x$ 为植物可利用含水量(mm/a); k_{ij} 为植被蒸散系数; ET_o 为参考作物蒸散(mm/a); SAN 、 SIL 、 CLA 和 C 分别表示砂粒、粉粒、黏粒和有机质在土壤中的含量百分数(%) ;植被蒸散系数 K_c 及作物根系深度参考相关文献^[19-20](表 2);Zhang 系数即季节性因子,为 1~30,经模型校验和参考山西省水资源公报修正 Zhang 系数为 30。

表 2 山西省植被根系深度与蒸散系数

一级地类	土地利用类型	根系深度	K_c
耕地	1	1500	0.68
林地	2	7000	1.00
草地	3	2600	0.60
灌木	4	5000	0.50
水域	5	10	1.00
城市	6	10	0.30
裸地	7	10	0.20

1.3.2 产水服务需求量化 山西省的产水服务需求量即为耗水量,根据人均综合用水量以及人口密度栅格数据来计算。人均综合用水量的获取来自历年山西省水资源公报^[21]。其中,人均综合用水量即人均耗水量,由城镇综合生活人均用水量、农村居民生活用水量、农田灌溉亩均用水量及万元 GDP 用水量等计算得到的。产水服务需求计算公式为:

$$D_w = D_{pwc} \times \rho_{pop} \quad (5)$$

式中: D_w 为需水量(m^3); D_{pwc} 为年人均耗水量(m^3); ρ_{pop} 为栅格人口密度(人/ km^2)。

1.3.3 产水服务供需比计算 采用生态系统服务供需比(ESDR)来更好地衡量山西省产水服务供需匹配状况。正值代表盈余,负值代表赤字;若为零值则表示供给与需求相等。

$$ESDR_n = \frac{S_n - D_n}{(S_{max} + D_{max})/2} \quad (6)$$

式中: S_n 表示第 n 种生态系统服务供给量(m^3); D_n 表示第 n 种生态系统服务需求量(m^3); S_{max} 指该生态系统服务供给量的最大值(m^3); D_{max} 指该生态系统服务需求量的最大值(m^3)。

1.3.4 空间自相关分析 采用 ArcGIS 10.8 软件中空间自相关(Moran's I)验证 1990—2020 年产水服务供给和需求的时空变化特征;冷热点分析采用热点分析工具(Getis-Ord G_i^*)实现。

2 结果与分析

2.1 产水服务供需时空变化特征

2.1.1 产水服务供给时空变化特征 山西省产水服务供给的空间分布格局在 1990—2020 年基本一致(图 2),由北向南、由西向东均呈现增加趋势,总体上遵循降水量的空间分布。年平均产水量在研究时间段内先减少后增加,在 1990—2000 年由 174 mm/a 锐减至 91 mm/a,随后在 2000—2010 年增加到 119 mm/a,2010—2020 年大幅增加至 189 mm/a。其中山西省东南部产水能力最强,山西西部和北部最弱。1990—2020 年产水量较高的地区均分布在长治东

部、晋中东南部、晋城东北部及忻州东北部,其中以长治市年平均产水量最大,随后是晋城市和晋中市,1990—2000 年均骤降,2000—2020 年呈现持续增加趋势,以长治市为例,年平均产水量从 2000 年 193.21 mm/a,增加至 2020 年 282.25 mm/a。1990—2020

年产水量最低的地区均在山西北部的朔州市和大同市,随后是中部的忻州市、阳泉市和太原市;2020 年大同市年平均产水量为 80.04 mm/a,为全省最低,朔州市为 106.61 mm/a;其他城市年平均产水量在研究时段内也呈先下降后增加趋势。

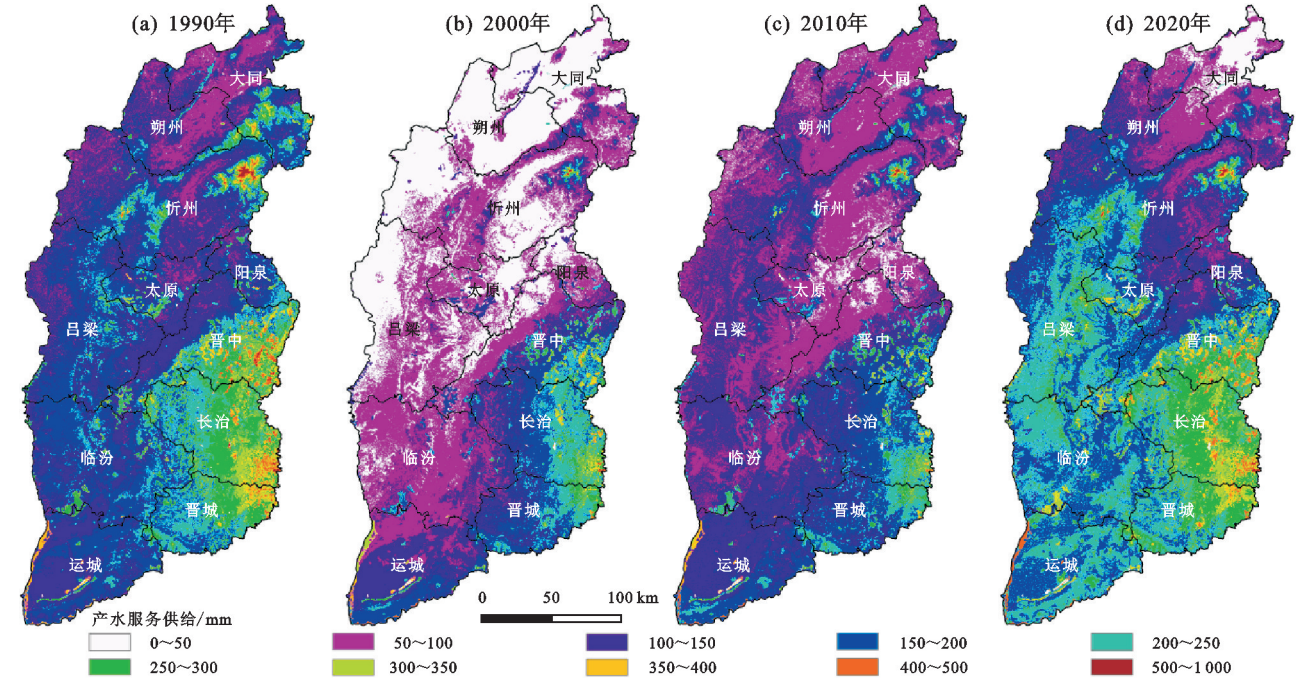


图 2 1990—2020 年山西省产水服务供给空间分布

2.1.2 产水服务需求时空变化特征 山西省产水服务需求的空间格局在 1990—2020 年总体一致(图 3),需求高的地方主要为太原、大同、长治和阳泉市区,与人口空间分布相一致。山西省产水服务需求总量在研究时段内不断增大,1990—2000 年由 $47.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 上升至 $56.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,2000—2010 年急剧增长,总量增长至 $74.01 \times 10^8 \text{ m}^3$,增加 32.14%,2020 年增加至 $77.43 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,太原年平均需求量最大,1990—2020 年太原市全市年平均需求量持续增大,由 1990 年的 $6.17 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,增大至 2020 年的 $13.41 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。此外,山西省年平均需求量最大值均分布在太原市市区内,由 1990 年的 $50.09 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,在 2000 年增大至 $94.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,随后在 2010 年急剧增大至 $880.63 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,增大近 10 倍,而在 2020 年降低至 $660.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

山西省产水服务需求量的局部空间差异十分明显,中心城市区域的需求量远超其周边的郊区和县区。其中以省会城市太原尤为明显,2020 年太原市区内年平均需求量最大值为 $660.96 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,而全市的年平均需求量仅为 $13.41 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

2.2 产水服务供需匹配分析

山西省 1990—2020 年产水服务供需匹配空间分布见图 4。1990—2020 年产水服务供需比的空间格局基本一致,山西省东南地区较高,北部、中部和西南

部较低;山西省由北向南处于中线的城市(大同、朔州、忻州、太原、临汾、运城)均处于缺水状态,其中以省会城市太原失衡最为严重,供需比低值集中在太原市区。保持较高水平供需比地区主要分布在山西省东南部,位于晋中中部和东南部、长治除市区外的地区、晋城东北部和忻州东部。

从时间变化上看,1990 年山西省产水供需比小于 0(即供小于需,缺水状态)的区域占全省比例仅 1.82%,但 1990—2000 年比例急剧增加至 16.80%,2000—2010 年略微增加至 16.95%,随后 2010—2020 年急剧减少至 5.34%。东南地区供需比值较大,1990—2020 年供需比值呈下降趋势,1990—2000 年山西省中线附近区域(大同、朔州、忻州市区、太原及周边、长治市区、临汾市区)出现大片由盈余转为缺水的状况,随后 2010—2020 年缺水面积锐减,缺水状况得到明显好转。

2.3 产水服务供需空间自相关分析

由图 5 可知,山西省 1990—2020 年产水服务供给和需求的冷热点空间分布。山西省产水服务供需间存在明显的空间失配。从空间分布来看,1990—2020 年山西省产水服务供给的冷热点分布与产水量空间分布总体一致,山西省北部的大同、朔州以及忻州西部和北部均为产水服务供给的冷点区,而山西省

南部的晋中、长治、晋城地区均为产水服务的热点区。山西省产水服务需求的热点主要集中在太原市市区

和阳泉市市区,无明显的冷点区,与人口密度空间分布一致,热点区均为高人口密度区域的市区。

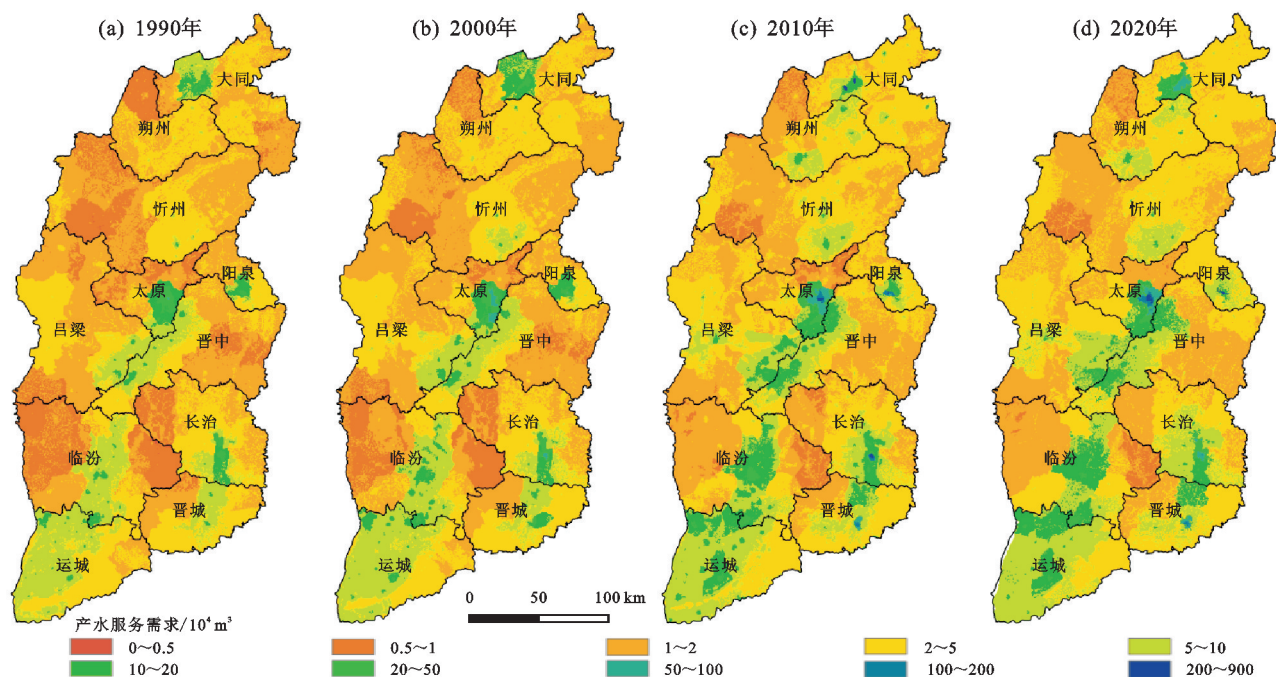


图 3 1990—2020 年山西省产水服务需求空间分布

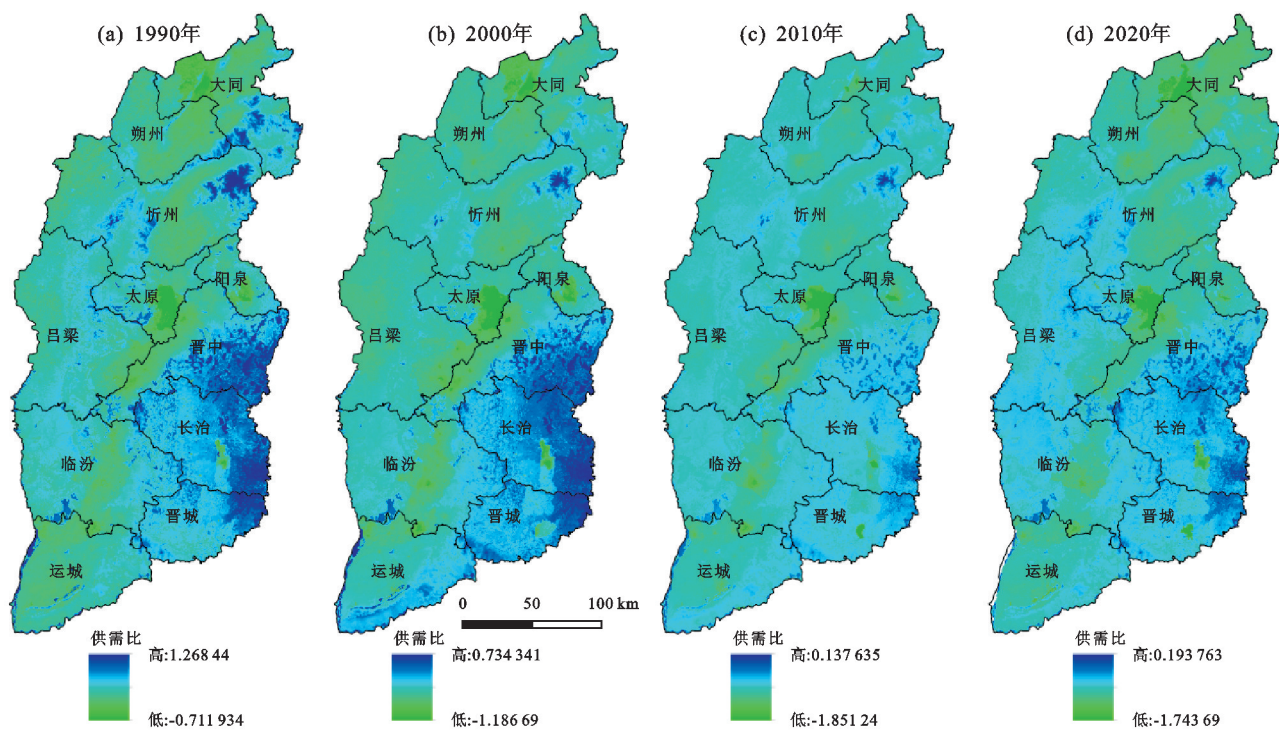


图 4 1990—2020 年山西省产水服务供需匹配情况

从时间上来看,1990—2020 年山西省产水服务供给冷点区在 2000 年向忻州西部、吕梁、太原延伸;但在 2010 年冷点区缩小并向东移动,东部的阳泉、太原和晋中的部分地区转变为冷点区;随后在 2020 年,冷点区在北部的大同、朔州和忻州东部集中。而 1990—2020 年山西省产水服务供给的热点集中在山西省东南部,仅在 2010 年向南部运城地区延伸,而在其余时间无明显变化。1990—2000 年山西省产水服

务需求热点区增加而冷点区消失,晋中市榆次区以及太原市清徐县均成为热点区;而在 2010 年,榆次区和清徐县不再是热点区,此外太原市晋源区也脱离热点区,而晋中市寿阳县成为热点区域;在 2020 年,热点区进一步减少,并且太原市区中的尖草坪区、杏花岭区和小店区的热点置信度降低。总体来看,1990—2020 年,山西省产水服务需求的冷点消失,而热点无明显区域变化。

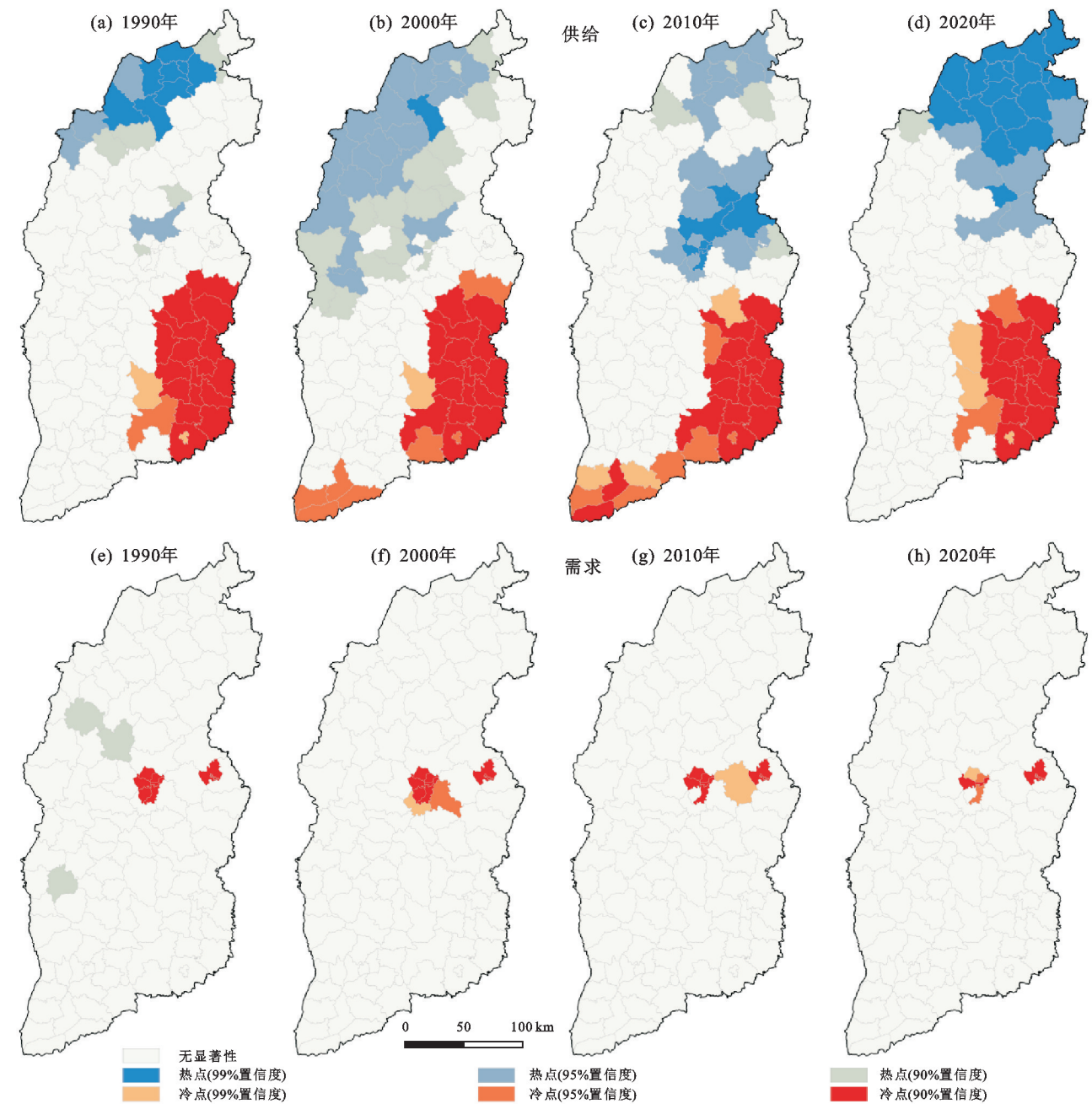


图 5 1990—2020 年山西省产水服务供给和需求冷热点分布

3 讨论

3.1 产水服务供需的影响因素

自然地理特征变化和社会经济发展是山西省产水服务供需变化的关键影响因素^[22]。从空间变化特征来看,产水服务的供给和需求之间具有明显的空间异质性,在产水服务供给方面,从宏观区域尺度来看,产水量空间分布与降水量分布基本一致,山西省东南部年平均降水量较高,并且区域产水量明显也高于其他地区,因此,降雨是产水服务的主要影响因素;而在局部尺度上,土地利用类型也带来不可忽视的影响^[13]。通过与土地利用类型空间分布比较发现,建设用地有着较高产水量,原因是其下垫面通常为水泥等材料,无法有效蓄水,降水将直接转为径流,从而产

生更多的水量,与 Li 等^[23]在北京市水源供给服务对土地利用的响应的研究结论相一致。相比之下,耕地和林地区域产水量相对较低,农田由于地面长期裸露,土壤和农作物高额的蒸散发增加大量水分消耗,其潜在蒸散量远超降水量;而林地有着强大的蓄水保墒能力,能够调节径流、涵养水源,因此,水分产出较少,与郭丽洁^[24]在新疆喀什地区对比分析土地利用变化对产水量时空动态影响的研究结论相一致。而在产水服务需求方面,人口密度大的地区(城市地区)有着高需水量,人口分布是产水服务需求的主要影响因素。此外,坡度、气温、GDP 等因素也对产水服务供需产生不同程度的影响,Li 等^[23]通过地理探测器及多尺度地理加权回归模型(MGWR)分析得出,坡

度是影响水源供给、碳贮存和土壤保持服务的主导因素,实际蒸散发是水源供给和碳贮存服务的重要影响因素等结论;Xue 等^[25]通过 MGWR 模型对 4 种生态系统服务与 8 种影响因素之间的响应进行量化分析,并绘制其空间分布发现,坡度、地形、降水、气温和 GDP 均对产水服务存在不同程度的影响。综上所述,生态系统服务的影响因素是十分多样而复杂的。生态系统服务供需状况在时间上的变化主要源于人类对自然资源日益增长的需求,其影响因素包括经济社会发展政策和环境政策的变化。一方面,城市化扩张加快城市周边土地利用类型的转变,对生态系统服务的供给水平有着直接的影响^[3];另一方面,城市地区的快速发展导致农田碎片化及农地减少,使得越来越多的农村居民迁入城市中,城市人口密度空前增长,对生态系统服务的需求日益增加,对区域生态系统服务供需平衡产生巨大影响^[26-27]。在本研究中,1990—2000 年山西省各市辖区人口密度激增,城市化进程急剧扩大,以省会太原为中心向外辐射的城市建设直接导致缺水面积增加;2000—2010 年城市人口密度进一步激增,使得缺水区的供需比值进一步减小;2010—2020 年产水服务供给的大幅增加以及人口密度增长得到有效的控制,使得缺水区面积大幅减小。

3.2 纳入供需匹配分析的必要性

准确识别生态系统服务供需失衡区域、衡量供需失衡程度、模拟其演变趋势,可为生态系统服务供需平衡相关政策的制定提供有力依据^[1]。许多方法被创建并应用于生态系统服务供需综合分析中,其中,通过生态系统服务供需比或供需比指数 ESDR/ESR 是目前普遍使用的方法,Cui 等^[28]选取呼伦贝尔地区 5 种生态系统服务,并根据 5 个生态系统服务的 ESDR 值,在乡镇和县尺度上通过 K-means 聚合进行分类,观察分析不同尺度上生态系统服务供需匹配特征,证明生态系统服务的供应和需求的匹配关系存在尺度效应;Tao 等^[26]通过建立生态系统服务供需比指数 ESR 对长江三角洲碳封存和景观娱乐 2 种生态系统服务开展供需分析,并量化分析城市扩张对 2 种生态系统服务失衡的贡献,最后讨论提出通过增加城市与周边地区的生态连通性以缓解生态系统服务供需之间的差距;张莉坤^[13]采用生态系统服务供需比 ESDR 和生态系统服务综合供需比 CESDR 来衡量伊河流域 4 种生态系统服务的供需关系发现,伊河流域生态系统服务供需状况总体呈下降趋势。此外,一些软件或模型也可以被用于生态系统服务供需匹配研究,许雪婷等^[29]以山西省为研究区,运用 STELLA 软件

模拟 2020 年各地级市水资源供需平衡状况表明,山西省水资源的供给量无法满足需求量,并且在较长一段时间将一直处于此状况。生态系统服务供需匹配分析已经逐渐成为生态系统服务管理的新视角。

山西省作为中国重要的中部省份之一,地处黄河流域中下游,是华北地区和西北地区之间的重要枢纽,在实现中部地区转型跨越高质量发展中扮演着至关重要的角色,但长久以来受到生态环境脆弱、水土流失严重、水资源短缺等生态问题的困扰,严重影响山西省的经济发展^[30]。在典型生态脆弱地区开展生态系统服务供需匹配分析,可丰富现有生态系统服务供需研究成果,同时也可管理生态系统服务供需平衡和解决现有区域失衡策略的制定提供科学依据。本研究得出各地区的供需水平,为制定解决部分城市生态系统服务短缺政策提供有价值的信息。

3.3 研究存在问题与展望

本研究发现,仅有少数城市地区产水服务供需是自给自足的。而对于快速发展的地区而言,仅靠自己所在区域的产水供给来实现产水服务供需平衡是非常困难的。一方面,城市生态系统服务的供需水平与其原本的生态系统结构和城市发展程度直接相关^[22];另一方面,实现区域自给自足可能不是解决供需失衡的最佳方案。除尽可能地减少需求、增加供给之外,水资源的短缺可以通过交通运输、供水管网和其他措施来解决^[26]。从生态系统服务流的定义可知,在自然和人为因素的驱动下,可以在供给区和使用区之间产生空间流动^[31]。本研究中,可将山西省东南部产水盈余地区水资源分配到北部水资源短缺地区,以实现省域产水服务供需平衡。然而,在经济系统的实际运行中,不同地区之间的生态系统服务流通可能更加复杂^[32]。后续研究将考虑生态系统服务自然流动特性对生态系统服务功能产生的影响。

本文通过生态系统服务供需比 ESDR 来衡量山西省生态系统服务的供需匹配状况。准确识别资源紧张的潜在供需失衡地区,并建立新的框架或指标体系对盈余或赤字程度进行科学划分,对实现社会生态系统有效管理和可持续发展具有重要的推动作用。朱月华等^[33]采用生态系统服务供需比、双变量局部空间自相关和供需均衡度构建供需风险识别框架,将甘肃白龙江流域生态系统服务供需匹配程度划分为 5 个等级;王壮壮等^[11]结合生态系统服务供需比和供需比趋势以及供给与需求趋势 3 项指标,把生态系统服务供需匹配程度划分为 7 个等级,准确识别出陕西省产水服务的供需失衡高风险地区与高风险区域在

全省的面积占比。本文在对产水服务供需进行量化过程中,仅通过对比水资源公报数据来调整 Zhang 系数,尚需对 InVEST 模型产出结果的准确性进行进一步验证。在今后的研究中,应对生态系统服务供需关系演变的驱动机制进行深入研究,在此基础上预测模拟未来生态系统服务供需关系格局,并推演出不同自然社会发展条件下的变化,可为未来生态发展规划、城市建设规划及应对可能到来的生态安全风险提供决策思路。

4 结论

(1)在产水服务供需时空变化方面,1990—2000 年山西省产水服务供给与需求均有所增加。产水服务供给能力总体呈从北到南降低趋势,山西东南地区是主要的产水服务供给区;而产水服务需求较大的地区主要为太原、大同、长治和阳泉的市区。

(2)在产水服务供需匹配方面,1990—2000 年产水服务供给不足的区域由 1.82% 急剧增加至 16.80%, 2010—2020 年由 16.95% 急剧减少至 5.34%,供需匹配状况好转。其中,山西省产水服务供给不足的区域主要分布在由北向南处于省域中线的城市(大同、朔州、忻州、太原、临汾、运城)。

(3)山西省产水服务供给和需求之间存在明显的空间不匹配。其中,供给的冷点集中在北部的大同、朔州和忻州,1990—2020 年在西北—东北区东西转变,而热点区集中在东南部的晋中、长治、晋城,在时间上无明显变化。

参考文献:

- [1] Millennium ecosystem assessment (MEA). Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [2] Aryal K, Maraseni T, Apan A. How much do we know about trade-offs in ecosystem services? A systematic review of empirical research observations[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806(3): e151229.
- [3] Yang S Q, Zhao W W, Liu Y X, et al. Influence of land use change on the ecosystem service trade-offs in the ecological restoration area: Dynamics and scenarios in the Yanhe watershed, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 644: 556-566.
- [4] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 17-29.
- [5] 张立伟,傅伯杰.生态系统服务制图研究进展[J].生态学报, 2014, 34(2): 316-325.
- [6] Li J, Zhou Z X. Natural and human impacts on ecosystem services in Guanzhong-Tianshui economic region of China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(7): 6803-6815.
- [7] Schulp C, Lautenbach S, Verburg P H. Quantifying and mapping ecosystem services: Demand and supply of pollination in the European Union[J]. Ecological Indicator, 2014, 36: 131-141.
- [8] Rees W E. Revisiting carrying capacity: Area based indicators of sustainability[J]. Population and Environment, 1996, 17(3): 195-215.
- [9] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making[J]. Ecological Economics, 2009, 68(3): 643-653.
- [10] Fisher B, Turner R K, Burgess N D, et al. Measuring, modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(5): 595-611.
- [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] 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.
- [13] 张莉坤.伊河流域生态系统服务供需关系与风险管理分区研究[D].郑州:河南农业大学, 2021.
- [14] 郭宗亮,刘亚楠,张璐,等.生态系统服务研究进展与展望[J].环境工程技术学报, 2022, 12(3): 928-936.
- [15] Yang Z, Zhan J Y, Wang C, et al. Coupling coordination analysis and spatiotemporal heterogeneity between sustainable development and ecosystem services in Shanxi Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 836: e155625.
- [16] Hu B A, Kang F F, Han H R, et al. Exploring drivers of ecosystem services variation from a geospatial perspective: Insights from China's Shanxi Province[J]. Ecological Indicators, 2021, 131: e108188.
- [17] Budyko M I. Climate and life[M]. New York: Academic Press, 1974.
- [18] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3): 701-708.
- [19] 李理,赵芳,朱连奇,等.淇河流域生态系统服务权衡及空间分异机制的地理探测[J].生态学报, 2021, 41(19): 7568-7578.
- [20] 窦苗.基于 InVEST 模型的横断山区产水功能时空变化及其影响因素研究[D].兰州:兰州交通大学, 2018.

(下转第 144 页)

- of photosynthesis during abiotic stress-induced photoinhibition[J]. *Molecular Plant*, 2015, 8(9):1304-1320.
- [13] 崔亚坤, 王妮妮, 田中伟, 等. 分蘖和拔节期干旱对小麦植株氮素积累转运的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(3):322-328.
- [14] 努尔凯麦尔·木拉提, 杨亚杰, 帕尔哈提·阿布都克日木, 等. 小麦叶绿素含量测定方法比较[J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(9):156-159.
- [15] Lichtenthaler H K, Wellburn A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents [J]. *Biochemical Society Transactions*, 1983, 11(5):591-592.
- [16] 王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(3):301-308.
- [17] Li C Y, Jiang D, Wollenweber B, et al. Waterlogging pretreatment during vegetative growth improves tolerance to waterlogging after anthesis in wheat[J]. *Plant Science*, 2011, 180(5):672-678.
- [18] 马永鑫, 王西娜, 韦广源, 等. 减氮节水对宁夏引黄灌区春小麦光合特性与产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(10):75-84.
- [19] 闻磊, 张富仓, 邹海洋, 等. 水分亏缺和施氮对春小麦生长和水氮利用的影响[J]. *麦类作物学报*, 2019, 39(4):478-486.
- [20] Zivcak M, Brestic M, Balatova Z, et al. Photosynthetic electron transport and specific photoprotective responses in wheat leaves under drought stress[J]. *Photosynthesis Research*, 2013, 117(1):529-546.
- [21] 李英浩, 刘景辉, 赵宝平, 等. 干旱胁迫下腐植酸对燕麦叶绿素荧光特性的调控效应[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(4):26-33.
- [22] 龙燕, 马敏娟, 王英允, 等. 利用叶绿素荧光动力学参数识别苗期番茄干旱胁迫状态[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(11):172-179.
- [23] 刘兆新, 刘妍, 杨坚群, 等. 小麦花生一体化施肥对麦套花生生理特性及产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1):344-351.
- [24] 王利彬, 祖伟, 董守坤, 等. 干旱程度及时期对复水后大豆生长和代谢补偿效应的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(11):150-156.
- [25] 王欢, 苏文平, 赵鑫琳, 等. 不同水氮处理对冬播春小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. *麦类作物学报*, 2022, 42(11):1381-1390.
- [26] 张振, 张永丽, 石玉, 等. 灌溉量对冬小麦耗水量、旗叶衰老及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(3):393-402.
- [27] Xu Z Z, Zhou G S, Shimizu H. Are plant growth and photosynthesis limited by pre-drought following rewetting in grass? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(13):3737-3749.
- (上接第 133 页)
- [21] 山西省水利厅. 1990—2020 年山西省水资源公报[B]. <http://slt.shanxi.gov.cn/zncs/szye/szygb>.
- [22] Wei H J, Fan W G, Wang X C, et al. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: A review[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 25:15-27.
- [23] Li Z Z, Cheng X Q, Han H R. Analyzing land-use change scenarios for ecosystem services and their trade-offs in the ecological conservation area in Beijing, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(22):e8632.
- [24] 郭丽洁. 基于土地利用的新疆喀什地区生态系统服务权衡研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2021.
- [25] Xue C L, Chen X H, Xue L R, et al. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855:e158834.
- [26] Tao Y, Tao Q, Sun X, et al. Mapping ecosystem service supply and demand dynamics under rapid urban expansion: A case study in the Yangtze River Delta of China[J]. *Ecosystem Services*, 2022, 56:e101448.
- [27] 刘海龙, 丁娅楠, 王跃飞, 等. 山西省城镇化与生态系统服务时空相关性及其空间效应分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1):124-134.
- [28] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: A case study in Hulunbuir, China [J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39:e100984.
- [29] 许雪婷, 蔡冠清, 郝芳华, 等. 能源基地水资源利用现状及其承载力分析: 以山西省为例[J]. *环境污染与防治*, 2016, 38(6):69-74.
- [30] 杜阳, 武鹏林. 基于 DPSIR-PCA 的山西省水资源可持续性评价[J]. *人民黄河*, 2019, 41(4):42-45.
- [31] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7):2161-2171.
- [32] Yu H J, Xie W, Sun L, et al. Identifying the regional disparities of ecosystem services from a supply-demand perspective [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 169:e105557.
- [33] 朱月华, 侯宗东, 徐彩仙, 等. 基于生态系统服务供需关系的甘肃白龙江流域生态风险识别与管理[J]. *地理科学*, 2023, 43(3):423-433.