

饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素

高明会¹, 蔡海生¹, 张学玲², 余艳^{3,4}, 彭思卿^{3,4}

(1.江西农业大学 江西省自然资源利用科技与管理创新研究基地/南昌市鄱阳湖

生态重点实验室 富硒农业产业发展研究中心, 江西 南昌 330045; 2.江西农业大学

国家林草局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复实验室, 江西 南昌 330045; 3.自然资源部大湖流域国土空间生态保护修复工程技术创新中心, 江西 南昌 330045; 4.江西省国土空间调查规划研究院, 江西 南昌 330045)

摘要: [目的] 探究流域水源涵养服务供需的时空分异特征及主要驱动因素, 为流域水资源管理和优化配置及生态安全与保护提供科学依据和参考。[方法] 以饶河流域为研究区, 基于 InVEST 模型和多源数据定量评估研究区水源涵养服务供给、需求, 根据供需指数得到水源涵养服务供需匹配空间关系, 利用地理探测器进一步探究水源涵养服务供需关系空间异质性的主要驱动因素。[结果] ①2005—2020 年水源涵养服务供给和需求均呈现先增后减的趋势, 不同土地利用类型的水源涵养能力具有显著差异, 其中林地和草地水源涵养能力明显高于耕地和城乡工矿用地; ②水源涵养服务供给和需求空间分布具有明显的空间异质性和不匹配特征, 水源涵养供需匹配赤字区主要分布在西部鄱阳县、万年县、乐平市、昌江区和珠山区, 盈余区分布在北部浮梁县、东部婺源县、德兴市和弋阳县; ③自然因素中年潜在蒸散发、高程和林地覆盖率是影响水源涵养服务供需关系的主要因素, 同时, 城乡工矿用地和耕地覆盖率等人为因素起主导作用, 自然因素和人为因素交互作用, 加剧水源涵养服务供需失衡。[结论] 饶河流域水源涵养服务供需关系优化存在挑战, 未来应在该地区加快建立生态补偿机制, 优化林地水源涵养功能, 提高水源涵养服务供给, 提升水资源利用效率, 进一步实现区域水源涵养服务供需平衡, 促进生态系统与社会经济系统协调发展。

关键词: 水源涵养服务; 供需关系; InVEST 模型; 地理探测器; 饶河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)02-0389-11

中图分类号: S157, S727.21

文献参数: 高明会, 蔡海生, 张学玲, 等. 饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 389-399. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.02.039; Gao Minghui, Cai Haisheng, Zhang Xueling, et al. Driving factors and evolution of supply and demand of water conservation services in Raohe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 389-399.

Driving Factors and Evolution of Supply and Demand of Water Conservation Services in Raohe River Basin

Gao Minghui¹, Cai Haisheng¹, Zhang Xueling², She Yan^{3,4}, Peng Siqing^{3,4}

(1. Innovation Research Base of Natural Resources Utilization Technology and

Management of Jiangxi Province/Key Laboratory of Poyang Lake Ecology of Nanchang/

Development Research Center of Selenium-rich Agricultural Industry, Jiangxi Agricultural

University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland

Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 3. Technology Innovation Center

for Land Spatial Ecological Protection and Restoration in Great Lakes Basin, MNR, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 4. Jiangxi Provincial Institute of Land and Space Survey and Planning, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics and main driving factors of water supply and demand for water conservation services in a river basin were explored in order to provide a scientific basis and

收稿日期: 2023-11-20

修回日期: 2024-02-06

资助项目: 国家自然科学基金项目; 鄱阳湖流域土地集约利用与生态安全耦合发展及其综合响应机制研究(31660140); 亚热带山地草甸退化格局与土壤生态过程研究: 以江西省武功山为例(31560150); 江西省高校人文社科重点研究基地项目(2018-32); 江西省自然资源厅项目(QY20220084; JXYJY2023004); 自然资源部大湖流域国土空间生态保护修复工程技术创新开放课题基金项目(JXYJY2023004)

第一作者: 高明会(1997—), 女(汉族), 山东省济南市人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地资源管理。Email: gmh17865133307@163.com。

通信作者: 蔡海生(1972—), 男(汉族), 江西省万年县人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地生态方面的研究。Email: caihsh@263.net。

reference for water resource management and optimal allocation, ecological security, and protection. [Methods] The supply and demand of water conservation services in the Raohe River basin study area were quantitatively evaluated based on the InVEST model and multi-source data. A matching spatial relationship between supply and demand of water conservation services was obtained according to the supply and demand index, and the main driving factors of spatial heterogeneity of the supply and demand relationship of water conservation services were further explored by using geographic detectors. [Results] ① From 2005 to 2020, both the supply and demand of water conservation services showed a trend of first increasing and then decreasing, and the water conservation capacity of different land use types had significant differences, among which the water conservation capacities of forest land and grassland were significantly higher than those of cultivated land and urban and rural industrial and mining land. ② The spatial distribution of supply and demand of water conservation services had obvious spatial heterogeneity and mismatch characteristics. The matching deficit area of supply and demand of water conservation services was mainly located in Poyang, Wannian County, Leping City, Changjiang, and Zhushan District in the west, while the surplus area was located in Fuliang County in the north, and in Wuyuan County, Dexing City, and Yiyang County in the east. ③ Among the natural factors, annual potential evapotranspiration, elevation and forest coverage rate were the main factors affecting the supply and demand relationship of water conservation services. At the same time, human factors such as the coverage rate of industrial and mining land and cultivated land in urban and rural areas played a leading role. The interaction between natural factors and human factors aggravated the imbalance between supply and demand of water conservation services. [Conclusion] There were challenges in the optimization of supply and demand of water conservation services in the Raohe River basin. In the future, the establishment of an ecological compensation mechanism should be accelerated in this area, the function of forest water conservation should be optimized, the supply of water conservation services should be increased, and the efficiency of water resource utilization should be increased. Efforts should be made to balance supply and demand of regional water conservation services, and to promote the coordinated development of ecological systems and socio-economic systems.

Keywords: water conservation services; supply and demand relationship; InVEST model; geographic detector; Raohe River basin

生态系统服务是指人类直接或间接的从生态系统中获取的惠益,是连接自然生态和社会经济的重要桥梁^[1]。水源涵养是一项关键的生态系统调节服务,指一定时空范围内生态系统对降水的拦截和维持^[2],具有拦蓄降水、调节径流、净化水质等作用。但随着社会经济发展,人类活动对生态系统服务功能的影响程度不断加深,水源涵养服务功能不断退化,同时在水资源短缺,水质恶化,地下水量锐减,洪涝灾害频发和人口规模不断增长的背景下^[3],水资源供需矛盾加剧^[4],使得水源涵养服务功能空间制图和定量评估成为研究的热点。现有的水源涵养服务相关研究多针对水源涵养功能进行定量评估,即对水源涵养服务供给量的空间分异规律研究,较少考虑人类社会对水资源的需求,随着人口规模和社会经济的发展,单从供给方面测算水源涵养服务不能较好地满足区域生态安全与经济可持续发展的需要。因此,本研究进行水源涵养服务供给和需求测算,并对影响供需平衡的因素进行分析。目前,针对水源涵养服务供给的相关研

究,学者运用 SWAT, MIKESHE, InVEST 等模型对水源涵养服务供给进行定量和空间可视化评估^[5-7]。相对其他模型,InVEST 模型因其所需参数少、数据要求低、全球通用、综合考虑土地利用类型、气候、地形、植被因素等优势已被广泛应用于生态系统服务评估^[8],并取得了良好的效果。水源涵养服务需求量模拟和测算研究中,大部分学者^[9-11]用农业用水、工业用水和生活用水的总量表征,基于社会经济数据、土地利用数据、人口和 GDP 栅格密度数据等进行用水需求空间分配。同时,针对水源涵养服务供需平衡的影响机制研究,相关学者多采用相关性分析、聚类分析及主成分分析等^[12-14]传统方法探究供需关系的驱动因素,而地理探测器不受限于遵循传统统计方法的假设^[15-16],能够从地理分异角度更全面地解释空间分异的多种驱动机制,在空间分异特征及归因方面得到了广泛应用,因此,本研究利用地理探测器对水源涵养服务供需关系的空间异质性进行分析,进而探究影响供需平衡的主导因素,从而为流域水资源合

理利用及防范生态风险政策制定提供参考。

饶河流域是江西省重要的生态屏障,同时也是重要的水源地之一,生态环境较为脆弱,洪涝干旱灾害易发。一方面,矿山开发、工业建设、农业生产等人类活动造成该区域水源涵养生态系统服务功能不断退化;另一方面,社会经济发展和人口集聚对水资源需求持续增加。已有学者对饶河流域开展了土地利用情景模拟^[17]、国土空间生态质量评估等^[18]研究,未从供需角度对水源涵养服务进行探索。因此,本研究基于 InVEST 模型模拟修正得到饶河流域水源涵养量,根据人口密度空间分布数据和实际用水量数据进行水资源需求量空间分配,进一步计算供需指数识别水源涵养供需失衡区域,探究目前水源涵养服务能否满足人类需求,利用地理探测器分析影响供需失衡的主导因素,进而在供需赤字区域开展生态修复,有效提升水源涵养功能,在供需盈余区协调经济与生态建设,为维护饶河流域生态安全,优化水资源管理,促进区域可持续发展提供科学依据。

1 研究区概况

位于江西省东北部的饶河是长江流域鄱阳湖水系五大河流之一。饶河流域的范围在东经 116°30′—118°13′和北纬 28°34′—30°02′之间,涉及浮梁县、婺源县、德兴市、弋阳县、万年县、鄱阳县、乐平市等地区。为全面分析流域水源涵养供需状况和便于流域水资源管理,本研究以所涉县市的 127 个乡镇为研究区,面积约为 1715 966 hm²。2020 年,研究区土地利用类型以林地为主,面积所占比例在 60%以上;其次是耕地,面积比例 26%;建设用地和草地的面积占比较小,分别为 3.36%,2.83%。浮梁县、婺源县和德兴市森林资源丰富,林地面积占比均在 75%以上;珠山区和昌江区土地利用则以林地和建设用地为主;乐平市和万年县林地面积占比在 50%左右,耕地面积占比在 40%左右;鄱阳县位于下游平原地区,耕地面积所占比例最大,约为 42%,林地次之,约为 32%,水域面积占比约为 18%;弋阳县林地面积所占比例为 67%,耕地面积约 24%。

2 数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究收集土地利用、气象、土壤、人口、数字高程模型(DEM)等基础数据进行饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素分析,数据来源和说明详见表 1^[19-22]。数据均转换为统一的投影坐标系 WGS_1984_Albers,重采样为 30 m×30 m 分辨率。

2.2 研究方法

2.2.1 产水量模拟 本研究采用 InVEST 模型产水模块评估饶河流域水资源供给量变化及空间分布格局。该模块是基于水量平衡原理,以栅格单元内的降水量减去实际蒸散量后的产水量即为水资源供给量,包括地表产流、土壤含水量、枯落物持水量和冠层截留等。计算公式如下:

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

式中:Y_{xj}为土地利用类型 j 在栅格单元 x 的年产水量(mm);AET_{xj}为土地利用类型 j 在栅格单元 x 的年实际蒸散量(mm);P_x为栅格单元 x 的年降水量(mm)。

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

式中:R_{xj}为无量纲的 Budyko 干燥指数;ω_x为描述自然气候—土壤属性的非物理参数。

$$\omega_x = Z \frac{AWC_x}{P_x} \quad (3)$$

$$R_{xj} = \frac{Kc_j \times ET_{0xj}}{P_x} \quad (4)$$

式中:AWC_x为栅格单元 x 的植物可利用含水量(mm);Z为 Zhang 系数,又称季节常数,表征研究区多年平均降水分布和其他水文地质特征,取值范围在 1~30 之间;Kc_j为土地利用类型 j 的植被蒸散系数;ET_{0xj}为参考蒸散量。

$$AWC_x = \min(\text{soil_depth}, \text{root_depth})PAWC \quad (5)$$

$$PAWC = 54.509 - 0.132 \times \text{sand}\% - 0.003 \times (\text{sand}\%)^2 - 0.055 \times \text{silt}\% - 0.006 \times (\text{silt}\%)^2 - 0.738 \times \text{clay}\% + 0.007 \times (\text{clay}\%)^2 - 2.688 \times \text{OM}\% + 0.501 \times (\text{OM}\%)^2 \quad (6)$$

式中:soil_depth 为土层深度;root_depth 为根系深度;PAWC 为植物可利用含水量;sand%为土壤砂粒含量;silt%为土壤粉粒含量;clay%为土壤黏粒含量;OM%为土壤有机质含量。

2.2.2 水源涵养服务供给量计算 利用 InVEST 模型计算的产水量结果,根据地形指数、土壤饱和和导水率、流速系数进行修正后,得到水源涵养供给量,计算公式^[23-25]为:

$$WR = \min\left(1, \frac{249}{V_{el}}\right) \times \min\left(1, 0.9 \times \frac{TI}{3}\right) \times \min\left(1, \frac{K_{soil}}{300}\right) \times Y \quad (7)$$

式中:WR 为水源涵养量(mm);Vel 为流速系数;TI 为地形指数,无量纲; K_{soil} 为土壤饱和导水率(mm/d),利用土壤砂粒、黏粒、砾石和土壤有机质含量,通过 SPAW 模型计算获得;Y 为产水量(mm)。

$$TI = \log\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \quad (8)$$

式中: α 为单位等高线的上坡集水区面积; β 为局部地段坡度。

表 1 研究数据来源及参数处理

Table 1 Research data sources and parameter processing

数据名称	数据描述	数据来源与处理
年降水量	年降水量/mm,栅格地图,1 km 分辨率	国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)的《中国 1 km 分辨率年降水量数据(2001—2020 年)》
年潜在蒸散发	潜在蒸散发/mm,栅格地图,1 km 分辨率	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)的《中国 1 km 逐月潜在蒸散发数据集(1990—2020)》
土层深度	基岩深度/mm,栅格地图,100 m 分辨率	《Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters》 ^[19]
土壤质地	土壤砂粒、粉粒、黏粒和土壤有机质含量/%,栅格地图,1 km 分辨率	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn/portal/)的《基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集》
土地利用	土地利用类型划分为 6 个一级类型以及 25 个二级类型,栅格地图,30 m 分辨率	中国科学院地理科学与资源研究所环境科学与数据中心平台(https://www.resdc.cn/)
DEM	数字高程模型/m,栅格地图,12.5 m 分辨率	中国科学院地理科学与资源研究所环境科学与数据中心平台(https://www.resdc.cn/)
人口密度	人口密度分布/(人/hm ²),栅格地图,100 m 分辨率	Worldpop(https://www.worldpop.org)
NDVI	归一化植被指数,栅格地图,30 m 分辨率	中国科学院地理科学与资源研究所环境科学与数据中心平台(https://www.resdc.cn/)
GDP	国内生产总值/(万元/km ²),栅格地图,1 km 分辨率	中国科学院地理科学与资源研究所环境科学与数据中心平台(https://www.resdc.cn/)及相关文献 ^[20]
年平均气温	年均气温/℃,栅格地图,1 km 分辨率	国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn)《中国 1 km 分辨率逐月平均气温数据集(1901—2021 年)》
年用水量	农业用水、工业用水、生活用水量等年用水总量/m ³ ,统计数据	《2005—2020 年江西省水资源公报》及《2008—2020 年江西省水土保持公报》
土壤饱和导水率	水源涵养参数	基于土壤质地,利用 SPAW 模型计算所得
地形指数	水源涵养参数	基于 DEM 数据,利用 ArcGIS 软件,根据土壤百分比坡度和汇水面积计算
植物可利用含水量	InVEST 模型产水模块参数	根据周文佐学者提出的土壤质地及土壤有机质含量的非线性拟合模型 ^[21] 计算得出,见公式(6)
Z 系数	InVEST 模型季节常数	基于《江西省水资源公报》中研究区径流量数据得到多年平均自然径流量,反复调整 Z 参数,与模拟的平均产水量进行比较,确定 Z=4.96 时,模型拟合效果最佳 ^[22] 。

2.2.3 水源涵养服务需求量计算 水资源需求量用人类社会实际用水量表征,基于研究区 2005,2010,2015 和 2020 年 4 期用水总量统计数据,将人均用水量数据与栅格化人口密度数据相乘,得到各年份水源涵养服务需求空间分布图。计算公式为:

$$WN_x = \rho_x \cdot y \quad (9)$$

式中:WN_x 栅格单元 x 的水资源需求量(mm); ρ_x 为人口密度(人/hm²);y 为人均水资源需求量(m³/人)。

2.2.4 水源涵养服务供需匹配 本研究用供需指数^[26]描绘研究区不同时期水源涵养服务实际供给和人类需求之间的平衡状态。

$$SDI_x = \frac{WR_x - WN_x}{WR_x + WN_x} \quad (10)$$

式中:SDI_x 为栅格单元 x 的水源涵养服务供需指数;WR_x 为栅格单元 x 的水源涵养服务供给量;WN_x 为

栅格单元 x 的水源涵养服务需求量。当 SDI>0 时,代表供过于求,为盈余状态;当 SDI=0 时,代表供给等于需求,为平衡状态;当 SDI<0 时,代表供不应求,为赤字状态。

水源涵养服务供需指数分级标准如表 2 所示,将研究区水源涵养服务供需关系类型分为 6 类:严重赤字、中度赤字、轻度赤字、轻度盈余、中度盈余和高度盈余。

表 2 水源涵养服务供需(SDI)匹配分级标准

Table 2 Grading standards for supply and demand matching of water source conservation services (SDI)

SDI 指数范围	等级	SDI 指数范围	等级
-1≤SDI<-0.61	严重赤字	0≤SDI<0.48	轻度盈余
-0.61≤SDI<-0.23	中度赤字	0.48≤SDI<0.76	中度盈余
-0.23≤SDI<0	轻度赤字	0.76≤SDI<1	高度盈余

2.2.5 地理探测器 地理探测器是一种探测空间分异性及定量解释其驱动因子的工具。因子探测器主要探测各变量 X 对变量 Y 空间分异的解释程度, q 值越大, 自变量对因变量空间分异性的解释程度越强, 反之则越弱^[27]。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_{2h}}{N \sigma_2} \quad (11)$$

式中: q 值为影响因子解释程度, 取值范围为 $[0, 1]$; $h = 1, 2 \dots L$ 表示变量 X 和变量 Y 的分层, 即分类或分区; N_h, N 为层 h 和全区的单元数; σ_{2h}, σ_2 为层 h 和

全区 Y 值的方差。

交互作用探测器用于分析不同因子之间的交互作用, 交互作用的判断方式详见表 3。本研究以 127 个乡镇为空间分异单元, 饶河流域水源涵养供需指数为因变量, 选取年降水量、年潜在蒸散发、年均气温、归一化植被指数、耕地覆盖率、林地覆盖率、草地覆盖率、城乡工矿用地覆盖率、高程、国内生产总值、人口密度 11 个因子变量进行地理探测。其中, 按照变量离散化的要求, 将上述因子进行重分类后, 导入地理探测器运行数据。

表 3 地理探测器交互作用类型

Table 3 Types of Geodetector Interaction

交互作用类型	判断准则
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子交互增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$
相互独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$

3 结果与分析

3.1 水源涵养服务供给分析

3.1.1 水源涵养服务供给时空变化特征 根据 InVEST 模型模拟计算研究区多年产水量, 经过修正后得到研究区水源涵养服务供给空间分布情况。研究区 2005—2020 年单位面积的平均水源涵养深度总体呈上升趋势, 在 2015—2020 年期间平均水源涵养深度略有下降。2005—2020 年多年平均水源涵养深度为 181.97 mm, 多年平均水源涵养供给总量为 $3.12 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其中 2005 年平均水源涵养深度 168.31 mm, 水源涵养供给总量为 $2.89 \times 10^9 \text{ m}^3$; 2015 年平均水源涵养深度为 194.62 mm, 相较于 2005 年单位面积水源涵养深度增加了 26.30 mm, 水源涵养供给总量增加了 $4.51 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2020 年平均水源涵养深度为 191.33 mm, 水源涵养供给总量为 $3.28 \times 10^9 \text{ m}^3$, 相较于 2015 年水源涵养供给总量减少了 $5.60 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。从空间上看, 研究区多年水源涵养深度均呈现由东向西逐渐递减的空间分布特征(图 1)。水源涵养深度高值区往往沿水源涵养深度极高值区边界分布, 呈现环状分布特征。水源涵养极高值、高值区域广泛分布, 水源涵养深度极低值和低值区则集中连片分布于中下游地区。水源涵养深度中等及中等偏上值区主要分布在研究区上游地区。2005 年, 水源涵养深度极高值区与和高值区在研究区内广泛分布, 其中东部和南部集中连片, 面积较大,

呈现块状、团状, 相较东部及南部区域, 西部和西南部密集程度较高, 面积较小, 呈现点状、碎片式, 北部浮梁县和东北部婺源县分布零散, 面积中等, 呈线状、条状分布。水源涵养低值区和极低值区主要分布在下游鄱阳县、万年县和乐平市, 其他区县带状分布, 较为均衡。水源涵养能力中等及偏上的区域大量分布于东部上游地区, 即浮梁县、婺源县和德兴市, 南部弋阳县中部昌江区、珠山区及乐平市少量且零散分布。2010 年的水源涵养深度空间分布与 2005 年具有较强的一致性, 东部区域水源涵养深度普遍在 72.32 mm 以上, 东南区域水源涵养深度以 472.50~1 502.36 mm 为主; 西部地区水源涵养深度在 72.32 mm 以下, 部分地区水源涵养深度在 142.94~1 502.36 mm 之间, 呈线状零散化分布于中部和西北部地区。2015 年水源涵养深度空间分布特征产生显著变化。与 2005 和 2010 年相比, 研究区西部极低值和低值集聚区显著缩小; 上游地区浮梁县、婺源县和德兴市中等值面积大幅度缩减, 中等偏上值面积增加; 水源涵养服务供给高值和极高值面积略有增加, 增加以高值区为主。2020 年水源涵养功能小幅度降低。中下游地区丽阳镇、浯口镇、三庙前乡、昌洲乡、湖云乡、石镇镇 6 个乡镇具有降低趋势。2015—2020 年期间, 水源涵养深度空间分布发生显著变化, 水源涵养能力提升, 上游水源涵养深度提高至 84.09 mm 以上, 下游水源涵养深度由以 1.70~72.32 mm 为主转变为 37.01~84.09 mm 为主。

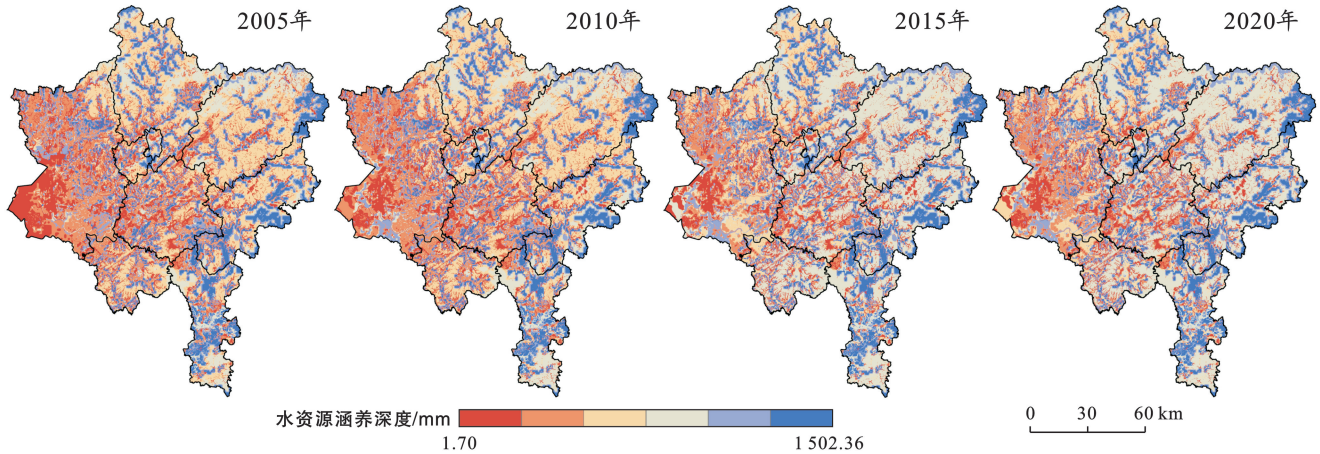


图 1 2005—2020 年饶河流域水源涵养服务供给空间分布

Fig.1 Spatial distribution of water source conservation service supply in Raohe River basin from 2005—2020

3.1.2 不同土地利用类型的水源涵养深度 利用 ArcGIS 10.5 软件中分区统计工具,分别计算不同土地利用类型的水源涵养量,并统计 2005—2020 年水源涵养量变化(表 4)。不同土地利用类型单位面积水源涵养深度存在较大差异,即水源涵养能力不同。

研究期间,研究区不同土地利用类型单位面积水源涵养深度不断变化,但总体上呈现相似的趋势,计算四期不同土地利用类型单位面积的水源涵养深度的均值,得到不同土地利用类型水源涵养能力高低:林地 > 草地 > 耕地 > 未利用地 > 城乡工矿用地 > 水域。

表 4 2005—2020 年饶河流域不同土地利用类型水源涵养量

Table 4 Water conservation capacity of different land use types in Raohe River basin from 2005—2020

土地利用类型	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	单位面积 涵养深度/mm	涵养总量/ 10^6 m^3	单位面积 涵养深度/mm	涵养总量/ 10^6 m^3	单位面积 涵养深度/mm	涵养总量/ 10^6 m^3	单位面积 涵养深度/mm	涵养总量/ 10^6 m^3
林地	224.47	616.77	240.18	646.39	266.54	716.88	261.95	696.70
草地	175.24	105.13	175.57	83.27	194.39	92.24	192.01	93.89
耕地	92.76	129.18	89.14	111.74	101.46	132.50	105.31	142.83
水域	32.18	29.82	61.11	56.63	83.98	77.64	78.45	72.60
城乡工矿用地	76.12	27.02	74.65	33.21	81.36	40.23	78.13	44.89
未利用地	74.11	0.58	65.46	0.54	92.25	0.76	83.88	0.69

3.2 水源涵养服务需求时空变化特征

水源涵养服务需求多年平均深度为 88.96 mm, 多年平均需求总量为 $1.53 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。2005—2015 年, 研究区水源涵养服务需求量不断增加, 但在 2015—2020 年期间小幅度降低。在 2005—2015 年期间, 水源涵养服务需求平均深度由 78.35 mm 增加了 17.72 mm, 2015 年水源涵养服务需求深度为 96.07 mm, 水源涵养需求总量为 $1.65 \times 10^9 \text{ m}^3$, 2020 年水源涵养需求深度为 94.64 mm, 水源涵养需求总量为 $1.62 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。水源涵养服务需求空间分布呈西南高东北低的空间分布特征(图 2)。整体上, 水源涵养需求高值区集中连片分布, 主要分布于饶河流域下游平原地区, 水网密布, 地势平坦, 土壤肥沃, 人口密集, 水资源需求量大; 水源涵养需求低值区主要分布饶河流中上

游地区, 地形以山地、丘陵为主, 植被覆盖率高, 人口密度较低; 珠江区和昌江区是景德镇行政发展中心, 产业发展密集, 水资源需求量一直处于高值区。2005 年, 水源涵养需求高值区块状分布, 高需求地区集中于鄱阳县南部、万年县北部、昌江区、弋阳县南岩镇、德兴市街道及泗州镇、婺源县街道及紫阳镇。2010 年, 水源涵养需求高值区在块状分布基础上点状扩张, 东北部地区水源涵养高值区增加, 包括西湖乡、经公桥镇、勒功乡、浙源乡、清华镇、沱川乡、思口镇、名口镇、十里岗镇等乡镇。2015 年, 水源涵养高需求区域分布点状特征逐渐减弱, 呈现显著线状分布, 大部分以水体为中心扩张。2020 年相较 2015 年, 水源涵养需求高值区域变化不显著, 需求中低值区域略有扩张。

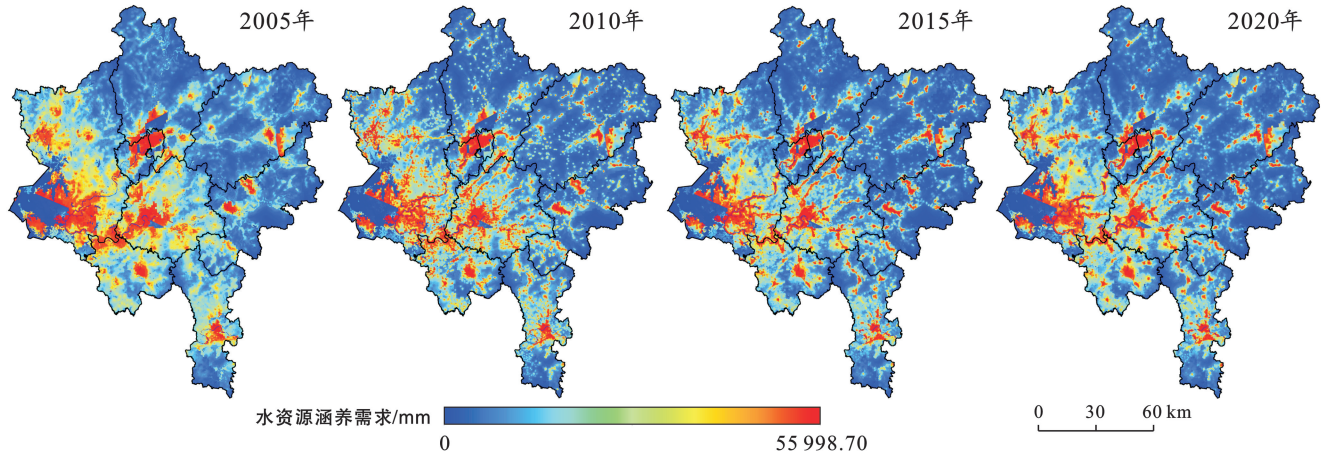


图 2 2005—2020 年饶河流域水源涵养服务需求空间分布

Fig.2 Spatial distribution of water conservation service demand in Raohe River basin from 2005—2020

3.3 水源涵养供需匹配分析

根据表 5 可知,中度赤字面积持续减少,轻度赤字、轻度盈余和中度盈余面积先减少后增加,高度盈余面积先增加后减少,严重赤字面积波动减少。初期(2005 年)中度赤字面积为 2 095.27 km²,15 a 减少了 320.17 km²。轻度赤字面积 2005—2010 年减少了 121.02 km²,2010—2020 年增加了 39.09 km²。轻度盈

余面积由 3 354.70 km² 不断降低至 2 964.79 km²,在 2020 年略有回升,增加了 0.80 km²。中度盈余面积 2005—2015 年减少了 158.25 km²,在 2020 年增加了 122.32 km²。高度盈余面积在 2005—2015 年期间,面积增加了 1 014.04 km²,后 5 a 减少了 146.49 km²。严重赤字面积先由 1 890.32 km² 增加至 1 991.42 km²,2015 年减少至 1 819.91 km²,2020 年有所回升,增加了 30.02 km²。

表 5 2005—2020 年饶河流域水源涵养服务供需匹配类型面积

Table 5 Matching type area of supply and demand for water source conservation services in Raohe River basin from 2005—2020 km²

年份	严重赤字	中度赤字	轻度赤字	轻度盈余	中度盈余	高度盈余
2005	1 890.32	2 095.27	1 207.34	3 354.70	3 977.06	4 634.61
2010	1 991.42	1 920.13	1 086.32	2 971.01	3 957.83	5 232.59
2015	1 819.91	1 786.80	1 120.36	2 964.79	3 818.82	5 648.64
2020	1 849.93	1 775.10	1 125.41	2 965.59	3 941.14	5 502.15

研究区水源涵养服务供需匹配具有明显的空间异质性,如图 3 所示。2005—2020 年期间,水源涵养服务供需匹配空间分布整体上具有一致性,水源涵养供需匹配赤字区分布在西部、西南部和中部,水源涵养供需匹配盈余区分布在东部、北部和东南部。以西部鄱阳县珠湖乡、团林乡、鄱阳镇、三庙前乡和莲湖乡,西南部弋阳县陈营镇,中部昌江区和珠江区,乐平市乐港镇、接渡镇、街道,东部德兴市街道、泗洲镇,东北部婺源县街道、紫阳镇六处严重赤字区为中心,中等赤字和轻度赤字集中分布在其四周,呈现渐变式变化。其他地区以盈余为主,赤字呈线状、团状零散分布。2005—2010 年,轻度盈余区域和高度盈余区域面积变化较大,其中轻度盈余区域面积缩减,主要转换为中度盈余,高度盈余区域面积扩张,主要为中度盈余区域转换而来;2010—2015 年,高度盈余区域持续扩张,中度盈余区域大面积转换为高度盈余区域,严重赤字及中等赤字面积缩减,主要转化为中等赤字

和轻度赤字区;2015—2020 年,高度盈余区域大幅度收缩,主要降低为中度盈余区,严重赤字区域有所扩张主要由中度赤字区域转化。

3.4 驱动因素分析

3.4.1 单因子分析 地理探测器的因子探测结果(表 6)显示,各因子对研究区水源涵养服务供需匹配空间分异的解释力具有显著差异,不同阶段各因子对水源涵养服务供需匹配空间异质性的解释程度发生明显变化。2005 年,城乡工矿用地覆盖率、林地覆盖率、耕地覆盖率、高程、人口密度、年潜在蒸散发 6 种因子的解释力突出, q 值在 50% 以上。人为因素中的城乡工矿用地覆盖率解释力最高($q=73.69\%$),自然因素中林地覆盖率解释力最高, q 值为 64.08%。2005—2010 年,年降水量、年潜在蒸散发、归一化植被指数和国内生产总值因子解释力增强,其他因子解释力减弱,其中年潜在蒸散发因子解释力显著增强, q 值增加 10% 以上,城乡工矿用地覆盖率因子解释力

显著减弱, q 值减少 7.31%。2015 年, 年降水量因子解释力持续增强, 年均气温、高程、林地覆盖率、草地覆盖率、耕地覆盖率、城乡工矿用地覆盖率因子解释力持续减弱。年潜在蒸散发、归一化植被指数、国内生产总值因子解释力, 在 2005—2015 年期间, 呈现先增强后减弱的趋势, 而人口密度因子解释力呈现先减弱后增

强的趋势。2015—2020 年, 年均气温、年潜在蒸散发、高程、林地覆盖率解释力基本保持不变。2005—2020 年期间, 林地覆盖率和城乡工矿用地覆盖率对水源涵养服务供需匹配的空间异质性解释力最高, 为主导驱动因子; 年潜在蒸散发、高程、归一化植被指数、人口密度及耕地覆盖率的解释力较高, q 值在 50% 以上。

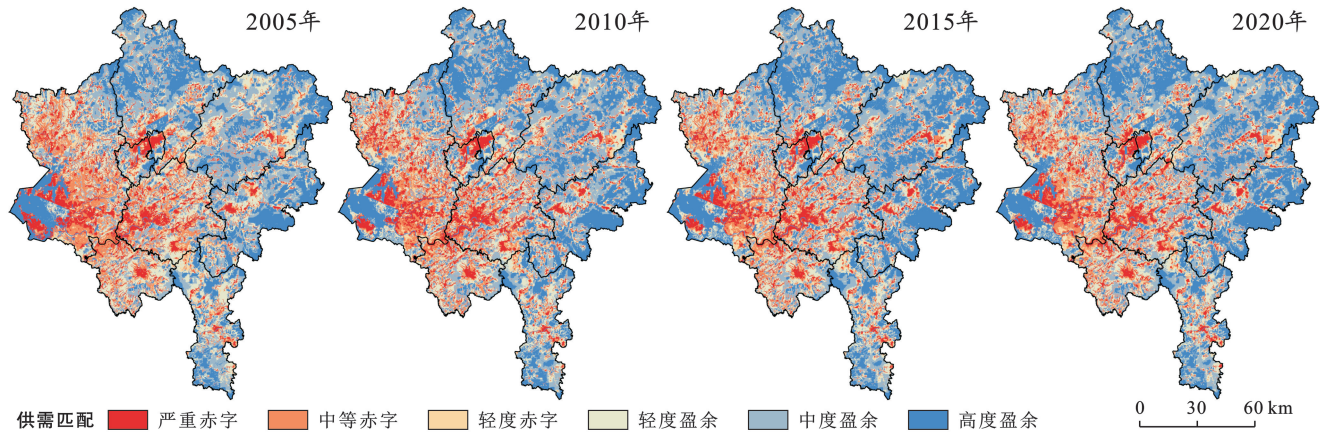


图 3 2005—2020 年饶河流域水源涵养服务供需匹配

Fig.3 Supply and demand matching of water source conservation services in Raohe River basin from 2005—2020

表 6 2005—2020 年饶河流域水源涵养供需关系因子探测结果

Table 6 Detection results of water source conservation supply demand relationship factors in Raohe River basin from 2005—2020

影响因素	因子变量	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
自然因素	X_1 年降水量	0.107 0*	0.177 6***	0.184 1***	0.121 6*
	X_2 年均气温	0.462 4***	0.431 1***	0.396 3***	0.397 9***
	X_3 年潜在蒸散发	0.507 6***	0.631 6***	0.508 3***	0.496 8***
	X_4 归一化植被指数	0.493 2***	0.519 2***	0.485 4***	0.545 9***
	X_5 高程	0.544 2***	0.543 1***	0.512 3***	0.511 2***
	X_6 林地覆盖率	0.640 8***	0.611 2***	0.596 3***	0.607 6***
	X_7 草地覆盖率	0.150 2**	0.113 1*	0.096 8*	0.112 0*
人为因素	X_8 耕地覆盖率	0.566 2***	0.510 7***	0.481 3***	0.459 1***
	X_9 城乡工矿用地覆盖率	0.736 9***	0.663 8***	0.570 5***	0.545 5***
	X_{10} 国内生产总值	0.038 9	0.070 2	0.057 9	0.312 4***
	X_{11} 人口密度	0.527 4***	0.506 0***	0.521 1***	0.485 5***

注: ***, **, * 分别表示在 $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$ 水平差异显著。

3.4.2 交互作用分析 2005—2020 年多因子交互探测结果如图 4 所示。研究区水源涵养服务供需匹配关系的空间格局是多种因子相互联系共同作用的结果, 因子变量之间的交互作用的影响程度远大于单一因子作用的影响程度, 且表现为双因子增强和非线性增强两种方式。

研究期间 (2005—2020 年), 不同组合对水源涵养服务供需匹配关系的空间格局的影响程度发生显著变化。林地覆盖率和城乡工矿用地覆盖率两个因子作为影响水源涵养服务供需匹配空间异质性的主导因子, 与其他因子的交互作用呈现双因子增强效

果, 同时在交互组合中起重要的主导作用。2005 年、2010 年、2015 年及 2020 年交互解释力最高的组合分别为: 城乡工矿用地覆盖率和耕地覆盖率 (87.01%)、城乡工矿用地覆盖率和林地覆盖率 (84.08%)、林地覆盖率和年降水量覆盖率 (80.18%) 及城乡工矿用地覆盖率和林地覆盖率 (83.21%)。林地和城乡工矿用地分别作为水源涵养服务供给和需求主要来源, 其覆盖率极大程度影响了水源涵养供需匹配空间格局。城乡工矿用地覆盖率与其他因子交互作用的解释力减弱趋势显著: 草地覆盖率与城乡工矿用地覆盖率的交互作用解释力减弱程度最大, 减少了 16.31%; 国

内生产总值与城乡工矿用地覆盖率的解释力减弱了 15.87%; 人口密度、年降水量和城乡工矿用地覆盖率的交互作用解释力减弱程度在 15% 以上; 年均气温、年潜在蒸散发与城乡工矿用地覆盖率的组合解释力分别减弱了 12.39%, 10.15%。国内生产总值与草地覆盖率的解释程度呈上升趋势, 增加了 11.72%。林

地覆盖率和归一化植被指数的交互作用解释力小幅度减弱。

人为因素和自然因素共同作用决定水源涵养服务供需匹配关系的空间分布格局, 近年来人为因素和自然因素的关系更加紧密, 对水源涵养服务供需关系空间格局的影响程度作用机制更加复杂。

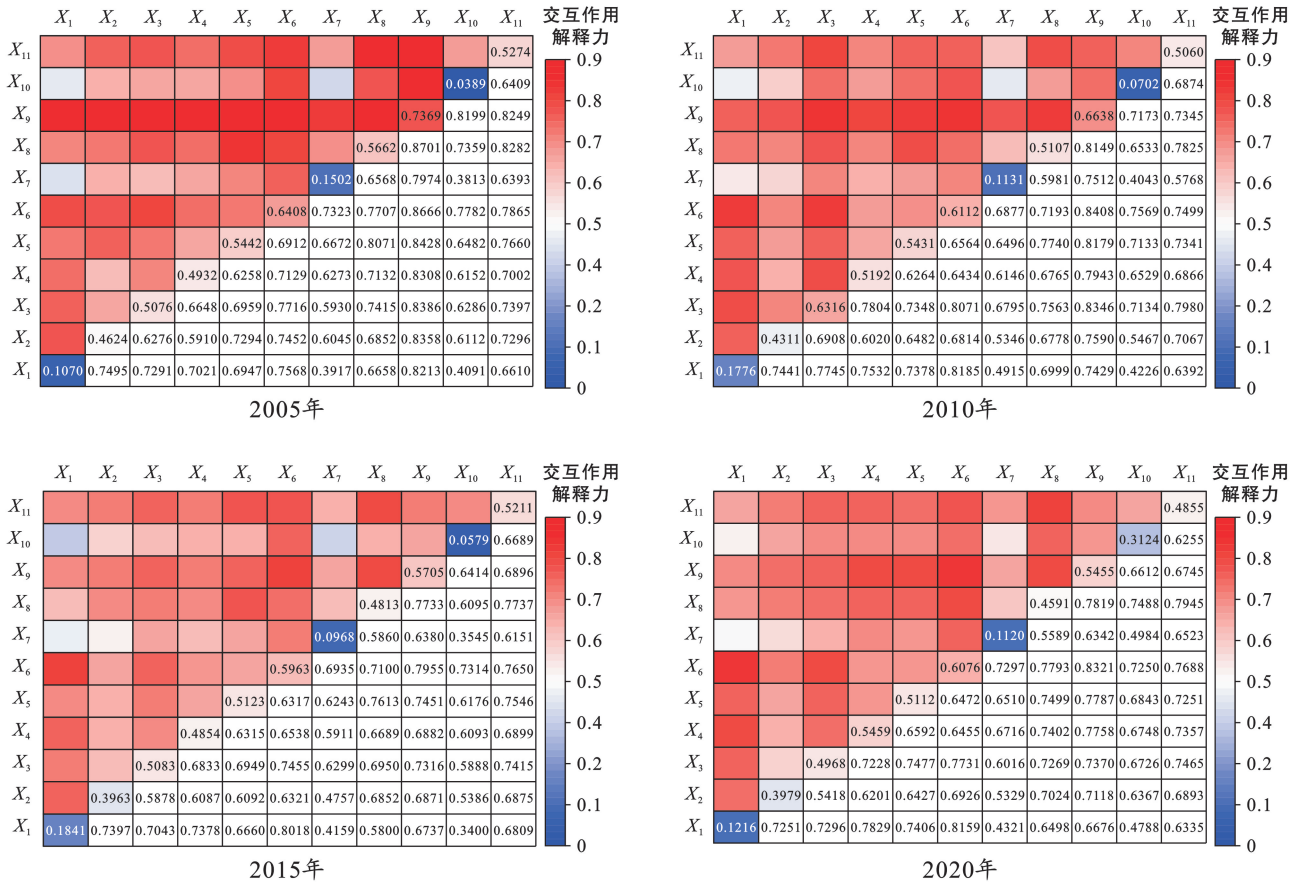


图 4 2005—2020 年饶河流域水源涵养服务供需匹配空间分布驱动因子交互作用

Fig.4 Interaction of driving factors for spatial distribution of supply and demand matching in water source conservation services in Raohe River basin from 2005—2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究基于 InVEST 模型对饶河流域水源涵养服务供给量化, 运用以人定需的方法量化水源涵养需求, 从供给和需求角度分析流域水源涵养服务空间分布特征, 识别供需失衡区域, 弥补了以往研究侧重服务供给而忽略人类需求的不足, 利用地理探测器分析供需失衡的主导因素, 为解决流域水资源供需矛盾提供科学依据。本研究结果表明, 饶河流域上下游地区水源涵养服务供需关系呈现显著差异, 下游地区水源涵养服务供需赤字问题严重。土地利用和气候变化是流域水源涵养供需空间异质性的主导因素, 这与前人区域产水量及水源涵养服务供给驱动因素的研究

结果^[28-30]基本一致, 说明水源涵养服务供需关系空间异质性受供给侧变化影响较大。此外, 林地覆盖率和城乡工矿用地覆盖率交互作用解释力最高, 在流域下游水源涵养供需赤字区域应限制建设用地扩张, 严禁建设用地占用林地, 促进流域水源涵养服务实现供需平衡。

饶河流域水源涵养服务供需演变及驱动因素的研究过程中存在很多不足。一方面, 利用 InVEST 模型模拟研究区产水量, 在输入的参数中土壤基础数据参考世界土壤数据库数据, 精度不高, 且随时间变化土壤理化性质可能会发生变化。通过多次校验得到 Z 系数为 4.96, 基本符合区域的实际情况, 但该值的精度是否符合饶河流域, 还需在今后的研究中结合大量实测数据进一步验证。另一方面, 本研究对

2005—2020年期间饶河流域水源涵养供需关系演变和驱动因素进行分析,主要研究过去的水源涵养服务能否满足人类需求及失衡程度。但对未来流域水源涵养服务在不同发展情景下供需关系演变趋势以及哪种情景下水源涵养功能最大化提升人类福祉没有进一步研究,今后应加强这方面的研究工作。

4.2 结论

(1) 研究区水源涵养服务供给总量和需求总量均在2005—2015年稳定上升,2015—2020年小幅度下降。水源涵养服务供给呈由东向西逐渐递减的空间分布特征,而需求空间格局呈西南高东北低的分布特征。2010年以来,上游森林地区水源涵养高供给范围不断向外扩张,下游地区低供给面积不断向内缩减。

(2) 不同土地利用类型水源涵养量具有显著差异,其中林地和草地的水源涵养能力突出,单位面积水源涵养深度在180 mm以上,城乡工矿用地和水域的水源涵养能力最差,单位面积水源涵养深度不足80 mm。饶河上游地区土地利用以林地为主,水源涵养服务供给量高,中下游地区城乡工矿用地和耕地集中分布,水源涵养服务供给不足。

(3) 研究区水源涵养服务供需匹配具有明显的空间异质性,供需严重失衡。上游地区林地覆盖率高,人口数量较少,水源涵养供需关系以盈余为主,中下游地区人口密集,水源涵养服务供需高度赤字,供需严重失衡。

(4) 以乡镇为单元,利用地理探测器对水源涵养服务供需关系驱动因子进行探测,结果显示,林地覆盖率和城乡工矿用地覆盖率是供需失衡的主导因素,解释力在60%以上,因子交互作用对供需关系的解释力增强,表明水源涵养供需关系受多重因素共同影响。

参考文献(References)

- [1] Nassl M, Löffler J. Ecosystem services in coupled social-ecological systems: Closing the cycle of service provision and societal feedback [J]. *Ambio*, 2015, 44(8): 737-749.
- [2] Xu Jie, Xiao Yu, Xie Gaodi. Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 362-372.
- [3] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远, 等. 中国草地生态系统水源涵养服务时空变化[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5): 256-260.
- Wu Dan, Shao Quanqin, Liu Jiyan, et al. Spatiotemporal dynamics of water regulation service of grassland ecosystem

in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5): 256-260.

- [4] Song Qian, He Yongtao, Huang Fengrong, et al. Variation of water conservation function and its influencing factors of alpine grasslands in Northern Tibet from 2000 to 2020 [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(3): 493-501.
- [5] 刘美娟, 仲俊涛, 王蓓, 等. 基于 InVEST 模型的青海湖流域产水功能时空变化及驱动因素分析[J]. *地理科学*, 2023, 43(3): 411-422.
- Liu Meijuan, Zhong Juntao, Wang Bei, et al. Spatio-temporal change and driving factor analysis of the Qinghai Lake basin based on InVEST model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3): 411-422.
- [6] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatio-temporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [7] 齐文华, 金艺华, 尹振浩, 等. 基于 SWAT 模型的图们江流域蓝绿水资源供需平衡分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(8): 3116-3127.
- Qi Wenhua, Jin Yihua, Yin Zhenhao. Analysis of blue and green water scarcity based on SWAT model in the Tumen River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(8): 3113-3127.
- [8] 李莹莹, 马晓双, 祁国华, 等. 基于参数本地化 InVEST 模型的安徽省水源涵养功能研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(2): 313-325.
- Li Yingying, Ma Xiaoshuang, Qi Guohua, et al. Studies on water retention function of Anhui Province based on InVEST model of parameter localization [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(2): 313-325.
- [9] Boithias L, Acuña V, Vergonós 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.
- [10] 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.
- Wang Zhuangzhuang, Zhang Liwei, Li Xupu, et al. Spatio-temporal pattern of supply-demand risk of ecosystem services at regional scale: A case study of water yield service in Shaanxi Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1887-1900.
- [11] 欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变

- 分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 623-633.
- Ou Weixin, Liu Cui, Tao Yu. An analysis of spatio-temporal evolution of water supply and demand in Taihu Basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(3): 623-633.
- [12] 汪仕美, 靳甜甜, 燕玲玲, 等. 子午岭区生态系统服务权衡与协同变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3087-3096.
- Wang Shimei, Jin Tiantian, Yan Lingling, et al. Trade-off and synergy among ecosystem services and the influencing factors in the Ziwuling Region, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11): 3087-3096.
- [13] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.
- Gong Shihan, Xiao Yang, Zheng Hua, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [14] 胡昂, 吴侯思, 黄莹, 等. 高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析: 以四川省为例[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1062-1076.
- Hu Ang, Wu Yusi, Huang Ying, et al. Analysis of supplies, demands and driving forces of ecosystem services in regions with high spatial heterogeneity: A case study of Sichuan Province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(5): 1062-1076.
- [15] 乔亚军, 张慧, 韩晓盈, 等. 基于地理空间角度的探究黑龙江省水源涵养功能变化的驱动因素分析[J]. 生态学报, 2023, 43(7): 2711-2721.
- Qiao Yajun, Zhang Hui, Han Xiaoying, et al. Exploring drivers of water conservation function variation in Heilongjiang Province from a geospatial perspective [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2711-2721.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958.
- Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Landuse multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.
- [18] 陈艺, 蔡海生, 张学玲, 等. 基于 MCE 的饶河流域国土空间生态质量综合评价及其空间分异[J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2236-2247.
- Chen Yi, Cai Haisheng, Zhang Xueling, et al. Comprehensive evaluation of spatially ecological quality of Rao River Basin and its spatial differentiation based on multi-objective comprehensive evaluation method [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(6): 2236-2247.
- [19] Yan Fapeng, Shangguan Wei, Zhang Jing, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters [J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-13.
- [20] Zhao Naizhuo, Liu Ying, Cao Guofeng, et al. Forecasting China's GDP at the pixel level using nighttime lights time series and population images [J]. GIScience & Remote Sensing, 2017, 54(3): 407-425.
- [21] Zhou Wenzuo, Liu Gaohuan, Pan Jianjun, et al. Distribution of available soil water capacity in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2005, 15(1): 3-12.
- [22] Zhang Canqiang, Li Wenhua, Zhang Biao, et al. Water yield of Xitaoxi River basin based on InVEST modeling [J]. Journal of Resources and Ecology, 2012, 3(1): 50-54.
- [23] 陈文华, 徐娟, 李双成. 滇西山地区城市水源涵养功能研究: 以保山市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 1153-1160.
- Chen Wenhua, Xu Juan, Li Shuangcheng. Water conservation function of mountainous city in Western Yunnan: A case study of Baoshan City [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(6): 1153-1160.
- [24] 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.
- Bao Yubin, Li Ting, Liu Hui, et al. Spatial and temporal changes of water conservation of Loess Plateau in northern Shaanxi Province by InVEST model [J]. Geographical Research, 2016, 35(4): 664-676.
- [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.
- Yang Jie, Xie Baopeng, Zhang Degang. Spatio-temporal variation of water yield and its response to precipitation and land use change in the Yellow River Basin based on InVEST model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [26] 陈骏宇, 王慧敏, 刘刚, 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.
- Chen Junyu, Wang Huimin, Liu Gang, et al. Evaluation of ecosystem services and its adaptive policies in the Hangjiahu Region under water-energy-food nexus [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 542-553.

- changes based on GIS/RS and USLE in Poyang Lake Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 337-344.
- [25] 饶恩明, 肖焱. 四川省生态系统土壤保持功能空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8741-8749. Rao Enming, Xiao Yi. Spatial characteristics and effects of soil conservation service in Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(24): 8741-8749.
- [26] 朱青, 周自翔, 刘婷, 白继洲. 黄土高原植被恢复与生态系统土壤保持服务价值增益研究: 以延河流域为例. 生态学报, 2021, 41(7): 2557-2570. Zhu Qing, Zhou Zixiang, Liu Ting, et al. Vegetation restoration and ecosystem soil conservation service value increment in Yanhe Watershed, Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 41(7): 2557-2570.
- [27] 陈童尧, 贾燕锋, 王佳楠, 等. 基于 InVEST 模型的祁连山国家级自然保护区土壤保持现状与功能[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 150-159. Chen Tongyao, Jia Yanfeng, Wang Jianan, et al. Current situation and function of soil conservation in national nature reserves in the Qilian Mountains based on InVEST model [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 150-159.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [29] Rao Enming, Ouyang Zhiyun, Yu Xinxiao, et al. Spatial patterns and impacts of soil conservation service in China [J]. Geomorphology, 2014, 207: 64-70.
- [30] 贾振宇, 王世曦, 刘学, 等. 辽河保护区土壤保持功能时空变化及其影响因素分析[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 686-692. Jia Zhenyu, Wang Shixi, Liu Xue, et al. Spatial and temporal variation of soil conservation function and its influencing factors in Liaohe Conservation Area [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(4): 686-692.
- [31] 刘月, 赵文武, 贾立志. 土壤保持服务: 概念、评估与展望[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 432-440. Liu Yue, Zhao Wenwu, Jia Lizhi. Soil conservation service: Concept, assessment, and outlook [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 432-440.

(上接第 399 页)

- [27] 涂安国, 莫明浩, 李英, 等. 2000—2014 年江西东江源区水源涵养量时空变化[J]. 山地学报, 2022, 40(5): 694-703. Tu Anguo, Mo Minghao, Li Ying, et al. Spatio-temporal variation of water conservation in the source area of the Dongjiang River in Jiangxi Province of China from 2000 to 2014 [J]. Mountain Research, 2022, 40(5): 694-703.
- [28] 王亚慧, 戴尔阜, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J]. 自然资源学报, 2020, 35(2): 371-386. Wang Yahui, Dai Erfu, Ma Liang, et al. Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain Region [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(2): 371-386.
- [29] 孙小银, 郭洪伟, 廉丽妹, 等. 南四湖流域产水量空间格局与驱动因素分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(4): 669-679. Sun Xiaoyin, Guo Hongwei, Lian Lishu, et al. The Spatial pattern of water yield and its driving factors in Nansi Lake basin [J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(4): 669-679.
- [30] 王晓峰, 尧文洁, 冯晓明, 等. 青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素[J]. 生态学报, 2023, 43(17): 6968-6982. Wang Xiaofeng, Yao Wenjie, Feng Xiaoming, et al. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 6968-6982.