

DOI: 10.20103/j.stxb.202208252435

王晓峰, 尧文洁, 冯晓明, 贾子续, 张欣蓉, 马嘉豪, 周继涛, 涂又, 孙泽冲. 青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(17): 6968-6982.

Wang X F, Yao W J, Feng X M, Jia Z X, Zhang X R, Ma J H, Zhou J T, Tu Y, Sun Z C. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 6968-6982.

青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素

王晓峰^{1,2,*}, 尧文洁³, 冯晓明⁴, 贾子续³, 张欣蓉³, 马嘉豪³, 周继涛¹, 涂 又³, 孙泽冲¹

1 长安大学土地工程学院, 西安 710054

2 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054

3 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

4 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要: 准确识别生态系统服务供给与需求的空间特征和空间匹配, 确定影响供需关系的因素, 对指导区域生态系统管理和恢复具有重要意义。采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)、生态系统服务和权衡综合评估模型(InVEST)和卡内基-艾姆斯-斯坦福模型(CASA)等多种模型方法探讨青藏高原土壤保持、产水和碳固定服务的供给与需求的时空特征, 并结合冗余分析, 进一步识别青藏高原生态系统服务供给、需求与供需比的影响因素。结果表明:(1)2000—2018年青藏高原土壤保持、产水和碳固定服务的供给量, 以及产水和碳固定服务的需求量均呈现增加趋势, 供给量分别增加30.57t、 $63.61 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、33.81t, 需求量分别增加153.42m³和5.09t, 而土壤保持服务需求量呈减少趋势, 减少16.39t。(2)青藏高原各项生态系统服务供需匹配状况不同, 碳固定服务供需比呈下降趋势, 产水服务供需比呈上升趋势, 土壤保持服务供需比波动变化, 总体呈上升趋势, 局部呈下降趋势。(3)各项生态系统服务供需关系均以低低型空间匹配为主。(4)降水和坡度是影响生态系统服务供给的主要因素, 生态系统服务需求主要受人口密度和国内生产总值的影响, 降水和温度是影响生态系统服务供需比的关键因素。研究评估青藏高原生态系统服务供给与需求之间的关系, 以及明确供需关系的空间显性驱动力, 为区域的生态系统综合管理提供依据。

关键词: 生态系统服务; 供需平衡; 影响因素; 冗余分析; 青藏高原

Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan plateau

WANG Xiaofeng^{1,2,*}, YAO Wenjie³, FENG Xiaoming⁴, JIA Zixu³, ZHANG Xinrong³, MA Jiahao³, ZHOU Jitao¹, TU You³, SUN Zechong¹

1 School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Shaanxi Land Consolidation, Xi'an 710054, China

3 School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: For directing regional ecosystem management and restoration, it is crucial to accurately define the spatial characteristics and spatial matching of ecosystem service supply and demand, as well as the variables affecting the link between supply and demand. In order to explore the spatial and temporal characteristics of supply and demand for soil conservation, water yield, and net primary production on the Tibetan Plateau, various modeling approaches including

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0405); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2002040201); 长安大学中央高校基本科研业务费专项基金(chd300102352201)

收稿日期: 2022-08-25; **网络出版日期:** 2023-05-04

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangxf@chd.edu.cn

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs (InVEST), and Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) were used in this study. Redundancy analysis was also used to further identify the factors influencing supply, demand, and the supply-demand ratio of ecosystem services on the Tibetan Plateau. The results showed that (1) on the Tibetan Plateau, the supply of services related to soil conservation, water yield, and net primary production, as well as the demand for these services, all showed an upward trend from 2000 to 2018; the supply increased by 30.57t, $63.61 \times 10^4 \text{m}^3$, 33.81t, and the demand increased by 153.42m^3 and 5.09 t, respectively. (2) The supply-demand ratio of various ecosystem services varied, with the ratio of services related to net primary production showing a decreasing trend, the ratio of services related to water yield showing an increasing trend, and the ratio of services related to soil conservation fluctuating between an overall increasing trend and a local decreasing trend. (3) All supply and demand connections for ecosystem services were dominated by low-low type geographic matching zones. (4) The primary determinants of ecosystem service supply were precipitation and slope, while the primary determinants of ecosystem service demand were population density and gross domestic product, and the primary determinants of ecosystem service ratio were precipitation and temperature. In order to lay the groundwork for integrated ecosystem management in the area, this study evaluated the relationship between supply and demand for ecosystem services on the Tibetan Plateau and defined the spatially explicit drivers of supply and demand.

Key Words: ecosystem services; balance of supply and demand; influencing factors; redundancy analysis; the Tibetan Plateau

生态系统服务供给指生态系统为人类生产产品与服务,需求则是人类对生态系统生产的产品与服务的消费与使用,两者共同构成生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统的动态过程^[1-2]。生态系统服务的持续供给是区域可持续性的基础^[3],但在过去的半个世纪里,全球三分之二的生态系统服务供给量下降^[4]。随着社会经济的发展和城镇化的快速推进,人类社会对于生态系统服务的需求不断增加^[5],加剧了生态系统服务供给与需求的失衡,从而对生态系统的健康和人类社会的可持续发展造成严重威胁。因此,研究生态系统服务的供给与需求,探索生态系统服务供需关系的驱动因素,对生态系统可持续管理和资源合理配置具有重要意义。

不同角度的定义、不同的生态系统服务类别决定不同的生态系统服务供给和需求量化指标和计算方法^[6]。Wu 等采用基于土地利用/土地覆盖 (LUCC) 数据集的生态系统服务矩阵模型,量化中国 22 种生态系统服务供需^[7]。Palacios-Agundez 等通过生态足迹方法,对 2000 年到 2010 年期间的巴斯克地区的生态系统服务进行详细的定量评估^[8]。Pena L 等通过调查问卷来评估巴斯克的文化服务^[9]。Schild 等利用市场价值评估方法衡量旱地生态系统服务^[10]。Wang 等运用生态系统服务和权衡综合评估模型 (InVEST) 和卡内基-艾姆斯-斯坦福模型 (CASA) 等生态模型量化了 2000 年和 2020 年浙江省粮食服务、产水服务、土壤保持服务、碳储存和生境质量等 5 种服务^[11]。生态系统服务矩阵法和调查问卷都为半定量方法,主观性强;生态足迹的指标相对单一、简化,而人类的福利是多面向的;市场价值评估法受到空间的约束。相较于前 4 种方法,生态模型法基于生态过程与机理,能较好地揭示服务的空间异质性。此外,目前研究多集中在生态系统服务供需评估,对于供需平衡的驱动机制探索较少。生态系统服务供需平衡主要受自然因素和人类因素的影响^[7]。自然因素是生态系统的固有属性,决定着生态系统服务的形成和空间分布。在澳大利亚东部,海拔、降雨量、温度和森林结构是影响热带森林生态系统服务供给量的主要决定因素^[12]。气候、土壤和植被在调节美洲的气候服务中起关键作用^[13]。同时,人口规模、社会经济和农业发展等人类因素也会影响生态系统服务的空间分布。人类需求的增加导致土壤保持、产水服务、粮食服务和生物多样性等生态系统功能的变化^[14-15]。人类因素对生态系统服务的影响是积极的还是消极的取决于科学规划^[16]。因此,从供给、需求和供需平衡等多角度探索生态系统服务驱动力,对区域进行合理规划,能够有效避免经济发展和生态系统之间的冲突^[17]。

青藏高原作为“亚洲水塔”,是重要的储水区域,为陆地的生态系统提供了基本的水分资源^[18]。近年来,许多研究表明气候变化对青藏高原的产水量产生一定影响^[19-20],产水服务是青藏高原重要的生态系统服务之一,研究其时空变化和驱动机制对维护生态安全具有重要作用。同时,青藏高原是全球生态最敏感的区域之一,其气候与生态环境变化等直接影响生态安全屏障建设^[21]。然而,近年来人类干扰的不断加剧,青藏高原生态系统受到影响,过度砍伐使得森林退化,造成水土流失和自然灾害频发,尤其在青藏高原的东南部土壤侵蚀频发^[22]。为缓解生态退化,政府通过实施“退耕还草”和“退牧还草”措施来提高土壤保持能力和固碳量^[23]。自工程实施以来,青藏高原生态系统服务总体提高,但并非所有地区呈现积极趋势^[14]。另一方面,随着经济发展,人们对于自然的需求不断增加,例如水、能源和原材料^[7]。过度使用生态资源会导致人口集聚区面临生态退化和生态灾难的风险。

鉴于此,本研究运用修正通用土壤流失方程(RUSLE)、InVEST、CASA 三种生态模型并综合土地利用数据和社会经济数据量化了 2000—2018 年青藏高原土壤保持服务、产水服务、碳固定服务的供给量、需求量和供需比,识别生态系统服务供需关系的时空变化和生态系统服务供需的空间匹配特征,通过冗余分析方法揭示影响生态系统服务供需关系的驱动因素,为区域生态规划和土地资源有效配置提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

青藏高原位于中国的西南部,地跨云南、青海、四川、甘肃、西藏自治区和新疆维吾尔自治区 6 个省份,占地面积约 $2.53 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 1),2018 年末地区人口总数约为 700.38 万人,主要分布在东南侧。气候类型主要为高原山地气候类型,年平均气温在 $-5.6 \sim -8.6^\circ\text{C}$,年平均降水量为 486mm,年均温和年均降雨量呈现由东南至西北递减的特点。植被类型主要为高寒草甸和高寒草地为主,分别占土地总量的 25% 和 27.54%^[25]。生态系统结构简单,生态恢复力低,易受气候变化的影响^[26]。同时在快速城市化和经济发展下,人口的集中分布导致出现部分地区生态系统服务供需失衡。因此,识别生态系统服务供给和需求的格局及驱动机制,为推进重点区域的生态系统保护和修复工程具有重要意义。

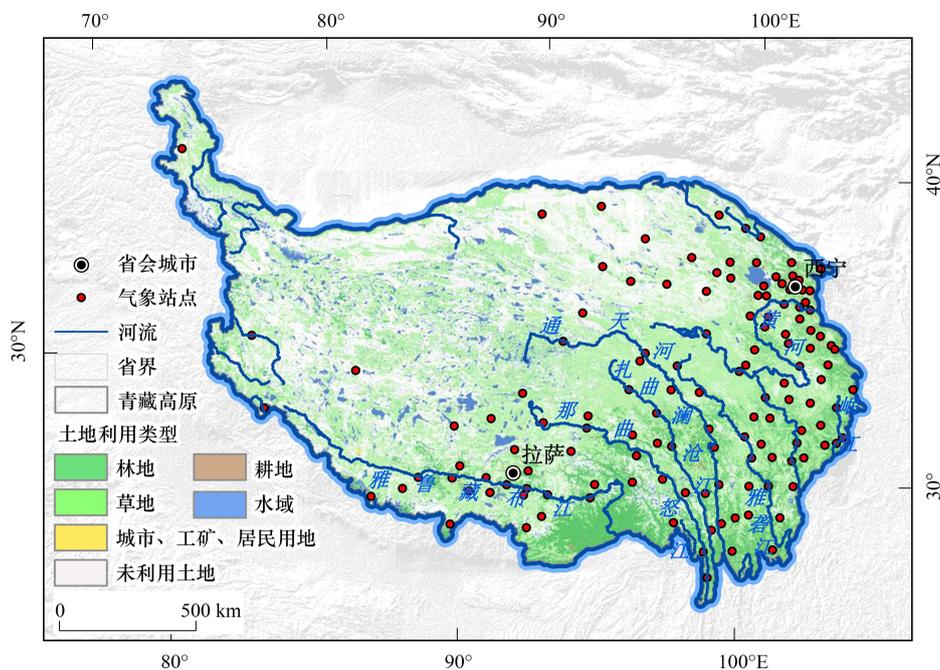


图 1 研究区概况
Fig.1 Study area

1.2 数据来源与处理

本文使用的基础数据来源包括:①气象数据,青藏高原地区以及周边气象站点的太阳辐射、降水、气温等数据,来源于中国气象科学数据网站(<http://data.cma.cn/>),采用 ANUSPLIN 软件插值成 1km 分辨率的栅格数据,并根据 FAO56 修正的 Penman-Monteith 方程^[27]计算得到蒸散发数据。②2000、2005、2010、2015 和 2018 年土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1km。③2000—2018 年度归一化植被指数空间分布数据集,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),在月数据基础上采用最大值合成法生成,空间分辨率为 1km。④数字高程模型(DEM)数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),基于最新的 SRTM V4.1 数据经整理拼接生成 30m 分辨率,用于提取坡度坡长因子,之后重采样为 1km 分辨率。⑤2000—2018 年人口密度数据,来源于世界人口统计官网(WorldPop)(<https://www.worldpop.org/>),空间分辨率为 1km。⑥社会经济数据,其中包括常住人口、国内生产总值和能源消耗量等,主要来源于国家统计局、各省市统计局、各省市统计年鉴和水资源公报等。所有数据统一采用阿尔伯斯(Albers)投影。

2 研究方法

2.1 土壤保持服务

本研究基于修正通用土壤流失方程(RUSLE)估算青藏高原土壤保持量^[28]。土壤保持服务的供给量以潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差作为衡量指标。实际的土壤侵蚀是人类期望能够被治理的和期望获得的生态系统服务数量^[29],因此,本研究以实际的土壤侵蚀量表征土壤保持服务的需求量。具体计算公式如下:

$$\text{供给量: } A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C \times P) \quad (1)$$

$$\text{需求量: } A_r = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2)$$

式中, A_c 为土壤保持量($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), A_p 为土壤潜在侵蚀量($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), A_r 为实际土壤侵蚀量($\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$), R 为降雨侵蚀因子($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$); K 为土壤侵蚀因子($\text{t h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$); L 为坡长因子; S 坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子^[30],具体计算过程详见参考文献^[31]。

2.2 产水服务

产水服务是指生态系统通过拦截降雨储存淡水资源的能力^[32]。本研究采用 InVEST 模型中的产水模块化青藏高原的产水供给量^[33]。以人类消耗的生态系统服务数量为产水服务的需求量,即耗水量^[34]。计算公式如下:

$$\text{供给量: } WY_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (3)$$

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_x}{P_x}\right)^{w_x}\right]^{1/w_x} \quad (4)$$

$$PET_x = Kc_x \times ETo_x \quad (5)$$

$$w_x = \frac{AWC_x \times Z}{P_x} + 1.25 \quad (6)$$

$$\text{需求量: } D_{up} = D_{pcwc} \times \rho_{pop} \quad (7)$$

式中, WY_x 为栅格单元 x 的产水量(mm), P_x 为年降雨量(mm), AET_x 为年际蒸散量(mm), PET_x 为年际潜在蒸散量(mm), ETo_x 为参考植被蒸散量(mm), Kc_x 为作物蒸散发系数, AWC_x 为植物可利用含水量(mm), w_x 为经验参数, Z 为张系数^[35-36]。 D_{up} 为需水量(m^3), D_{pcwc} 为人均耗水量、 ρ_{pop} 是栅格人口密度($\text{人}/\text{km}^2$)。

2.3 碳固定服务

将生态系统净初级生产力作为指标对区域碳固定服务进行量化,基于采用光能利用原理的 CASA 模型对

碳固定服务量进行估算^[37]。以地区碳排放量作为碳固定服务需求量的保守估计值^[38],具体计算公式如下:

$$\text{供给量: } NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (8)$$

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times 0.5 \times FPAR(x, t) \quad (9)$$

$$\varepsilon(x, t) = T_{\varepsilon 1}(x, t) \times T_{\varepsilon 2}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \times \varepsilon_{\max} \quad (10)$$

$$\text{需求量: } D_{cs, i} = \overline{C_{e, i}} \times \rho_i \times C_{\text{transfer}} \quad (11)$$

式中, $NPP(x, t)$ 为像元 x 在 t 时间内的固碳量 ($\text{gC m}^{-2} \text{a}^{-1}$); $APAR(x, t)$ 为像元 x 在时间 t 内吸收的光合有效辐射 (MJ/m^2); $\varepsilon(x, t)$ 为实际光能利用率 (g C MJ^{-1}); $SOL(x, t)$ 为太阳总辐射 (MJ/m^2); 0.5 为太阳有效辐射与太阳总辐射的比值 (波长范围为 $0.38\text{—}0.78\mu\text{m}$); $FPAR(x, t)$ 为植被冠层吸收的光合有效辐射的比例; $T_{\varepsilon 1}(x, t)$ 和 $T_{\varepsilon 2}(x, t)$ 为温度应力系数; $W_{\varepsilon}(x, t)$ 为水压力系数; ε_{\max} 为理想条件下, 特定生物群系的最大光能利用效率; $D_{cs, i}$ 为栅格 i 上的碳固定服务需求量 (kg); $\overline{C_{e, i}}$ 为栅格 i 上的人均能源消费量 (万 t 标准煤); ρ_i 为栅格 i 上的人口密度; C_{transfer} 为能源消耗的碳排放转化率, 取值为 0.67 ^[39]。

2.4 生态系统服务供需匹配度

本研究采用生态系统服务供需比 (ESDR) 来衡量区域生态系统供需状况。其比值大于 0, 即盈余状态, 比值等于 0, 即供需平衡状态, 比值小于 0, 即赤字状态。具体计算公式如下:

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{\max} + D_{\max})/2} \quad (12)$$

式中, S 为生态系统服务的供给量; D 为生态系统服务需求量; S_{\max} 为生态系统服务供给量的最大值; D_{\max} 为生态系统服务需求量的最大值。

2.5 空间自相关

双变量局部空间自相关 (LISA) 用以识别局部空间单元的属性值同其邻近空间单元相同属性值之间的相关性和聚集程度^[40], 用局部莫兰指数来度量, 公式如下:

$$LISA = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) (y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (13)$$

式中, n 为空间单元总个数, y_i 和 y_j 分别表示第 i 个空间单元和第 j 个空间单元的属性值, 为所有空间单元属性值的均值, w_{ij} 为空间权重矩阵。

2.6 冗余分析

冗余分析 (RDA) 是一种直接梯度分析方法, 是多元线性回归的扩展, 主要以统计学的角度来探究单变量或多变量与多变量之间的关系^[41]。本研究在 Canoco4.5 软件环境下进行冗余分析, 探究生态系统服务供给、需求和供需比 (响应变量) 与驱动因子 (解释变量) 之间的关系, 分析结果以排序图的形式显示。解释变量和响应变量之间的角度表示相关性。角度越小相关性越强; 角度为 90° , 响应变量和解释变量不具有相关性; 角度大于 90° 相关性为负。

3 结果

3.1 生态系统服务供需的时空特征

3.1.1 土壤保持服务

单位面积土壤保持服务供给量呈现波动上升趋势, 由 2000 年 193.64t/hm^2 上升到 2018 年 224.21t/hm^2 , 单位面积土壤保持服务供给量增长了 15.78% 。其中, 2000—2009 年单位面积土壤保持服务供给量呈下降趋势, 下降 23.86% 。2009—2018 年单位面积土壤保持服务供给量呈波动上升趋势, 从 147.43t/hm^2 升至 224.21t/hm^2 , 增长 52.08% (图 2)。2000—2018 年土壤保持服务供给量呈“东南高, 西北低”的分布格局。

2010—2018 年土壤保持服务供给量高值区扩张,高值区向青藏高原的东部和西南部扩张,低值区向西北方向收缩(图 3)。

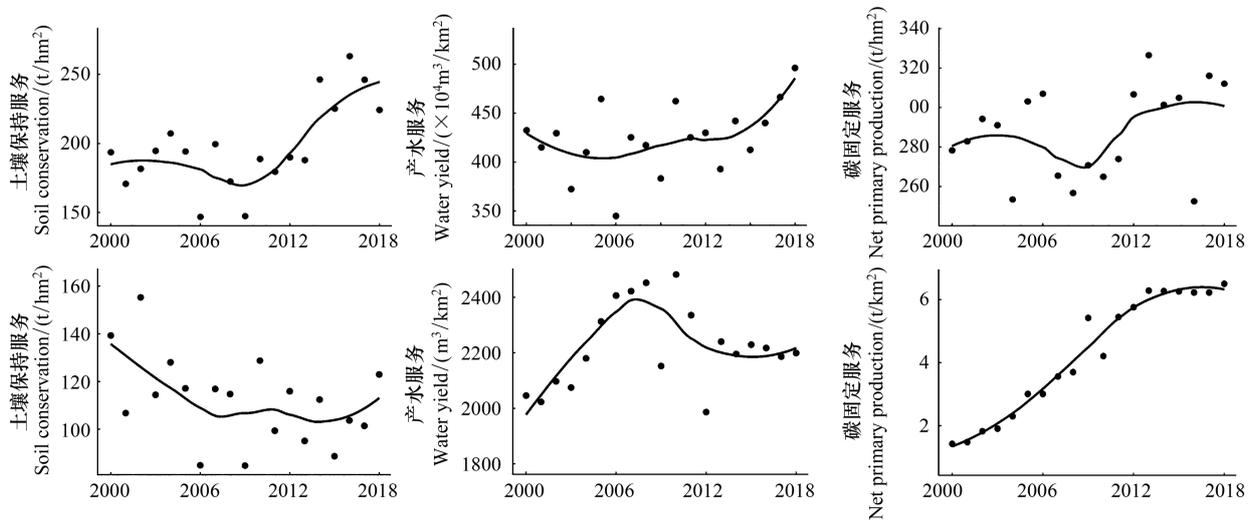


图 2 生态系统服务供需变化趋势

Fig.2 Temporal trends in ecosystem service supply and demand

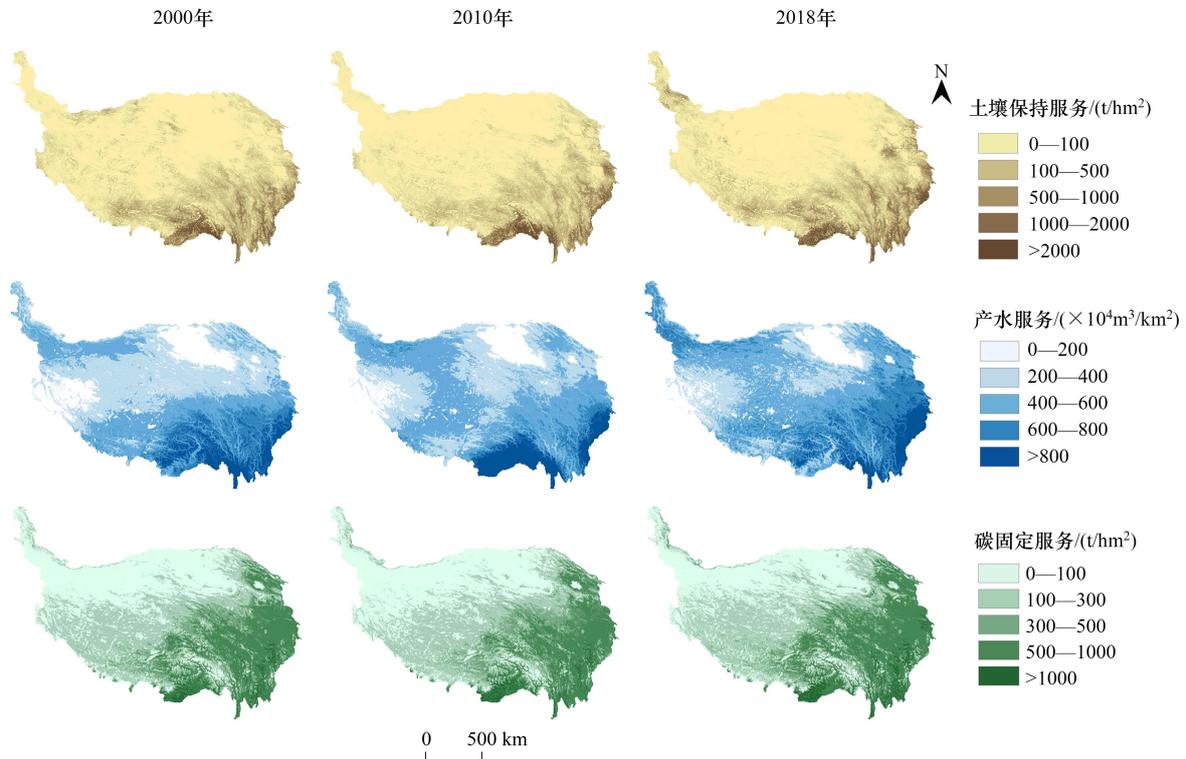


图 3 生态系统服务供给量空间格局

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem service supply

单位面积土壤保持服务需求量呈现波动下降趋势,由 2000 年 139.31t/hm² 下降到 2018 年 122.92t/hm², 单位面积土壤保持服务需求量下降了 11.76%(图 2)。2000—2018 年土壤保持服务需求量呈“西南高,东北低”的分布格局。低值区呈点状向西北方向扩张,主要分布在昆仑山以南、可可西里山以西和巴颜喀拉山以

东的地区(图4)。

3.1.2 产水服务

单位面积产水供给量呈现波动上升趋势,由2000年 $432.54 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 上升到2018年 $496.15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$,单位面积产水供给量增长了14.7%(图2)。2000—2018年青藏高原水供给量呈现“东南高,西北低”的分布格局。其高值区向青藏高原的东南部收缩,低值区范围缩小(图3)。

单位面积水需求量总体呈波动上升趋势,由2000年 $2046.05 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 上升到2018年 $2199.47 \text{ m}^3/\text{km}^2$,单位面积水需求量增长了7.49%。其中,2000—2010年青藏高原单位面积水需求量呈上升趋势,从 $2046.05 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 上升到 $2482.03 \text{ m}^3/\text{km}^2$,增长21.3%,2010—2018年青藏高原单位面积水需求量呈下降趋势,下降11.38%(图2)。2000—2018年青藏高原水需求量呈“东南高,西北低”分布格局,2000—2010年青藏高原的西北部水需求量减少,东南部水需求量上升,这主要与人口和城市化有关。2010—2018年水需求量高值区趋于收缩,低值区向南部逐渐扩张(图4)。

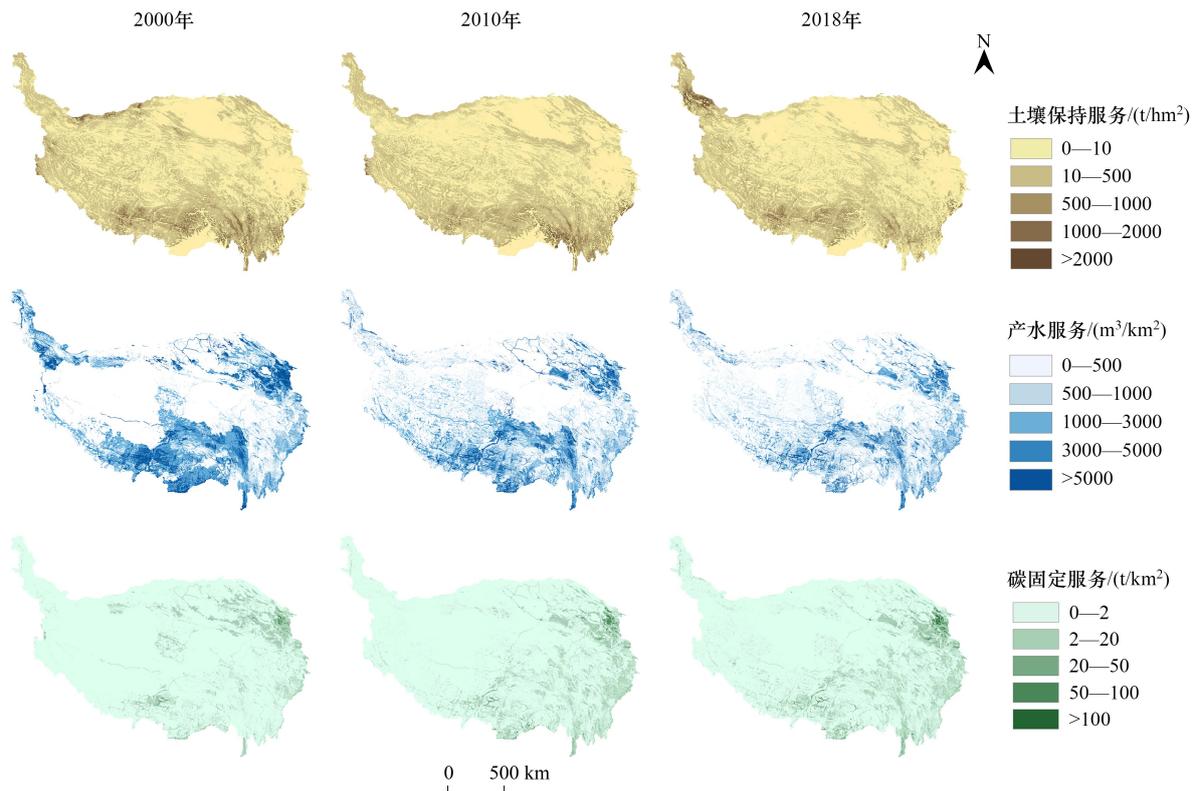


图4 生态系统服务需求量空间格局

Fig.4 Spatial pattern of ecosystem service demand

3.1.3 碳固定服务

单位面积碳固定服务供给量呈现波动上升趋势,由2000年 $278.31 \text{ t}/\text{hm}^2$ 上升到2018年 $312.12 \text{ t}/\text{hm}^2$,单位面积碳固定服务供给量增长12.15%(图2)。2000—2018年青藏高原碳固定服务供给量呈“东南高,西北低”的分布格局,高值区向西北方向逐渐扩张,主要分布在雅鲁藏布江、怒江和澜沧江等河网密布,植被覆盖度高的地区(图3)。

单位面积碳固定服务需求量呈现上升趋势,从由2000年的 $1.42 \text{ t}/\text{km}^2$ 上升到2018年的 $6.51 \text{ t}/\text{km}^2$,单位面积碳固定服务需求量增幅358.45%(图2)。2000—2018年青藏高原碳固定服务需求量呈“东部高,西部低”的分布格局,高值区呈点状向西南方向逐渐扩张,主要分布在祁连山以南和巴颜喀拉山脉以东的部分地区(图4)。

3.2 生态系统服务供需数量匹配特征

2000—2018 年土壤保持服务供需比波动变化, 总体呈上升趋势, 局部呈下降趋势, 供需比从 0.0025 到 0.0067, 增长了 166%(图 5)。其中, 2000—2018 年土壤保持服务供需比呈“东南高, 西北低”的分布格局。期间, 青藏高原土壤保持服务供大于求的区域范围向东南方向扩展, 呈条带状分布于横断山脉(图 6)。

2000—2018 年产水服务供需比呈上升趋势, 供需比从 0.0525 升至 0.1156, 增长了 119.9%, 总体处于供大于求(图 5)。2000—2018 年产水服务供需比呈“南北高, 中部低”的分布格局。青藏高原的西北部供给量增加, 同时, 供大于求区向东南部扩张, 东南部地区河网密布, 有怒江、澜沧江和独龙江等河流, 是主要的水源涵养区域(图 6)。

2000—2018 年碳固定服务供需比呈下降趋势, 供需比从 0.014 降到 0.0046, 下降了 66.41%。其中, 2001 年碳固定服务供需比达到最高(图 5)。2000—2018 年碳固定服务供需比呈“东南高, 西北低”的分布格局, 高值区呈向东南收缩趋势(图 6)。

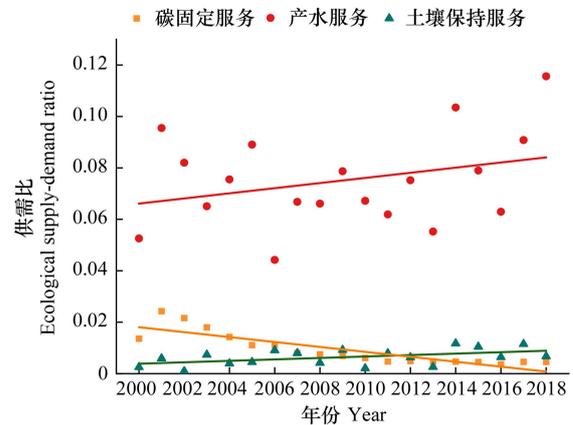


图 5 生态系统服务供需比变化趋势

Fig.5 Temporal trends in ecological supply-demand ratio

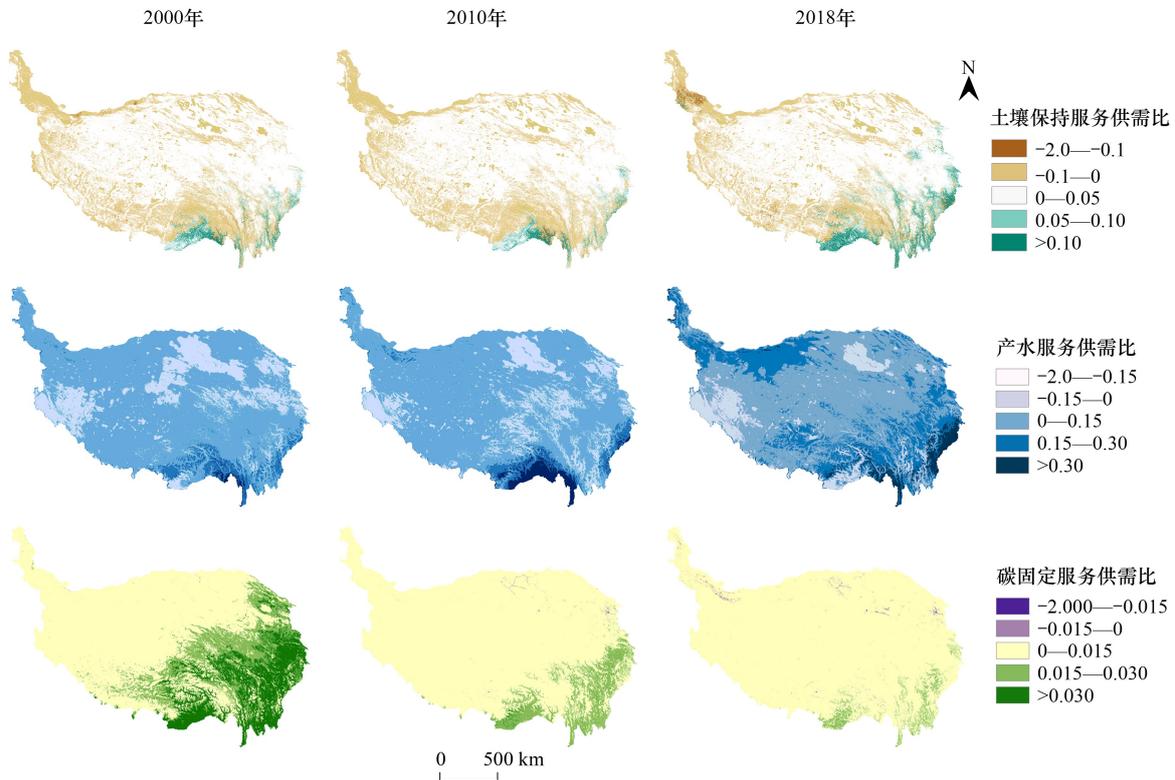


图 6 生态系统服务供需比空间格局

Fig.6 The spatial patterns of ecological supply-demand ratio

3.3 生态系统服务供需的空间匹配特征

通过对青藏高原土壤保持服务、产水服务和碳固定服务的供给量和需求量进行双变量局部空间自相关分析, 识别出青藏高原三种生态系统服务“高高型空间匹配”(高供给-高需求)、“低低型空间匹配”(低供给-低

需求)、“低高型空间错位”(低供给-高需求)和“高低型空间错位”(高供给-低需求)四种空间匹配类型(图7)。青藏高原的土壤保持服务供需关系以低低型空间匹配为主,其次是高高型空间匹配(图8)。低低型空间匹配主要分布在昆仑山以北和巴颜喀拉山以东的地区,面积占比由15%降至14%;高高型空间匹配主要分布在唐古拉山以南和喜马拉雅山以北的地区,面积占比由6%降至5%;低高型空间错位和高低型空间错位均呈点状零散分布在青藏高原南部地区和东部地区,面积占比均较低(图7)。

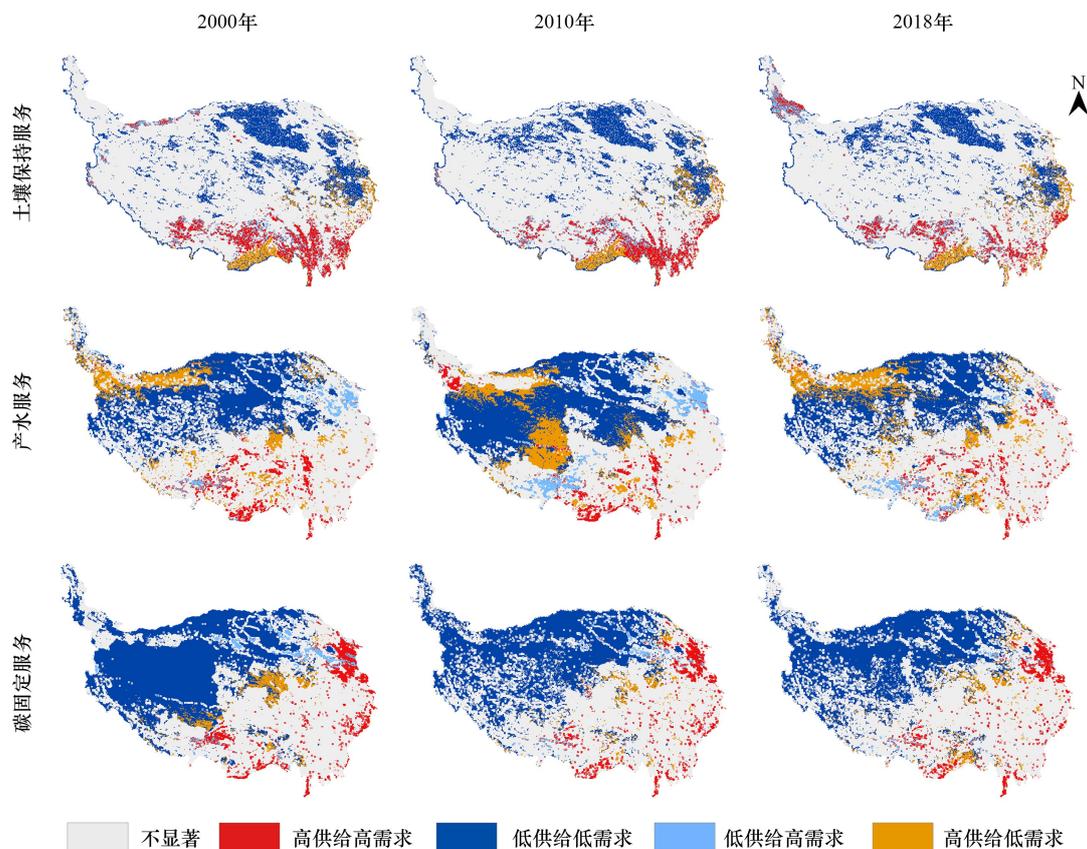


图7 生态系统服务供需关系类型

Fig.7 Spatial matching diagram of ESs supply and demand

青藏高原的产水服务供需关系以低低型空间匹配为主,其次是高低型空间错位(图8)。低低型空间匹配主要分布在青藏高原的西北部地区,面积占比由26%降至24%;高低型空间错位主要分布在昆仑山以北,面积占比由8%升至11%;高高型空间匹配和低高型空间错位集中分布在青藏高原的西南部地区,面积占比均较低(图7)。

青藏高原的碳固定服务供需关系以低低型空间匹配为主,其次是高高型空间匹配(图8)。低低型空间匹配集中分布在青藏高原的西北部地区,范围向西北部收缩,面积占比由37%降至31%;高高型空间匹配呈块状分布在青藏高原的东北部,面积占比由6%降至5%;低高型空间错位和高低型空间错位呈零散分布,面积占比均较低(图7)。

3.4 生态系统服务供给、需求与供需比的影响因素

3.4.1 驱动因子选择

气候、地形、土地利用和社会经济因素是最常见的生态系统服务驱动因素^[42-44]。考虑到量化生态系统服务驱动因素、数据的可获得性和相关文献中驱动因素的选择,最终选择13个自然和人类方面的驱动因素^[45-46]。以降水、气温、蒸散发和太阳辐射作为气候因子;以高程和坡度作为地形因子;以林地面积占比、草地面积占比、未利用地面积占比和香浓多样性指数作为土地利用和土地覆盖因子;人口密度和国内生产总值作为社会经济因子;归一化植被指数作为生态因子。

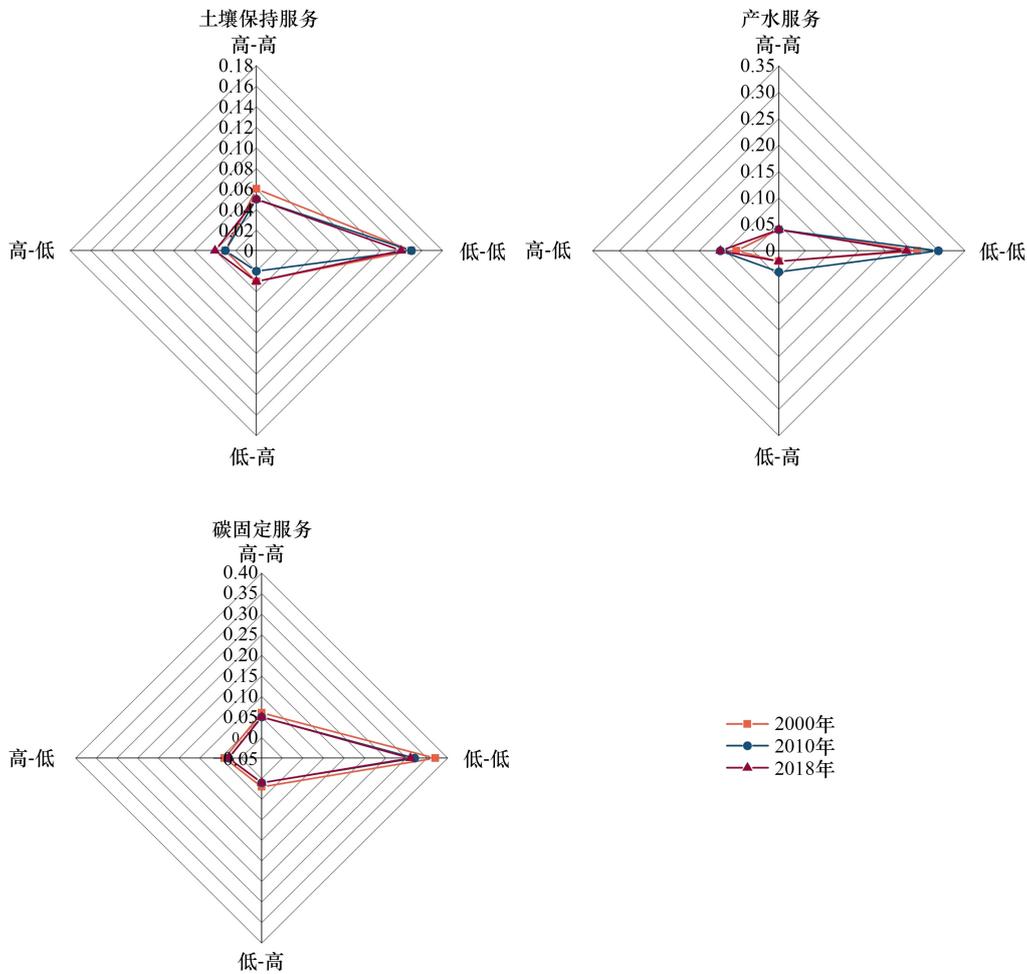


图 8 空间匹配型面积比雷达图

Fig.8 Radar chart of space matching type area ratio

3.4.2 生态系统服务供需影响因素分析

本研究首先对生态系统服务供给量、需求量和供需比进行应用除趋势对应分析法(DCA),结果显示排序轴中的最大梯度值均小于3,因此采用RDA方法。以2000—2018年青藏高原的生态系统服务供给量、需求量和供需比为响应变量,坡度、高程、降水、气温、太阳辐射、蒸散发、林地面积占比、草地面积占比、未利用地面积占比、香浓多样性指数、归一化植被指数、人口密度和国内生产总值等自然与社会经济因子为解释变量,分别进行冗余分析。结果显示,生态系统服务供给量、需求量和供需比解释度分别为81.8%、93.6%和26.3%。RDA排序结果如图9所示,从排序结果可以看出,在生态系统服务供给量中,高程、太阳辐射和草地面积占比与三种生态系统服务供给量呈负相关关系,其他因子与三种生态系统服务供给量呈正相关关系。坡度、气温和降水与土壤保持服务和产水服务的供给量呈较强正相关关系。归一化植被指数和蒸散发与碳固定服务供给量呈强正相关关系。在生态系统服务需求量中,坡度、人口密度和国内生产总值分别与土壤保持服务、产水服务和碳固定服务的需求量表现出强正相关。在生态系统服务供需比中,人口密度和草地面积占比与三种生态系统服务供需比表现出负相关。

自然因素与社会因素对生态系统服务供给量、需求量和供需比的解释量如图9所示。结果表明,对生态系统服务供给量影响最大的是降水和坡度,解释度分别为53%和52%。人口密度(92%)和国内生产总值(45%)是生态系统服务需求量的主要影响因素。而对生态系统供需比影响较大的因素是降水和气温,解释度均为21%。

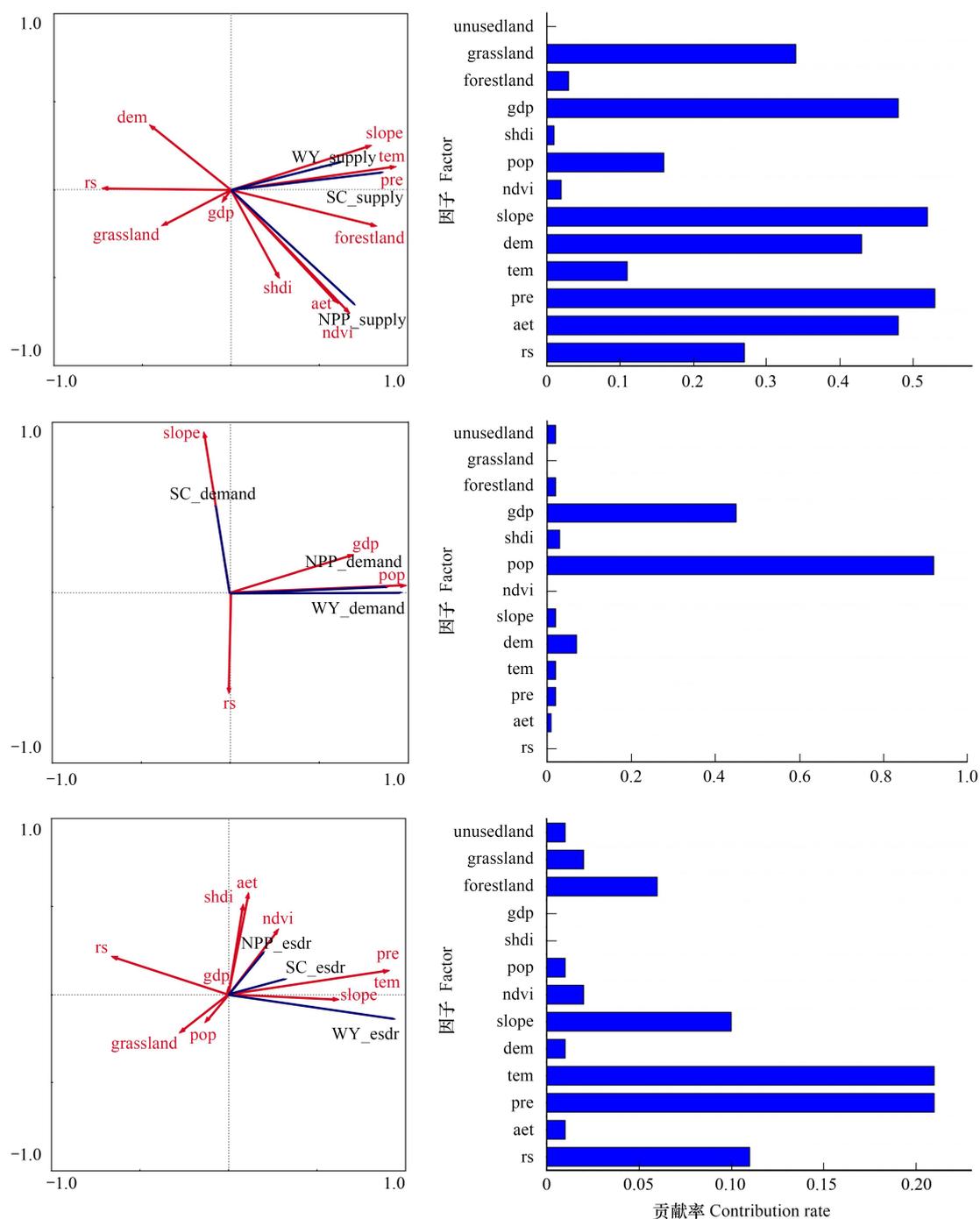


图9 冗余分析双图和影响因素对生态系统服务供给、需求和供需比的贡献率

Fig.9 Redundancy analysis biplots and contribution rate of influencing factors of ESs supply, demand and esdr

supply: 供应; demand: 需求; esdr: 供需比 Ecological supply-demand ratio; SC: 土壤保持服务 Soil conservation; WY: 产水服务 Water yield; NPP: 碳固定服务 Net primary production; pre: 降水量 Precipitation; tem: 气温 Temperature; aet: 蒸散发 Actual evapotranspiration; rs: 太阳辐射 Solar radiation; dem: 高程 Digital elevation model; slope: 坡度; forest land: 林地面积占比; grassland: 草地面积占比; unutilized land: 未利用地面积占比; SHDI: Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity index; pop: 人口密度 Population; gdp: 国内生产总值 Gross domestic product; ndvi: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

4 讨论

4.1 影响生态系统服务供需比的因素

本研究发现,青藏高原东南部供需比较高,向西北方向逐渐降低。这种变化主要受气候和地形因素影响。

然而,针对不同的生态系统服务,其供需比的空间特征及其主导因素略有差异。青藏高原生态系统服务供需比与气候高度相关,并且气温的升高和降水的增加会导致生态系统服务供给能力提升,这与已有的研究一致^[47-48]。Ma 等通过三次多项式来识别生态系统服务总量与气候的关系,表明降水与生态系统服务响应强烈^[49]。Guo 等基于 Mantel 实验分析生态系统服务价值量与温度存在显著相关性^[50]。发现气候对不同生态系统服务的供需比的响应存在差异。例如,从排序图中,可以发现土壤保持服务和产水服务的供需比与气温和降水相关性较强,且为正相关。进一步对气候响应强烈的土壤保持服务和产水服务的供需比进行分析。降水丰富,植被生长茂盛,雨水对土壤的侵蚀力减弱,土壤保持能力提升。同时降水量的增加也会影响产水量。此外,温度会影响植被分布,进一步影响土壤保持能力。青藏高原生态系统服务供需比与地形高度敏感,坡度的大小会影响生态系统服务供给量和需求量。Sun 等通过冗余分析也发现地形对生态系统服务存在相关性^[51]。发现不同的生态系统服务供需比对地形的响应不同。例如,在排序图中,产水服务供需比与坡度呈正相关。这是坡度会影响降水和气温从而导致产水量发生变化。同时坡度过大的地方,居民不易生存和经济发展,人类聚集地少,对生态系统服务的需求少。

另一方面,气温的升高可能会导致水分亏欠和生理干旱的增加,从而导致固碳量下降和生物多样性的丧失,生态系统服务供需失衡^[52-54]。在生态脆弱的青藏高原地区,气候变化的影响下,人类活动的加强会使得生态系统与经济发展之间的矛盾更加尖锐。Wang 等研究表明气候变暖会导致青藏高原径流的增加,但人口增长所带来的水需求增加会超过气候变暖,印度河和雅鲁藏布江流域到本世纪末都将处于缺水水平,很多人将经历严重的水压力^[55]。因此,应当积极寻求措施,从而确保生态系统服务供给能力,控制人类对生态系统的需求,保障区域可持续发展和生态安全。

4.2 可持续生态系统管理

识别生态系统供需不平衡区域和影响供需关系的驱动力,这些对于可持续管理非常重要^[56]。供需失衡在本研究中得到了证实,建议加强内部协调,调整供需的空间分布。研究结果显示 2001 年以后,碳固定服务供需比持续下降,下降了 66.41%。面对需求量的不断上升,应当采取一定的措施来增加供应,减少需求,从而缓解环境压力。在青藏高原的牧区,当地应当遵循草畜平衡原则,实施划区轮牧或季节休牧,发挥农牧结合优势种植牧草,保持和改善草地健康程度,提高草地植被生产力。在青藏高原的农业区,应当大力推广清洁能源,转变当地传统的能源结构和消费习惯。有研究表明,电力是碳排放和能值输入的主要来源^[57]。开发适合灌溉的电能系统,不仅能调节碳固定服务,还能够缓解水资源与水需求之间的矛盾^[58]。在水资源短缺的地区,改善灌溉技术和发电从而提高生产效率,实施可持续、绿色的生产模式是十分有必要的。

此外,从研究结果来看,在经济发展水平较高的地区,生态系统服务需求量高,供需比低,如西宁和拉萨等城市。推进绿色城镇化,调整优化产业结构,推动产业升级是城市发展的必然趋势。必须坚持走集约、智慧、绿色和低碳的新型城镇化道路,加快构建以省会城市为中心的文化旅游特色城镇网络的城市体系^[59]。在保护生态环境的同时获取经济利益,提升附近居民的生活质量。

4.3 不足

虽然本研究为更好地协调生态系统服务供给与社会需求提供一些重要的线索和建议,但是本研究也存在局限性,需要在未来的研究中进一步改进。本研究识别出生态系统服务供需失衡区域,能够为区域生态系统管理提供方向。然而,土壤保持服务、产水服务和碳固定服务不能完全刻画生态系统服务供需状态。未来可以考虑加入更多的服务,例如食物供给、牲畜供应和生境质量等,以实现更加精准地评估生态系统服务供需状况。同时,在计算产水服务中没有考虑冰川冻土因素,导致产水量存在一定的误差,未来可以进一步深化。此外,本研究需求量仅从单一的角度出发,没有考虑到能力、性别、财富和居住地对需求的影响^[60]。未来的研究可以采用更加详细的方法来精准量化社会需求量。在因子选择方面,本研究选取的因子不够全面,例如在气候因子的选择上仅选取了降水、气温、太阳辐射和蒸散发,未来可以增加更多的因子。在数据尺度方面,本研究使用的数据分辨率为 1km,这会一定程度上掩盖土地利用在空间上的微小差异,从而导致研究结果可能存

在一定的不确定性。

5 结论

(1) 2000—2018 年,青藏高原除土壤保持服务需求量外,各项生态系统服务供给量和需求量均呈上升趋势。

(2) 青藏高原各项生态系统服务供需匹配状况不同,碳固定服务供需比呈下降趋势,产水服务供需比呈上升趋势,土壤保持服务供需比波动变化,总体呈上升趋势,局部呈下降趋势。

(3) 青藏高原各项生态系统服务供需关系均以低低型空间匹配为主,均呈缩小趋势,主要分布在青藏高原的西部地区。

(4) 降水和坡度对生态系统服务供给影响显著,生态系统服务需求主要受人类活动的影响,与人口密度和国内生产总值存在显著的相关性,降水和气温是影响生态系统服务供需比的关键因素。

参考文献(References):

- [1] 张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展. 生态学报, 2014, 34(2): 316-325.
- [2] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.
- [3] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Kong X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 781-791.
- [4] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [5] Jiang B, Bai Y, Chen J Y, Alatalo J, Xu X B, Liu G, Wang Q. Land management to reconcile ecosystem services supply and demand mismatches—a case study in Shanghai municipality, China. *Land Degradation & Development*, 2020, 31: 2684-2699.
- [6] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. 生态学报, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [7] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 1375-1386.
- [8] Palacios-Agundez I, Onaindia M, Barraqueta P, Madariaga I. Provisioning ecosystem services supply and demand: the role of landscape management to reinforce supply and promote synergies with other ecosystem services. *Land Use Policy*, 2015, 47: 145-155.
- [9] Peña L, Casado-Arzuaga I, Onaindia M. Mapping recreation supply and demand using an ecological and a social evaluation approach. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 108-118.
- [10] Schild J E M, Vermaat J E, van Bodegom P M. Differential effects of valuation method and ecosystem type on the monetary valuation of dryland ecosystem services: a quantitative analysis. *Journal of Arid Environments*, 2018, 159: 11-21.
- [11] Wang L J, Gong J W, Ma S, Wu S, Zhang X M, Jiang J. Ecosystem service supply-demand and socioecological drivers at different spatial scales in Zhejiang Province, China. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 109058.
- [12] Alamgir M, Turton S M, MacGregor C J, Pert P L. Assessing regulating and provisioning ecosystem services in a contrasting tropical forest landscape. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 319-334.
- [13] Serna-Chavez H M, Kissling W D, Veen L E, Swenson N G, van Bodegom P M. Spatial scale dependence of factors driving climate regulation services in the Americas. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(7): 828-838.
- [14] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. *Science*, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [15] Song W, Deng X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [16] Filho W L, Barbir J, Sima M, Kalbus A, Nagy G J, Paletta A, Villamizar A, Martinez R, Azeiteiro U M, Pereira M J, Mussetta P C, Ivars J D, Salgueirinho Osório de Andrade Guerra J B, de Silva Neiva S, Moncada S, Galdies C, Klavins M, Nikolova M, Gogu R C, Balogun A L, Bouredji A, Bonoli A. Reviewing the role of ecosystems services in the sustainability of the urban environment: a multi-country analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121338.
- [17] Fang L L, Wang L C, Chen W X, Sun J, Cao Q, Wang S Q, Wang L Z. Identifying the impacts of natural and human factors on ecosystem service

- in the Yangtze and Yellow River Basins. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 127995.
- [18] Immerzeel W W, van Beek L P H, Bierkens M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [19] Li X Y, Long D, Scanlon B R, Mann M E, Li X D, Tian F Q, Sun Z L, Wang G Q. Climate change threatens terrestrial water storage over the Tibetan Plateau. *Nature Climate Change*, 2022, 12(9): 801-807.
- [20] Wang X F, Chu B Y, Feng X M, Li Y H, Fu B J, Liu S R, Jin J M. Spatiotemporal variation and driving factors of water yield services on the Qingzang Plateau. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 31-39.
- [21] Chen F H, Zhang J F, Liu J B, Cao X Y, Hou J Z, Zhu L P, Xu X K, Liu X J, Wang M D, Wu D, Huang L X, Zeng T, Zhang S, Huang W, Zhang X, Yang K. Climate change, vegetation history, and landscape responses on the Tibetan Plateau during the Holocene: a comprehensive review. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 243: 106444.
- [22] 肖玉, 谢高地, 安凯. 青藏高原生态系统土壤保持功能及其价值. *生态学报*, 2003, 23(11): 2367-2378.
- [23] 陈舒婷, 郭兵, 杨飞, 韩保民, 范业稳, 杨潇, 何田莉, 刘悦, 杨雯娜. 2000—2015 年青藏高原植被 NPP 时空变化格局及其对气候变化的响应. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2511-2527.
- [24] Pan T, Zou X T, Liu Y J, Wu S H, He G M. Contributions of climatic and non-climatic drivers to grassland variations on the Tibetan Plateau. *Ecological Engineering*, 2017, 108: 307-317.
- [25] Du M. Mutual influence between human activities and climate change in the Tibetan Plateau during recent years. *Global and Planetary Change*, 2004, 41(3/4): 241-249.
- [26] Lu C H. Assessment of ecological vulnerability on the Tibetan Plateau. *地理研究*, 2011, 30(12): 2289-2295.
- [27] Wang X F, Chu B Y, Feng X M, Li Y H, Fu B J, Liu S R, Jin J M. Spatiotemporal variation and driving factors of water yield services on the Qingzang Plateau. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1): 31-39.
- [28] Renard K, Foster G R, Weesies G, Porter J P. RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46: 30-33.
- [29] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 刘世荣, 周潮伟. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究. *生态学报*, 2021, 41(9): 3368-3380.
- [30] Lufafa A, Tenywa M M, Isabirye M, Majaliwa M J G, Woomer P L. Prediction of soil erosion in a Lake Victoria basin catchment using a GIS-based Universal Soil Loss model. *Agricultural Systems*, 2003, 76(3): 883-894.
- [31] Wang X F, Zhang X R, Feng X M, Liu S R, Yin L C, Chen Y Z. Trade-offs and synergies of ecosystem services in Karst area of China driven by grain-for-green program. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 101-114.
- [32] 刘菊, 傅斌, 张成虎, 胡治鹏, 王玉宽. 基于 InVEST 模型的岷江上游生态系统水源涵养量与价值评估. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 577-585.
- [33] Richard Sharp, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N. InVEST+ VERSION+ User's guide. The natural capital project; Stanford university, university of Minnesota, the nature conservancy, and World Wildlife Fund, 2016.
- [34] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [35] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 2001, 37: 701-708.
- [36] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): W02502.
- [37] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 811-841.
- [38] Sahle M, Saito O, Fürst C, Yeshitela K. Quantification and mapping of the supply of and demand for carbon storage and sequestration service in woody biomass and soil to mitigate climate change in the socio-ecological environment. *Science of the Total Environment*, 2018, 624: 342-354.
- [39] 张肖, 向晓东, 刘汉杰, 吴高明. 钢铁行业碳排放量核算方法的实证性研究. *工业安全与环保*, 2012, 38(6): 86-88.
- [40] 王晓峰, 贾子续, 冯晓明, 马嘉豪, 张欣蓉, 周继涛, 符鑫鑫. 黄土高原土壤保持服务供需平衡及驱动因素分析. *生态学报*, 2022: 1-13.
- [41] HajyAkbari F, Sietsma J, Petrov R H, Miyamoto G, Furuahara T, Santofimia M J. A quantitative investigation of the effect of Mn segregation on microstructural properties of quenching and partitioning steels. *Scripta Materialia*, 2017, 137: 27-30.
- [42] 陈槐, 鞠佩君, 张江, 王元云, 朱求安, 颜亮, 康晓明, 何奕忻, 曾源, 郝彦宾. 青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析. *科学通报*, 2020, 65(22): 2406-2418.
- [43] 朴世龙, 张宪洲, 汪涛, 梁尔源, 汪诗平, 朱军涛, 牛犇. 青藏高原生态系统对气候变化的响应及其反馈. *科学通报*, 2019, 64(27): 2842-2855.

- [44] 南笛, 杨子寒, 毕旭, 付奇, 李波. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [45] 李成, 赵洁, 庄智程, 顾思浩. 长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素. *生态学报*, 2022, 42(14): 5708-5720.
- [46] 景海超, 刘颖慧, 贺佩, 张家琦, 董婧怡, 汪怡. 青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素——以那曲市为例. *生态学报*, 2022, 42(7): 2657-2673.
- [47] Hua T, Zhao W W, Cherubini F, Hu X P, Pereira P. Sensitivity and future exposure of ecosystem services to climate change on the Tibetan Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2021, 36(12): 3451-3471.
- [48] Su C H, Dong M, Fu B J, Liu G H. Scale effects of sediment retention, water yield, and net primary production: a case-study of the Chinese Loess Plateau. *Land Degradation & Development*, 2020, 31(11): 1408-1421.
- [49] Ma S, Wang L J, Jiang J, Chu L, Zhang J C. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 318: 128592.
- [50] Guo S S, Wu C Y, Wang Y H, Qiu G Q, Zhu D, Niu Q, Qin L. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change, human activity and landscape pattern in the upper and middle Yellow River of China. *Ecological Indicators*, 2022, 136: 108603.
- [51] Sun X Y, Shan R F, Liu F. Spatio-temporal quantification of patterns, trade-offs and synergies among multiple hydrological ecosystem services in different topographic basins. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268(prepublish): 268122338.
- [52] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, Tao B, Guo R, Yan C R. Effects of climate warming on net primary productivity in China during 1961-2010. *Ecology and Evolution*, 2017, 7(17): 6736-6746.
- [53] Wu Z T, Dijkstra P, Koch G W, Peñuelas J, Hungate B A. Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 927-942.
- [54] Maestre F T, Delgado-Baquerizo M, Jeffries T C, Eldridge D J, Ochoa V, Gozalo B, Quero J L, García-Gómez M, Gallardo A, Ulrich W, Bowker M A, Arredondo T, Barraza-Zepeda C, Bran D, Florentino A, Gaitún J, Gutiérrez J R, Huber-Sannwald E, Jankju M, Mau R L, Miriti M, Naseri K, Ospina A, Stavi I, Wang D L, Woods N N, Yuan X, Zaady E, Singh B K. Increasing aridity reduces soil microbial diversity and abundance in global drylands. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(51): 15684-15689.
- [55] Wang T, Zhao Y T, Xu C Y, Ciais P, Liu D, Yang H, Piao S L, Yao T D. Atmospheric dynamic constraints on Tibetan Plateau freshwater under Paris climate targets. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 219-225.
- [56] Wei H J, Fan W G, Wang X C, Lu N C, Dong X B, Zhao Y N, Ya X J, Zhao Y F. Integrating supply and social demand in ecosystem services assessment: a review. *Ecosystem Services*, 2017, 25: 15-27.
- [57] Lu Y, Liu S L, Wang F F, Liu Y X, Li M Q, Wang Q B, Dong S K, Zhao W W, Tran L P, Sun Y X. Effects of agricultural activities on energy-carbon-water nexus of the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 331: 129995.
- [58] Zhao X, Harbor J, Engel B, Theller L, Yu F, Cao G C, Cui Y X, Tang W J, Zhang M T. Analysis of food-energy-water nexus based on competitive uses of stream flows of BeiChuan River in eastern QingHai-Tibet Plateau, China. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, 37(1): 62-72.
- [59] Fan Y P, Fang C L. Measuring Qinghai-Tibet Plateau's sustainability. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85: 104058.
- [60] Felipe-Lucia M R, Martín-López B, Lavorel S, Berraquero-Díaz L, Escalera-Reyes J, Comín F A. Ecosystem services flows: why stakeholders&apost; power relationships matter. *PLoS One*, 2015, 10(7): e132232.