

DOI: 10.20103/j.stxb.202211063175

殷允可, 李昊瑞, 张铭, 王良杰, 姜姜. 不同气候区生态系统服务权衡空间异质性及其驱动因素——以川滇-黄土高原生态屏障带为例. 生态学报, 2024, 44(1): 107-116.

Yin Y K, Li H R, Zhang M, Wang L J, Jiang J. Spatial heterogeneity of ecosystem service trade-offs in different climatic regions and its driving factors: A case study of the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau ecological barrier zone. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 107-116.

# 不同气候区生态系统服务权衡空间异质性及其驱动因素

——以川滇-黄土高原生态屏障带为例

殷允可<sup>1,2</sup>, 李昊瑞<sup>1,2</sup>, 张 铭<sup>1,2</sup>, 王良杰<sup>1,2,\*</sup>, 姜 姜<sup>1,2</sup>

1 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

2 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 南京 210037

**摘要:**厘清生态系统服务权衡关系的驱动因素对实现生态系统高效管理至关重要。然而,在不同气候区生态系统服务权衡关系在空间上如何变化及其驱动机制是否一致,尚不清楚。以川滇-黄土高原生态屏障带为例,基于 InVEST 模型、CASA 模型评估生态系统服务空间分布特征,采用 RMSE 量化生态系统服务权衡关系,利用地理探测器探究不同气候区生态系统服务权衡的驱动机制,以为生态系统管理提供参考依据。结果如下:(1)不同生态系统服务在不同气候区存在明显差异,WY 整体由东北向西南呈递减趋势,NPP 和 SC 呈现由北向南递减的趋势。(2)WY∩NPP 的权衡最高值在中温带为 0.317,最低值在高原气候区为 0.181。WY∩SC 在不同气候区 RMSE 变化幅度较小,由南向北呈现递减趋势;中亚热带气候区 WY∩SC 的权衡程度最高,为 0.295,南温带的权衡程度最低,为 0.229。NPP∩SC 的 RMSE 差值最小,仅有 0.064,高原气候区权衡程度略低于温带和亚热带。(3)在不同气候区自然因素对权衡关系作用显著高于社会因素,但在人口密集区,人为活动可以部分突破自然因素的约束,使其对权衡的影响有所提升。因此,在制定不同气候区生态系统服务管理的针对性措施时,应考虑生态系统服务权衡的空间特征和驱动因素的差异性。

**关键词:**生态系统服务;权衡;川滇-黄土高原生态屏障带;驱动因素

## Spatial heterogeneity of ecosystem service trade-offs in different climatic regions and its driving factors: A case study of the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau ecological barrier zone

YIN Yunke<sup>1,2</sup>, LI Haorui<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming<sup>1,2</sup>, WANG Liangjie<sup>1,2,\*</sup>, JIANG Jiang<sup>1,2</sup>

1 Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China of Nanjing Forestry University, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

2 Jiangsu Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

**Abstract:** Clarifying the driving factors of trade-offs in ecosystem services (ESs) is crucial for promoting effective ecosystem management. However, it is unclear whether the trade-offs of ESs are spatially static in different climate zones and whether their driving mechanisms are consistent. In this study, taking the Sichuan-Yunnan-Loess Plateau Ecological Barrier Zone (SYPEBZ) as an example, the InVEST model and CASA model were used to evaluate ESs including water yield (WY), soil conservation (SC), and net primary productivity (NPP). RMSE was used to quantify ESs trade-offs and geographic detectors were used to analyze the trade-offs of different climatic zones and their driving factors. In order to

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2018YFC0507304);国家自然科学基金项目(41601209)

**收稿日期:**2022-11-06; **网络出版日期:**2023-06-29

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liang-jiewang@njfu.edu.cn

provide a reference for ecosystem management. The results are as follows: (1) Different ESs differed significantly in different climate zones. The WY decreased from northeast to southwest, and the NPP and SC decreased from north to south of the study area. (2) The highest value of the trade-off between WY and NPP was 0.317 in the temperate zone and the lowest value was 0.181 in the plateau climate zone. The RMSE of WY and SC in different climatic regions changed slightly, showing a decreasing trend from south to north. The trade-off between WY and SC was the highest (0.295) in the mid-subtropical climate zone, and the lowest in the southern temperate zone (0.229). The RMSE difference between NPP and SC was the smallest with only 0.064, and the trade-off degree of plateau climate zone was slightly lower than that of temperate and subtropical zones. (3) In different climatic zones, natural factors generally drive trade-offs more than social factors, But in densely populated areas human activities could partially break through the constraints of natural factors and increase their impact on trade-offs. Therefore, when formulating targeted measures for ESs management in different climate zones, the spatial characteristics of ESs trade-offs and the differences in driving factors should be considered.

**Key Words:** ecosystem services; trade-offs; Sichuan-Yunnan-Loess Plateau Ecological Barrier Zone; driving factors

生态系统服务是指人类在生态系统中直接或间接获取的利益,其相互作用、相互联系,是人类发展的基本条件之一<sup>[1]</sup>。在一定尺度下,生态系统服务之间并非完全独立,而是以多种复杂方式相互作用<sup>[2]</sup>,此消彼长的权衡是其中的典型关系<sup>[3]</sup>。随着人类活动与生态保护矛盾日益凸显,探究生态系统服务权衡关系已成为当前生态学研究的核心议题之一<sup>[4]</sup>。张文静等<sup>[5]</sup>通过探讨不同生态系统服务时空变化及其权衡关系,表明不同区域生态系统服务权衡差异明显。Qiu 等<sup>[6]</sup>研究指出农业生态系统服务在不同气候区呈现不同的变化趋势,亚热带和暖温带地区作物生产与土壤保持的权衡显著高于中温带地区。汪晓珍等<sup>[7]</sup>研究发现黄土高原地区土壤保持与水源涵养为协同关系,固碳与水源涵养为权衡关系,但在干旱气候区和半湿润气候区土壤保持和水源涵养呈权衡关系,而在高原气候区和半湿润气候区固碳与水源涵养为协同关系。虽然许多研究探讨了生态系统服务权衡关系的时空变化,然而在不同气候区,生态系统服务权衡关系是否一致,目前研究还不够深入。

生态系统服务的驱动因素由自然、社会因素组成<sup>[8]</sup>。自然因素主要包括气候、地形、植被等<sup>[9]</sup>。社会因素可分为直接因素和间接因素两大类,前者包括人口变化、技术发展、GDP、政治政策等;后者包括城市化进程、土地利用集约化程度、土地所有权、土地投入等<sup>[10]</sup>。国内外学者在研究生态系统服务驱动因素时,发现产水量受相对湿度、降雨等自然因素的影响较大<sup>[11]</sup>,固碳和生境质量与土地利用、覆被类型、温度和坡向关系密切<sup>[12]</sup>,降水和植被覆盖度与土壤保持服务呈正相关关系<sup>[13]</sup>。方露露等<sup>[14]</sup>研究了长江、黄河流域的气候变化、土地利用变化以及人类活动等对生态系统服务的影响,结果表明,在长江地区气温升高增加了土壤的固碳能力,而在黄河地区则不明显;在长江和黄河区域,降水和土壤侵蚀之间存在着明显的协同关系。此外,生态系统服务权衡的驱动因素也是众多学者研究对象,陈田田等<sup>[15]</sup>在西南地区生态系统服务权衡关系研究中发现其主导因素是降水量、坡度和 GDP,而植被覆盖是生态系统服务协同关系变化的主导因子。Qiang 等<sup>[16]</sup>在安塞流域的研究指出海拔高度对土壤保持和土壤含水量的权衡关系具有主导影响,坡度和坡位次之。张弛等<sup>[17]</sup>分析了珠江三角洲地区生态系统服务权衡关系,在小尺度上,地形因子是生态系统服务权衡的决定因素,而在大尺度上,气候因子、景观因子为主要因素。虽然,已有研究分析了不同空间尺度下生态系统服务权衡的驱动因素,但对不同气候区生态系统服务权衡关系的驱动机制是否一致,还需进一步探究。

川滇-黄土高原生态屏障带是我国地势第一阶梯向第二阶梯过渡区域,其特殊的地理位置、丰富的自然资源使其成为国家重要的生态安全屏障<sup>[18]</sup>。目前已有学者开展了川滇-黄土高原生态屏障带生态系统服务研究<sup>[19-21]</sup>。探索了川滇-黄土高原生态屏障带产水量、土壤保持和固碳的权衡关系,表明产水量与固碳为权衡关系,土壤保持与固碳,土壤保持与产水量为弱协同关系。然而,这些研究多集中于生态屏障带整体的权衡关系和驱动机制,对不同气候区生态系统服务权衡强弱空间变化及其驱动机制的研究鲜见报道。因此,本研

究以川滇-黄土高原生态屏障带为研究区域,采用 InVEST 模型、CASA 模型评估生态系统服务空间分布特征,并采用地理探测器分析川滇-黄土高原生态屏障带生态系统服务权衡强弱变化的空间异质性及其在不同气候区驱动的差异性,研究结果可为区域生态系统高效管理提供参考。

## 1 研究区概况

川滇-黄土高原生态屏障带 (24°40'—34°55' N, 98°40'—108°20' E) 包括了云南、四川、甘肃、陕西、山西、宁夏等 6 个省(区),面积约为 41 万平方千米(图 1)<sup>[21]</sup>。川滇地区属亚热带季风性湿润气候,降水多集中在夏季,年降水量达 1000mm 以上,气温年较差大;该区域土壤以红壤、黄壤为主,植被类型丰富,以常绿阔叶林为主,粮食作物以水稻为主。黄土高原生态屏障区属大陆性季风气候,年均降水量在 150—750mm,降水时空差异较大;该区域土壤以黄土为主,区域内植被覆盖率低,天然次生林和草地面积少<sup>[22]</sup>。

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

本研究数据包括五大类:土地利用/覆被数据、数字高程模型 (DEM)、土壤数据、气象数据和社会经济数据(表 1)。

表 1 本文使用的主要数据来源  
Table 1 Main data sources in this study

数据类型 Date type	分辨率 Resolution	数据来源 Date source	数据用途 Date usage
土地利用/覆被数据 Land use/Land cover	1km×1km	资源环境数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )	服务计算 驱动因素分析
数字高程模型 DEM	1km×1km	资源环境数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )	服务计算 坡度计算
土壤数据 Soil data	1km×1km	世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version, HWSD)	服务计算
气象数据 Meteorological date	1km×1km	资源环境数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )	服务计算 驱动因素分析
社会经济 Socioeconomic data	1km×1km	资源环境数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http://www.resdc.cn/</a> )	驱动因素分析

### 2.2 生态系统服务的评估方法

川滇-黄土高原生态屏障带水土流失严重,是中国退耕还林还草的重点区域,其中黄土高原是中国典型干旱区,地貌类型复杂多样,土质疏松,水资源需求量大,是生态环境脆弱地区<sup>[21-22]</sup>。因此,选取产水量、固碳、土壤保持为主要生态系统服务研究对象。

#### 2.2.1 产水量 (Water Yield, WY)

选用 InVEST 模型<sup>[23]</sup>模拟流域产水量,产水量基于水量平衡原理和 Budyko 曲线,公式如下:

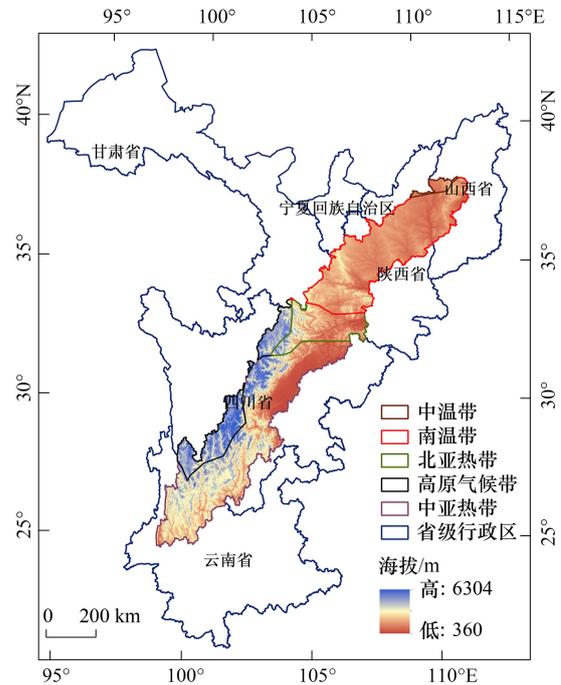


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

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

式中,  $Y(x)$  为研究区每个栅格单元的年产水量;  $AET(x)$  为每个栅格单元的年实际蒸散量;  $P(x)$  为每个栅格单元的年降水量, 单位均为 mm。

其中: 实际蒸散量与降水量比值  $AET(x) / P(x)$  的计算, 同样基于 Budyko 水热耦合平衡假设公式。

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = \frac{1 + \omega_x R_{xj}}{1 + \omega_x R_{xj} + 1/R_{xj}} \quad (2)$$

式中,  $R_{xj}$  定义为蒸散发与降水量的比值, 是 LULC<sub>*j*</sub> 下像元  $x$  的无量纲 Budyko 干燥指数,  $\omega_x$  为植物有效水系数, 是一个非线性函数描述自然气候—土壤特性的物理参数<sup>[24]</sup>。 $\omega_x$  和  $R_{xj}$  可计算如下:

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

$$R_{xj} = \frac{k_{xj} ET_{ox}}{P_x} \quad (4)$$

$$Z = \frac{P(x) \times (w - 1.25)}{AWC(x)} \quad (5)$$

式中, 其中  $Z$  为 Zhang 系数, 其值在 1—30。 $k_{xj}$  是与像元  $x$  上 LULC<sub>*j*</sub> 相关联的植物蒸散系数, 其很大程度上由  $x$  的营养特性决定。AWC( $x$ ) 是植物有效水含量 (mm), 可在土壤中保持和释放以供植物使用。AWC( $x$ ) 可以用田间持水量和萎蔫点之差与土壤深度和根深最小值的乘积来估算。

$$AWC(x) = \min(\text{Maxsoil\_depth}, \text{root\_depth}) \times \text{PAWC} \quad (6)$$

式中, Soil\_depth 为土壤深度; root\_depth 为根系深度; PAWC 为植物可利用水, 基于土壤质地和土壤有机质建立的非线性拟合模型, 取值范围 0—1, 采用周文佐<sup>[25]</sup>提出的公式计算

$$\text{PAWC} = 54.509 - 0.132 \times \text{Sand\%} - 0.003 \times (\text{Sand\%}) - 0.055 \times \text{Silt\%} - 0.006 \times (\text{Silt\%})^2 - 0.738 \times \text{Clay\%} + 0.007 \times (\text{Clay\%})^2 - 2.688 \times \text{OM\%} + 0.501 \times (\text{OM\%})^2 \quad (7)$$

式中, 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 固碳 (Net Primary Productivity, NPP)

采用净初级生产力作为评估计算固碳的定量指标, 基于 CASA 模型评估计算 NPP, 固碳是某像元吸收的光合有效辐射与该像元实际光能利用率之间的乘积。计算公式为:

$$\text{NPP}_{(x,t)} = \text{APAR}_{(x,t)} \times \varepsilon_{(x,t)} \quad (8)$$

$$\text{APAR}(x,t) = \text{SOL}(x,t) \times \text{FPAR}(x,t) \quad (9)$$

$$\varepsilon(x,t) = T_{e1}(x,t) \times T_{e2}(x,t) \times W_e(x,t) \times \varepsilon_{\max} \quad (10)$$

式中,  $\text{NPP}_{(x,t)}$  表示像元  $x$  在  $t$  月的净初级生产力,  $\text{APAR}(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月吸收的光合有效辐射,  $\varepsilon(x,t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月的实际光能利用率。SOL( $x,t$ ) 表示  $t$  月在像元  $x$  处的太阳总辐射量 (MJ/m<sup>2</sup>); FPAR( $x,t$ ) 表示植被层对入射光合有效辐射的吸收比例; 常数 0.5 表示光合有效辐射占总辐射的比例。 $T_{e1}$  和  $T_{e2}$  分别为低温和高温胁迫因子;  $W_e$  为水分胁迫因子, 反映水分条件的影响;  $\varepsilon_{\max}$  为理想条件下最大光能利用率 (g C/MJ), 取值因植被类型而异<sup>[26]</sup>。

### 2.2.3 土壤保持 (Soil Conservation, SC)

目前, 土壤保持最为普遍的计算方法是修正的通用土壤流失方程 RUSLE, 通过每个栅格单元的潜在土壤流失量 (RKLS) 减去实际土壤流失量 (USLE) 得到土壤保持<sup>[27]</sup>。其计算公式如下:

$$A_C = A_P - A_R \quad (11)$$

$$A_P = \text{RKLS} \quad (12)$$

$$A_R = \text{RKLSCP} \quad (13)$$

式中,  $A_c$  为土壤的保持量 ( $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $A_p$  为潜在的土壤侵蚀量 ( $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $A_R$  为土壤现实的侵蚀量 ( $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子;  $K$  为土壤可蚀性因子;  $LS$  为坡长和坡度因子的乘积;  $C$  为植被的覆盖度与经营管理因子;  $P$  为土壤的保持措施因子。各因子详细计算参见文献<sup>[27]</sup>。

## 2.3 数据分析方法

### 2.3.1 生态系统服务权衡的计算

均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 是量化生态系统服务之间权衡的有效指标, 表示平均生态系统服务间的偏差, 用来计算每个个体生态系统服务与平均生态系统服务之间的差异<sup>[28]</sup>。计算均方根误差之前需要将生态系统服务标准化。标准化公式为:

$$ES_{\text{std}} = \frac{ES_{\text{obs}} - ES_{\text{min}}}{ES_{\text{max}} - ES_{\text{min}}} \quad (14)$$

式中,  $ES_{\text{std}}$  表示生态系统服务的标准化值,  $ES_{\text{obs}}$  表示生态系统服务观测值,  $ES_{\text{min}}$  表示生态系统服务最小值,  $ES_{\text{max}}$  表示生态系统服务的最大值。

在计算均方根误差前需了解  $\overline{ES}$ , 其为生态系统服务的期望值<sup>[29]</sup>。计算公式为:

$$\overline{ES} = \sum_{i=1}^n (W_i \times ES_i) \quad (15)$$

式中,  $n$  为生态系统服务价值个数,  $ES_i$  为第  $i$  个生态系统服务数据的标准化值,  $W_i$  为  $ES_i$  的权重。  $W_i$  是由生态系统服务的重要性决定的。在我们的研究中, 我们假设所有个体生态系统服务具有相同的重要性, 因此  $W_i = 1/n (i = 0, \dots, n)$ 。

RMSE 是观测值与真值偏差的平方和与观测次数其比值的平方根。公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (ES_i - \overline{ES})^2} \quad (16)$$

式中,  $n$  为生态系统服务价值个数;  $ES_i$  为第  $i$  个生态系统服务数据的标准化值;  $\overline{ES}$  其为生态系统服务的期望值。

### 2.3.2 权衡的驱动因素的选择

由于研究区横跨多个气候区且地形复杂、沟壑纵横、人口分布不均匀, 使得研究区生态系统服务权衡受各类自然、社会驱动因素显著影响<sup>[30]</sup>。结合现有研究和川滇-黄土高原生态屏障带自然、社会特点, 本研究选取温度、降水、NDVI、坡度、高程、人口和 GDP 作为生态系统服务权衡的驱动因素进行探测。

### 2.3.3 不同气候区生态系统服务权衡的驱动因素分析

地理探测器是探测空间分异性并揭示其背后驱动力的一种统计学方法<sup>[31]</sup>, 其可用来探测两变量之间可能的因果关系<sup>[29]</sup>, 依据川滇-黄土高原生态屏障带 5 个气候区的生态系统服务变化, 以不同气候区的  $WY \cap SC$ 、 $WY \cap NPP$ 、 $SC \cap NPP$  的权衡作为自变量, 以上述影响因子为因变量, 基于地理探测器 (Geo Detector) 工具的“因子探测”功能探讨川滇-黄土高原生态屏障带生态系统服务权衡空间变化的主导因子。

本研究引入决定力指标  $F$  来度量各驱动因素对川滇—黄土高原生态屏障带驱动因素空间变化的影响程度。计算公式为:

$$F = 1 - \frac{1}{ab^2} \sum_{c=1}^d a_c \times b_c^2 \quad (17)$$

式中,  $F$  的值域为 0—1,  $F$  值越大表示变量对驱动因素空间变化的解释力越强。当  $F$  为 0 时将无法解释其空间分布, 当  $F$  为 1 时变量与驱动因素空间变化具有一致性。其中,  $c = 1, 2, d$  表示自变量  $Z$  或因变量  $Y$  的分区,  $a$  为研究区域总样本数,  $b^2$  为研究区域的总离散方差,  $a_c$  为分区  $c$  的样本数,  $b_c^2$  为因变量  $Y$  在分区  $k$  的离散方差。

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同气候区生态系统服务变化

不同气候区生态系统服务功能存在明显差异(表2)。北亚热带平均 WY 最高,为 62.46mm/a,最低在高原气候区,为 13.54mm/a;中温带、南温带平均 WY 适中,均低于亚热带地区,高于高原气候区。高原气候区的 WY 远低于亚热带和温带,从亚热带到温带,WY 呈递减趋势。高原气候区的 SC 最高,为 6876.86t/km<sup>2</sup>;中温带的 SC 量最低,为 280.72t/km<sup>2</sup>,SC 从温带到亚热带再到高原气候区呈明显递增趋势。南温带平均 NPP 最大,为 135.14g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>;北亚热带最小,为 1.82g C m<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>,NPP 由北向南呈现明显递减趋势。

表 2 不同气候区生态系统服务表达

Table 2 Expression of ESs in different climatic zones

气候区 Climatic zones	平均产水量/(mm/a) Average water yield	平均土壤保持量/(t/km <sup>2</sup> ) Average soil conservation	平均固碳/(g C m <sup>-2</sup> a <sup>-1</sup> ) Average net primary productivity
中温带 Moderate temperate zone	50.58	280.72	118.93
南温带 Southern temperate zone	37.55	578.22	135.14
北亚热带 Northern subtropical	62.45	1239.01	1.82
高原气候区 Plateau climate zone	13.54	6876.86	16.12
中亚热带 Central subtropical	62.33	841.21	4.90

#### 3.2 不同气候区生态系统服务权衡的空间变化

WY、NPP、SC 之间的权衡在不同气候区差异明显(图2,表3)。研究区整体的 WY∩NPP 的 RMSE 为 0.24。WY∩NPP 的权衡程度在气候区中由北向南呈现递减趋势,最高在中温带为 0.31,最低在高原气候区为 0.18。研究区 WY∩SC 的 RMSE 为 0.26,不同气候区 RMSE 变化幅度较小,由南向北呈现递减趋势,中亚热带气候区 WY∩SC 的权衡程度最高,为 0.29;南温带的权衡程度最低,为 0.22。研究区 NPP∩SC 的 RMSE 为 0.34。不同气候区 NPP∩SC 的 RMSE 差值最小,仅有 0.064,高原气候区权衡程度略低于温带和亚热带。

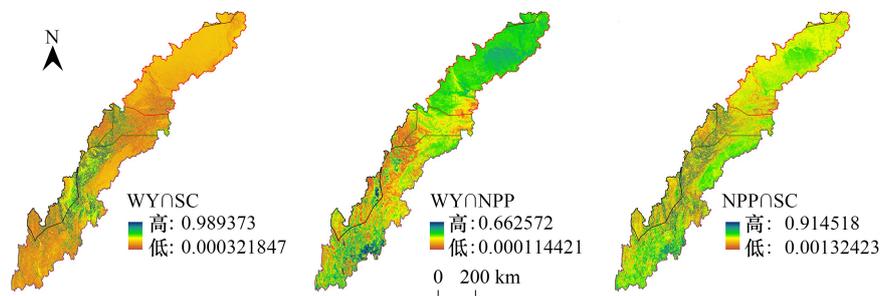


图 2 生态系统服务权衡的时空分布

Fig.2 Spatial distribution of ESs trade-offs

WY:产水量 water yield;SC:土壤保持 soil conservation; NPP:固碳 net primary productivity

表 3 不同气候区生态系统权衡 RMSE

Table 3 RMSE of ESs trade-offs in different climatic zones

气候区 Climatic zones	WY∩SC	WY∩NPP	NPP∩SC	气候区 Climatic zones	WY∩SC	WY∩NPP	NPP∩SC
中温带 Moderate temperate zone	0.24	0.31	0.32	高原气候区 Plateau climate zone	0.28	0.18	0.30
南温带 Southern temperate zone	0.22	0.30	0.33	中亚热带 Central subtropical	0.29	0.22	0.36
北亚热带 Northern subtropical	0.25	0.20	0.31				

WY:产水量 water yield;SC:土壤保持 soil conservation; NPP:固碳 net primary productivity

### 3.3 不同气候区生态系统服务权衡的驱动因素

川滇-黄土高原生态屏障带不同气候区权衡的驱动因素存在明显差异(表4)。自然因素是驱动生态系统服务权衡变化的主要因素,高程因子(0.55)和人口因子(0.27)分别是中温带 WY $\cap$ SC 权衡影响最为显著和微弱的驱动因素。气温因子(0.62、0.58)对 WY $\cap$ NPP、SC $\cap$ NPP 权衡影响最显著,人口因子对其影响最低(0.18、0.32)。在南温带,对 WY $\cap$ SC、WY $\cap$ NPP、SC $\cap$ NPP 权衡影响最显著的都为 NDVI 因子(0.23、0.31、0.13),人口因子和 GDP 对其影响最低,均小于 0.1。在北亚热带气候区,对 WY $\cap$ SC、SC $\cap$ NPP 权衡影响最大的是高程因子(0.12、0.03),对 WY $\cap$ NPP 权衡影响最大的是气候因子(0.37),NDVI 因子对这三个权衡的影响最小(0.01、0.04、0.01)。在高原气候区,对 WY $\cap$ SC、SC $\cap$ NPP 权衡影响最大的都为坡度因子(0.09、0.09),对 WY $\cap$ NPP 权衡影响最大的为气候因子(0.36)。人口、GDP 因子对这三个权衡的影响最小。在中亚热带气候区,对 WY $\cap$ SC、SC $\cap$ NPP、WY $\cap$ NPP 权衡影响最大的都为降水因子(0.16、0.17、0.09),GDP 因子对这三个权衡的影响是最小的(0.02、0.01、0.01)。

表 4 2015 年生态系统服务空间变化权衡的驱动因素

Table 4 Driving factors for spatial change of ESs trade-offs in 2015

气候区 Climate zones	权衡关系 Trade-off	气温 Temperature	降水 Precipitation	NDVI	坡度 Slope	高程 DEM	人口 Population	GDP
川滇气候区 Sichuan-Yunnan climate zone	WY $\cap$ SC	0.065 **	0.035 **	0.015 **	0.146 **	0.081 **	0.025 **	0.009 **
	WY $\cap$ NPP	0.187 **	0.195 **	0.090 **	0.082 **	0.138 **	0.024 **	0.017 **
	SC $\cap$ NPP	0.057 **	0.061 **	0.008 **	0.033 **	0.034 **	0.002	0.006 *
中温带 Middle temperate zone	WY $\cap$ SC	0.546 **	0.502 **	0.538 **	0.374 **	0.553 **	0.274 **	0.309 **
	WY $\cap$ NPP	0.626 **	0.481 **	0.595 **	0.244 **	0.518 **	0.184 **	0.339 **
	SC $\cap$ NPP	0.589 **	0.505 **	0.550 **	0.337 **	0.524 **	0.324 **	0.443 **
南温带 Southern temperate zone	WY $\cap$ SC	0.032 **	0.126 **	0.232 **	0.134 **	0.079 **	0.008	0.026
	WY $\cap$ NPP	0.138 **	0.221 **	0.312 **	0.146 **	0.221 **	0.002	0.027
	SC $\cap$ NPP	0.070 **	0.080 **	0.130 **	0.064 **	0.065 **	0.069 **	0.007
北亚热带 North subtropical	WY $\cap$ SC	0.110 **	0.037 **	0.004 *	0.098 **	0.127 **	0.047 **	0.034 **
	WY $\cap$ NPP	0.371 **	0.098 **	0.047 **	0.069 **	0.355 **	0.301 **	0.116 **
	SC $\cap$ NPP	0.010 **	0.024 **	0.019 **	0.027 **	0.038 **	0.035 **	0.027
高原气候区 Plateau climate zone	WY $\cap$ SC	0.024 **	0.064 **	0.053 **	0.097 **	0.092 **	0.062 **	0.058 **
	WY $\cap$ NPP	0.368 **	0.230 **	0.267 **	0.022 **	0.322 **	0.071 **	0.097 **
	SC $\cap$ NPP	0.064 **	0.068 **	0.013 **	0.099 **	0.061 **	0.012	0.021
中亚热带 Central subtropical	WY $\cap$ SC	0.148 **	0.165 **	0.041 **	0.112 **	0.117 **	0.147 **	0.026 **
	WY $\cap$ NPP	0.112 **	0.174 **	0.034 **	0.015 **	0.036 **	0.105 **	0.011 **
	SC $\cap$ NPP	0.021 **	0.097 **	0.056 **	0.048 **	0.042 **	0.001	0.001

\*\* 表示在 0.01 水平上显著相关; \* 表示在 0.05 水平上显著相关

## 4 讨论

### 4.1 不同气候区生态系统服务的空间变化

本研究以川滇-黄土高原生态屏障带为研究区,分析 SC、WY 和 NPP 在不同气候区的空间变化。结果表明 WY 由北向南先递减后递增,SC 由北向南先递增后递减,温带和亚热带的 WY 远高于高原气候区,高原气候区的平均 SC 高于其他气候区。这是因为高原气候区位于研究区西南方向,海拔高、人口密度小,城市建设用地少,植被破坏程度低<sup>[31]</sup>。此外,该地区空气稀薄、水汽含量和大气气溶胶含量相对较少,导致降水减少,因此 WY 也明显低于其他气候区<sup>[32]</sup>。NPP 由北向南呈现递减趋势,北亚热带主要的土地利用类型为旱地、低覆盖草地、沙地,植被类型单一且覆盖度低,土壤沙化盐碱化严重,使得 NPP 能力降低<sup>[33]</sup>。

### 4.2 不同气候区生态系统服务权衡的空间变化及其驱动因素

不同气候区生态系统服务间呈现不同强度的权衡关系。采用均方根误差法衡量生态系统服务的权衡强

弱关系, RMSE 数值愈低则表示权衡强度愈低<sup>[34]</sup>。WY $\cap$ SC 的权衡高值主要分布在高原和中亚热带气候区, 位于研究区的南部, 地势起伏较大。地形对 WY $\cap$ SC 的权衡关系有一定的影响<sup>[35]</sup>, 坡度越大, 地形对 WY $\cap$ SC 的权衡影响越大<sup>[36]</sup>。WY 增加可能会导致水土流失<sup>[37]</sup>, 使得 WY $\cap$ SC 的权衡值升高。WY $\cap$ NPP 的权衡高值主要分布在中温带, 整体呈现由北向南递减趋势。这是因为从北到南, 植被覆盖度提高, 生境质量改善, 但蒸散作用加强, 地面蓄水能力减弱, 在降水量一定的情况下, 蒸散量越大, WY 越低<sup>[38-41]</sup>。王鹏涛等<sup>[42]</sup>研究表明 NPP 高的区域一般降水量充沛, 降水量增大则相应的土壤侵蚀量增加, 导致 SC 下降, 因此, SC $\cap$ NPP 的权衡呈现由南向北递减的趋势, 权衡高值区主要位于中亚热带气候区。

川滇-黄土高原生态屏障带地形复杂, 不同气候区由于气候、地形、植被和人类活动等因素之间的差异, 使得权衡关系的驱动因素存在明显不同。亚热带气候区冬温夏热、四季分明, 降水丰沛, 季节分配比较均匀, 气候差异明显, 已有研究表明气温、降水、NDVI 因子在亚热带地区对权衡影响较为显著<sup>[43-44]</sup>。中温带位于黄土高原地区, 地势起伏频率大, 使得高程因子对权衡贡献最大。南温带中 WY $\cap$ SC、WY $\cap$ NPP、SC $\cap$ NPP 权衡影响最显著的是植被因素, 该地区植被类型以落叶阔叶林为主, 森林覆盖率较高, 因此 NDVI 因子对权衡贡献最大<sup>[45-46]</sup>。高原气候区地形地貌复杂多样, 地形、地势以垂直变化显著为重要特征, 坡度因子在 WY $\cap$ SC、SC $\cap$ NPP 权衡关系中影响最大<sup>[47-48]</sup>。研究结果表明自然因素对生态系统服务关系影响强度显著高于社会因素<sup>[49-51]</sup>, Wang 等<sup>[52]</sup>在研究生态系统服务权衡的影响因素中发现, 不同气候区中气候因子、地形因素的贡献最大, 社会因素对 WY $\cap$ SC、WY $\cap$ NPP、SC $\cap$ NPP 之间权衡的贡献受气候带的影响不显著<sup>[53-54]</sup>。

#### 4.3 不确定性分析与展望

研究评估了川滇-黄土高原生态屏障带不同气候区 WY、NPP、SC, 探索其权衡关系及其驱动机制。然而, 本研究仍具有以下局限性。(1) 研究仅选取了三个主要的生态系统服务来探索驱动机制及其权衡关系, 没有讨论生物多样性、生境质量等生态系统服务是否也存在权衡关系, 在未来的研究中可以讨论更多的生态系统服务权衡关系来增加说服力;(2) 研究基于 InVEST 模型评估计算生态系统服务, 尽管 InVEST 模型已广泛应用于生态系统服务评估中, 但在模型评估中仍存在一定的不确定性;(3) 时间和空间是生态系统服务及其关系研究的重要视角, 未来可以考虑将研究区不同时期生态系统服务权衡关系纳入研究, 以获得更完善的结果。

## 5 结论

研究量化了川滇-黄土高原生态屏障带不同气候区 WY、NPP、SC 的空间分布格局, 探索了生态系统服务权衡关系及其驱动机制。研究结果表明 WY 在高原气候区低于其他四个气候区, 而 SC 高于其他区域, NPP 呈现出由北到南递减的趋势。不同气候区 WY、NPP、SC 相互之间的权衡存在空间异质性, WY $\cap$ NPP 的权衡由北向南呈现递减趋势, 而 WY $\cap$ SC 的权衡呈现递增趋势, 在中亚热带气候区最高、南温带最低。NPP $\cap$ SC 权衡差异较小, 在高原气候区略低于温带和亚热带。自然因素在影响生态系统服务权衡中显著高于社会因素, 其中坡度、降水量、气温是其主要因子。因此, 从生态系统管理的角度出发, 有针对性地采取不同措施对川滇-黄土高原生态屏障带进行保护和管理, 有利于提升区域的生态安全。

#### 参考文献 (References):

- [1] 李霞, 李静芝. 荆南三口地区生态系统服务价值对城乡建设用地扩张的响应机理. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 278-288.
- [2] 朱殿珍, 初磊, 马帅, 王良杰, 张金池. 青藏高原生态屏障区生态系统服务权衡与协同关系. 水土保持研究, 2021, 28(4): 308-315.
- [3] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [4] Merriman L S, Moore T L C, Wang J W, Osmond D L, Al-Rubaei A M, Smolek A P, Blecken G T, Viklander M, Hunt W F. Evaluation of factors affecting soil carbon sequestration services of stormwater wet retention ponds in varying climate zones. Science of the Total Environment, 2017, 583: 133-141.
- [5] 张文静, 孙小银, 周俊. 南四湖流域关键生态系统服务的时空权衡关系. 生态学报, 2021, 41(20): 8003-8015.
- [6] Qiu M L, Van de Voorde T, Li T, Yuan C C, Yin G Y. Spatiotemporal variation of agroecosystem service trade-offs and its driving factors across different climate zones. Ecological Indicators, 2021, 130: 108154.

- [ 7 ] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 上官周平, 邓蕾. 2000—2015 年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和 NPP 服务的时空分布与权衡/协同关系. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121, 128.
- [ 8 ] 武燕, 吴映梅, 李琛, 高彬嫫, 郑可君, 李婵. 基于 MAUP 下川滇生态屏障区生态系统服务价值多尺度空间分异及地理探测响应. 水土保持研究, 2023, 30(2): 333-342.
- [ 9 ] 许阳光, 郭文召, 王文龙, 罗少辉, 陈卓鑫, 娄义宝, 费建坪. 极端降雨下黄土高原草被沟坡浅层滑坡特征及其对产流产沙的影响. 生态学报, 2022, 42(19): 7898-7909.
- [ 10 ] 汪仕美, 靳甜甜, 燕玲玲, 巩杰. 子午岭区生态系统服务权衡与协同变化及其影响因素. 应用生态学报, 2022, 33(11): 3087-3096.
- [ 11 ] 王修文, 于书霞, 史志华, 王玲. 南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应. 生态学报, 2021, 41(17): 7002-7014.
- [ 12 ] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Yu D Y, Hu H B. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(4): 457-463.
- [ 13 ] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张德镗. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [ 14 ] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [ 15 ] 陈田田, 王钰茜, 曾兴兰, 王强. 西南地区生态系统服务关系特征及其与植被覆盖的约束效应. 生态学报, 2023, 43(6): 2253-2270.
- [ 16 ] Feng Q, Zhao W W, Fu B J, Ding J Y, Wang S. Ecosystem service trade-offs and their influencing factors: a case study in the Loess Plateau of China. Science of the Total Environment, 2017, 607/608: 1250-1263.
- [ 17 ] 张弛, 李枝坚, 曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例. 地理研究, 2022, 41(5): 1279-1297.
- [ 18 ] 郎燕, 刘宁, 刘世荣. 气候和土地利用变化影响下生态屏障带水土流失趋势研究. 生态学报, 2021, 41(13): 5106-5117.
- [ 19 ] 傅伯杰, 王晓峰, 冯晓明. 国家生态屏障区生态系统评估. 北京: 科学出版社, 2017: 271-345.
- [ 20 ] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [ 21 ] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 张大智, 徐燕. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2899-2906.
- [ 22 ] 张海波. 南方丘陵区山地带水源涵养与土壤保持功能变化及其区域生态环境响应[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2014.
- [ 23 ] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 曹巍. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素. 生态学报, 2020, 40(15): 5151-5167.
- [ 24 ] 刘娇, 郎学东, 苏建荣, 刘万德, 刘华妍, 田宇. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估. 生态学报, 2021, 41(20): 8099-8111.
- [ 25 ] 周文佐. 基于 GIS 的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003.
- [ 26 ] 王诗绮, 刘焱序, 李琰, 傅伯杰. 近 20 年黄土高原生态系统服务研究进展. 生态学报, 2023, 43(01): 26-37.
- [ 27 ] 殷格兰, 邵景安, 郭跃, 党永峰. 林地资源变化对森林生态系统服务功能的影响——以南水北调核心水源区淅川县为例. 生态学报, 2017, 37(20): 6973-6985.
- [ 28 ] Yu Y Y, Li J, Zhou Z X. Multi-scale Representation of Trade-offs and Synergistic Relationship among Ecosystem Services in Qinling-Daba Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5465-5477.
- [ 29 ] 苏常红, 王亚璐. 汾河上游流域生态系统服务变化及驱动因素. 生态学报, 2018, 38(22): 7886-7898.
- [ 30 ] 闫晓露, 李欣媛, 刘澄浩, 李佳伟, 钟敬秋. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测——以大连市为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5734-5747.
- [ 31 ] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [ 32 ] 陈睿, 杨灿, 杨艳, 董祥泽. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值的时空演绎及其驱动因素. 应用生态学报, 2022, 33(1): 169-179.
- [ 33 ] 王晓君, 王宪帅, 黄从德, 王勇军. 岷江上游森林/干旱河谷交错带不同土地利用类型土壤有机碳和活性有机碳特征. 水土保持学报, 2011, 25(2): 167-172.
- [ 34 ] 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.
- [ 35 ] 高敏, 王勇, 高洁, 王家录, 毛泳. 喀斯特地区退耕还林工程下生态系统服务变化与关系分析. 水土保持研究, 2020, 27(2): 276-283.
- [ 36 ] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 孙诗萌, 高峻. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究. 长江流域资源与环境, 2022, 31(5): 1086-1100.
- [ 37 ] 高敏, 肖燕, 胡云锋. 不同土地-气候情景下三江源地区产水和水土流失评价. Journal of Resources and Ecology, 2020, 11(1): 13-26.
- [ 38 ] 于航, 金磊, 谭炳香, 戚墨, 沈明潭, 牟少华. 黄土高原退耕还林生态服务权衡协同分析——以安塞县为例. 生态学杂志, 2023, 42(3): 544-551.
- [ 39 ] 潘竟虎, 李真. 干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析. 农业工程学报, 2017, 33(17): 280-289.
- [ 40 ] 刘树超, 邵全琴, 牛丽楠, 宁佳, 刘国波, 张雄一, 黄海波. 长江上游生态状况变化及其服务功能权衡与协同. 生态学报, 2023, 43(03):

1028-1039.

- [41] 陈金珂, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶. 基于土地利用情景模拟的喀斯特关键带生态系统服务权衡与协同分析——以蒙自喀斯特断陷盆地为例. *中国岩溶*, 2022, 30(12): 1-19.
- [42] 王鹏涛, 张立伟, 李英杰, 焦磊, 王浩, 延军平, 吕一河, 傅伯杰. 汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征. *地理学报*, 2017, 72(11): 2064-2078.
- [43] 牛忠恩, 何洪林, 任小丽, 张黎, 秦克玉, 赵旦, 吕妍. 基于过程模型的 2000—2018 年中国陆地生态系统服务时空动态及其权衡与协同分析. *生态学报*, 2023, 43(2): 496-509.
- [44] 刘安钦, 王艳, 许彬, 杨武, 葛滢, 吴旭, 彭长辉, 常杰. 中国不同气候区温室农业生态系统服务价值比较——以华北区和长江中下游区为例. *生态学报*, 2010, 30(20): 5677-5686.
- [45] Piccolroaz S, Woolway R I, Merchant C J. Global reconstruction of twentieth century lake surface water temperature reveals different warming trends depending on the climatic zone. *Climatic Change*, 2020, 160(3): 427-442.
- [46] Sannigrahi S, Zhang Q, Pilla F, Joshi P K, Basu B, Keesstra S, Roy P S, Wang Y, Sutton P C, Chakraborti S, Paul S K, Sen S. Responses of ecosystem services to natural and anthropogenic forcings: a spatial regression based assessment in the world's largest mangrove ecosystem. *Science of the Total Environment*, 2020, 715: 137004.
- [47] 庞瑞, 顾峰雪, 张远东, 侯振宏, 刘世荣. 西南高山地区净生态系统生产力时空动态. *生态学报*, 2012, 32(24): 7844-7856.
- [48] Bradford J B, D'Amato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [49] 李琰, 李双成, 高阳, 王羊. 连接多层次人类福祉的生态系统服务分类框架. *地理学报*, 2013, 68(8): 1038-1047.
- [50] 潘开文, 吴宁, 潘开忠, 陈庆恒. 关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论. *生态学报*, 2004, 24(3): 617-629.
- [51] 张建, 雷刚, 漆良华. 丹江口库区产水量时空动态与情景模拟. *林业科学*, 2020, 56(11): 12-20.
- [52] Wang X Z, Wu J Z, Liu Y L, Hai X Y, Shangguan Z P, Deng L. Driving factors of ecosystem services and their spatiotemporal change assessment based on land use types in the Loess Plateau. *Journal of Environmental Management*, 2022, 311: 114835.
- [53] 严俊霞, 黄浩, 高彦华, 王甜甜, 张莹. 吉林省长时间序列陆地生态系统 NPP 时空变化特征. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 172-180.
- [54] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 2019, 108: 64-73.