

## 2000—2020年黄土高原土壤呼吸时空变化及其驱动因子

王琰<sup>1</sup>, 邱喆<sup>1</sup>, 狄晓艳<sup>1</sup>, 刘菊<sup>2,3</sup>, 严俊霞<sup>1</sup>, 仝敏<sup>1</sup>

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西省林业和草原科学研究院, 太原 030012;

3. 山西五台山山地草甸生态系统定位观测研究站, 山西 五台 035515)

**摘要:** [目的] 为明晰黄土高原土壤呼吸的时空变化规律及其驱动因子。 [方法] 以黄土高原地区为研究对象, 利用2000—2020年 $R_s$ 数据, 结合气候、生物、地形、土壤和人类活动5类环境因子数据, 采用Theil-Sen中值趋势分析、相关分析、多元回归残差分析、地理探测器和结构方程模型等方法, 探析黄土高原全域及其6个生态分区(黄土高塬沟壑A1、A2亚区, 黄土丘陵沟壑B1、B2亚区, 沙地与农业灌溉C区, 土石山区与河谷平原D区) $R_s$ 的时空变化及其主要影响因子。 [结果] 1) 年际尺度上, 2000—2020年 $R_s$ 呈显著上升趋势, 年平均 $R_s$ 以每年7.61 g/m<sup>2</sup>(以C计)的速率增加( $p < 0.05$ ), 其中B2亚区的增长速率最高, 达17.57 g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计), D亚区最低, 为3.85 g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计)。相关分析显示, 生物因子和人类活动在黄土高原全域及6个生态分区 $R_s$ 年际变化的相关系数均在0.80( $p < 0.01$ )以上。残差分析表明, 人类活动对于黄土高原 $R_s$ 年际变异的独立解释力要显著高于气候因子, 其贡献率达到75.28%。2) 空间上, 黄土高原 $R_s$ 呈由东南向西北递减的分布格局, 较高值[ $> 900$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计)]集中在黄土高原东南部(D区南部), 较低值[ $< 300$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计)]分布在西北部(C区、A区北部和B区西北部); 地理探测器显示, 生物因子 $q$ 位于各项因子之首( $q > 0.6$ ), 气候因子次之(除温度外其余指标 $q > 0.5$ ), 且二因子交互作用后的 $q$ 更大; 结构方程模型(SEM)表明, 气候和生物因子标准化总效应最高(0.781和0.686), 地形、土壤和人类活动因子的标准化总效应较小(均未超过0.1)。 [结论] 生物因子和人类活动是研究区 $R_s$ 年际变化的主要驱动因素, 2000—2020年, 随着气候因子(温度、降水等)的增强和人为因子(“植树造林”等大型生态工程)的正向效益的影响,  $R_s$ 呈显著增加趋势; 黄土高原 $R_s$ 空间格局由生物因子和气候因子通过正向交互作用共同主导, 气候因子主要通过调控生物因子间接影响 $R_s$ 空间分布, 其余因子对空间变化的影响微弱。研究结果可为推动该地区绿色低碳发展、实现“双碳”目标提供科学依据。

**关键词:** 黄土高原; 生态分区; 土壤呼吸; 时空变化; 驱动机制

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0426-12

## Spatiotemporal Variations in Soil Respiration and Its Driving Factors on the Loess Plateau from 2000 to 2020

WANG Yan<sup>1</sup>, QIU Zhe<sup>1</sup>, DI Xiaoyan<sup>1</sup>, LIU Ju<sup>2,3</sup>, YAN Junxia<sup>1</sup>, TONG Min<sup>1</sup>

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Science, Taiyuan 030012, China; 3. Wutai Mountain Alpine Meadow Ecosystem Research Station, Wutai, Shanxi 035515, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to clarify the spatiotemporal dynamics of soil respiration ( $R_s$ ) and its driving factors on the Loess Plateau (LP). [Methods] Taking LP as the research area,  $R_s$  data from 2000 to 2020 were integrated with data on five categories of environmental factors—climate, biology, topography, soil, and human activities. The Theil-Sen median trend analysis, correlation analysis, multiple regression residual analysis,

收稿日期: 2025-07-24

修回日期: 2025-08-22

录用日期: 2025-10-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-11

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFF1305102); 山西省科技厅面上项目(202403021211056); 山西省科技厅重点研发计划项目(202302090301016); 国家自然科学基金联合资助项目(U22A20557)

第一作者: 王琰(1973—), 女, 高级实验师, 博士, 硕士生导师, 主要从事生态系统碳循环对全球变化的响应和适应研究。E-mail: wylwyh@sxu.edu.cn

通信作者: 严俊霞(1976—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事生态系统碳循环对全球变化的响应和适应研究。E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

geodetector, and structural equation modeling (SEM) were employed to investigate the spatiotemporal variation of  $R_s$  across the entire LP and its six ecological subregions (A1 and A2: loess tableland gully regions; B1 and B2: loess hilly-gully regions; C: sandy land and agricultural irrigation region; D: earth-rocky mountainous and river valley plain region), as well as their dominant influencing factors. [Results] 1) On an interannual scale,  $R_s$  exhibited a significant increasing trend from 2000 to 2020, with an average annual increase of  $7.61 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculate in C) ( $p < 0.05$ ). The highest growth rate was observed in subregion B2 [ $17.57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculate in C)], while the lowest was in subregion D [ $3.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculate in C)]. Correlation analysis revealed that biological factors and human activities had correlation coefficients exceeding 0.80 ( $p < 0.01$ ) with  $R_s$  interannual variations across the entire LP and its six ecological subregions. Residual analysis indicated that human activities had a significantly higher independent explanatory power for  $R_s$  interannual variation compared to climatic factors, contributing 75.28%. 2) Spatially,  $R_s$  exhibited a decreasing gradient from the southeastern to the northwestern parts of the LP. High  $R_s$  values [ $>900 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculate in C)] were concentrated in the southeastern LP (mainly in the southern part of subregion D), whereas lower values [ $<300 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (calculate in C)] were primarily observed in the northwestern LP (subregion C, northern part of subregion A, and northwestern part of subregion B). The geodetector results indicated that biotic factors had the highest  $q$  values among all factors ( $q > 0.6$ ), followed by climatic factors (except temperature with  $q > 0.5$ ), and the  $q$ -value after the interactions of these two factors was even greater. SEM revealed that climatic and biotic factors had the highest standardized total effects (0.781 and 0.686, respectively), while those of topography, soil, and human activities were relatively small (all below 0.1). [Conclusion] Biotic factors and human activities are the primary drivers of  $R_s$  interannual variation in the study area. Over the past 20 years,  $R_s$  has shown a significant increasing trend, influenced by the enhancement of climatic factors (such as temperature and precipitation) and the positive effects of human factors (large-scale ecological projects such as afforestation). The spatial pattern of  $R_s$  on the Loess Plateau is jointly controlled by the positive interactions between biotic and climatic factors. Climatic factors indirectly influence the spatial distribution of  $R_s$  by regulating biotic factors, whereas the impacts of other factors on spatial variation are minimal. These findings provide a scientific basis for promoting green and low-carbon development and achieving "dual carbon" goals in the area.

**Keywords:** Loess Plateau (LP); ecological subregions; soil respiration; spatiotemporal variation; driving mechanisms

Received: 2025-07-24

Revised: 2025-08-22

Accepted: 2025-10-16

Online(www.cnki.net): 2025-11-11

土壤碳库总量是大气碳库(800 Pg C)的 3 倍左右,约为 2 300 Pg C,每年约有 68~98 Pg C 从土壤碳库排入大气碳库<sup>[1]</sup>。土壤呼吸( $R_s$ )是陆地生态系统碳排放的主要途径。近年来,在全球气候变暖的大背景下, $R_s$ 呈增加趋势,而作为陆地生态系统排放  $\text{CO}_2$  的第二大通量,其每年产生的  $\text{CO}_2$  是化石燃料燃烧的 11 倍,使得即使  $R_s$  仅发生微小波动也可能对全球碳循环产生显著反馈效应<sup>[2]</sup>。因此,精准量化  $R_s$  动态特征并揭示其对外部环境因素的响应机制,对于推动区域可持续发展及全球“碳减排”目标的实现具有重要的科学与实践意义。

受地形因子(海拔、坡度、坡向)<sup>[3]</sup>、气候因子(温度、降水等)<sup>[4-7]</sup>、生物因子(植被生产力、植被盖度、植被类型等)<sup>[8-9]</sup>、土壤养分(土壤有机碳、全氮、全磷等)和土地利用/覆盖变化(LUCC)等<sup>[5,10]</sup>诸多环境因素

的时空异质性及其交互作用的影响, $R_s$ 在不同时空尺度上存在较大的不确定性<sup>[1,5]</sup>。目前,已有大量研究从多角度揭示  $R_s$  的调控机理,总体来看,对  $R_s$  的研究较多集中于不同的生态系统<sup>[2,7]</sup>、生物群系或植被区<sup>[11-12]</sup>及特定的土地利用方式<sup>[5,10]</sup>,且多基于站点观测,而在大尺度空间范围上的研究相对有限<sup>[1,13]</sup>。先前的研究受限于资金、技术及不同区域生态系统复杂多变等客观条件的约束,大范围内  $R_s$  的站点监测仍面临一定程度的挑战,制约学界对  $R_s$  动态是否具有跨区域普适规律的准确判断<sup>[5]</sup>。在探究  $R_s$  动态变化的驱动因子方面,大量研究<sup>[5-7]</sup>只分析单一因子或部分因子对  $R_s$  的影响,区域尺度上(涵盖复杂多样的地形地貌、气候条件、土地覆被等)综合考虑各环境因子对于  $R_s$  时空变化的独立影响和各因子交互影响的相关研究相对较少。尽管已有研究确定许多控制

$R_s$ 时空变异的因素,但未能整合相关因素以确定其驱动 $R_s$ 通量的相对贡献率及其交互作用<sup>[14]</sup>。如HUANG等<sup>[6]</sup>研究2000—2014年全球 $R_s$ 的时空变化与气候和土地覆被的驱动关系,但未能区分各因素的独立贡献及其驱动机制的耦合作用。事实上,已有研究<sup>[13,15]</sup>表明,单一因子对 $R_s$ 的影响结果通常是该因素与其他因素综合作用的结果,若不能有效分离各驱动要素的独立贡献度及其交互作用,则难以精准评估 $R_s$ 对特定控制变量的净响应强度,亦无法明晰该要素与碳循环过程间的反馈机制<sup>[5]</sup>。陈书涛等<sup>[7]</sup>分析1970—2009年中国 $R_s$ 的年际变化发现, $R_s$ 在不同生态系统具有明显的差异;CEN等<sup>[5]</sup>的研究揭示中国北方 $R_s$ 与气候变化、LUCC及植被碳输入的关系,但前者未充分考虑人类活动对 $R_s$ 的影响,后者虽明确LUCC对 $R_s$ 的影响但未能进一步探究土壤理化性质对 $R_s$ 时空变化的作用。一定空间区域 $R_s$ 受气候、土壤、生物、人为和地形因子的综合调控<sup>[1]</sup>。因此,基于大尺度的区域范围,综合分析多元环境因子对 $R_s$ 的时空变化影响,对深入理解在气候变化与人类活动影响下 $R_s$ 时空变化的驱动机制具有重要意义。

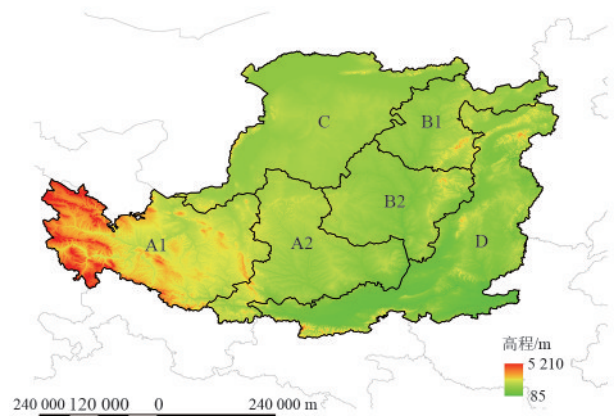
黄土高原作为我国典型的生态脆弱区,因其复杂的气候环境(降水和温度空间异质性显著)和多样的植被格局,加上严重的土壤侵蚀和退化问题,使其在全球碳循环和气候变化中起着至关重要的作用<sup>[16]</sup>。自1978年以来,中国北方半干旱和半湿润地区实施多项生态工程,研究区植被生产力、覆盖度和生物量显著增加。其中,黄土高原的植被恢复最为显著,植被覆盖度从34%提高到63%以上<sup>[17]</sup>。植被通过影响凋落物碳输入、土壤温度和水分及植物根系呼吸来调控 $R_s$ 。已有学者<sup>[10,18-19]</sup>对黄土高原地区的 $R_s$ 进行深入研究。结果显示,黄土高原地区不同土地利用类型的 $R_s$ 存在显著差异<sup>[10]</sup>,并且表现出明显的季节性变化规律。具体而言,冬季 $R_s$ 最低[低于 $1 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ],夏季达到最高值[ $6 \sim 10 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]<sup>[18-19]</sup>。不同空间尺度上的 $R_s$ 均呈显著的空间异质性<sup>[13,20]</sup>。然而,上述研究主要是利用样地观测的数据对 $R_s$ 的时空变化及其驱动机制进行探讨,而基于长时间序列数据探究黄土高原全域及其不同生态分区 $R_s$ 的时空变化及其各自的驱动因子的研究相对有限。虽然该样点尺度研究对增进 $R_s$ 驱动机制的理解有着重要作用,但由于 $R_s$ 在时空尺度上的异质性和不确定性,该样点的研究不能完全代表大范围 and 长时间尺度下的黄土高原 $R_s$ 时空变异。本文

基于杨艳芬等<sup>[21]</sup>的生态分区结果,将黄土高原划分为6个生态分区,将驱动因子划分为气候、地形、土壤、生物和人为因子5类,研究2000—2020年黄土高原和不同生态分区 $R_s$ 的年际变化、空间异质性及多元环境因素对土壤呼吸的影响机制,分离自然环境因子和人为因子对 $R_s$ 变化的影响,对实现区域碳平衡和黄土高原生态可持续发展具有一定科学意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原地处黄河中游核心区域( $33^{\circ}41' \sim 41^{\circ}16' \text{N}$ ,  $100^{\circ}52' \sim 114^{\circ}33' \text{E}$ ),平均海拔 $85 \sim 5100 \text{ m}$ <sup>[21]</sup>,总面积约为 $62.85 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,约占省级陆地面积的6.58%。该区属大陆性季风气候,年平均气温 $9 \sim 12^{\circ} \text{C}$ ,年平均降水量 $200 \sim 800 \text{ mm}$ ,降水由东南向西北递减。主要土壤类型有黄土、棕壤和黑土等。植被呈明显的地带性变化,东南部为森林草原,向西北部过渡为典型草原和半荒漠草原<sup>[16]</sup>。根据杨艳芬等<sup>[21]</sup>的分区结果,黄土高原可分为黄土高原沟壑区(A区,包含A1和A2亚区)、黄土丘陵沟壑区(B区,包含B1和B2亚区)、沙地与农业灌溉区(C区)、土石山区与河谷平原区(D区)4大生态区(图1)。



注:A1和A2亚区为黄土高原沟壑区;B1和B2亚区为黄土丘陵沟壑区;C区为沙地与农业灌溉区;D区为土石山区与河谷平原区。下同。

图1 黄土高原地理位置和高程

Fig. 1 Geographical location and elevation of the Loess Plateau

### 1.2 数据来源

$R_s$ 、地形、气候、土壤、生物因子和人类活动数据的时空分辨率、来源见表1。所有数据均投影到WGS1984坐标系,空间分辨率统一为 $1 \text{ km}$ 。

### 1.3 研究方法

1.3.1 Theil-Sen 中值趋势分析 利用Theil-Sen中位数趋势分析方法揭示黄土高原及各生态分区 $R_s$ 的

年际变化趋势,计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left( \frac{R_{sj} - R_{si}}{j - i} \right) \quad (1)$$

式中: $\beta$ 为 $R_s$ 的年际变化趋势, $\beta > 0$ 呈上升趋势,反之则呈下降趋势; $R_{si}$ 和 $R_{sj}$ 分别为第*i*年和第*j*年的 $R_s$  ( $2000 \leq i < j \leq 2020$ )。

年际变化趋势的显著性检验采用曼-肯德尔(Mann-Kendall)方法。当标准统计量 $|Z| > 2.58$ 或 $1.96$ 时,表示对应的年际变化趋势分别通过99%或95%的显著性水平检验,即表现为达到极显著( $p < 0.01$ )或显著( $p < 0.05$ )水平。 $Z > 0$ 表示 $R_s$ 在2000—2020年的时间序列中呈增长趋势,反之则呈降低趋势<sup>[29]</sup>。

表 1 土壤呼吸和影响因子数据来源

Table 1 Data sources of soil respiration and its influencing factors

变量	简写	单位	年份	空间分辨率	数据集及来源
土壤呼吸	$R_s$	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)	2000—2020	1 km	全球 1 km 年土壤呼吸产品 (2000—2020年)( <a href="http://www.geodata.cn">http://www.geodata.cn</a> ) <sup>[6]</sup>
地形因子	DEM	m	2008	90 m	SRTM 产品 ( <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> ) <sup>[16]</sup>
气候因子	SR	$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$	2000—2020	1 km	中国地面气候资料月值数据集 ( <a href="http://data.cma.cn/">http://data.cma.cn/</a> ) <sup>[16]</sup>
	$T$	$^{\circ}\text{C}$			1901—2024 年中国 1 km 分辨率逐月平均气温和逐月降水量数据集( <a href="http://loess.geodata.cn">http://loess.geodata.cn</a> ) <sup>[22]</sup>
	$P$	mm			中国地表温度年度 1 km 数据集 ( <a href="https://www.resdc.cn/Default.aspx">https://www.resdc.cn/Default.aspx</a> ) <sup>[23]</sup>
	LST	$^{\circ}\text{C}$			全球 1 km 地表土壤水分数据集 (2000—2020)( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/home">https://data.tpdc.ac.cn/home</a> ) <sup>[24]</sup>
土壤因子	AN	mg/kg	2010—2018	1 km	中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集 ( <a href="https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans">https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans</a> ) <sup>[25]</sup>
	TN	mg/kg			
	SOC	%			
	BULK	$\text{kg}/\text{dm}^3$			
	pH	$-\log(\text{H}^+)$			
人为因子	HA	—	2000—2018	1 km	年度全球人类足迹数据集(MU等 <sup>[26]</sup> )
生物因子	NPP	$\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)		500 m	MOD17A3 HGFv061;MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250 m SIN Grid V061 ( <a href="http://ladsweb.modaps.nasa.gov/">http://ladsweb.modaps.nasa.gov/</a> ) <sup>[27]</sup>
	NDVI	—	2000—2020	250 m	
	SIF	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$		0.05°	全球 OCO-2 SIF 数据集(LI等 <sup>[28]</sup> )

注:DEM为高程数据,基于此数据得到坡度(Slope)和坡向(Aspect); $T$ 、 $P$ 、SR、LST和SW分别为年平均气温、年降水量、年太阳总辐射、年平均地表辐射温度、年平均土壤含水量;AN、TN、SOC、BULK、pH分别为土壤有效氮、总氮、有机碳、土壤体积质量和pH;HA表示人类活动强度;NPP、NDVI、SIF分别为年净初级生产力、归一化植被指数和日光诱导叶绿素荧光。

1.3.2 相关分析 利用Pearson相关性分析方法,分析 $R_s$ 的年际变化与各环境因子的相关性强弱,并通过*t*检验进行显著性检验,达到显著性水平为 $p < 0.05$ ,达到极显著水平为 $p < 0.01$ 。计算公式<sup>[30]</sup>:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: $r$ 为Pearson相关系数,取值为 $-1 \sim 1$ ,绝对值越接近1,线性相关性越强; $n$ 为样本量, $Y_i$ 和 $X_i$ 分别为第*i*年研究区 $R_s$ 和环境因子的年平均值; $\bar{Y}$ 和 $\bar{X}$ 分别为2000—2020年研究区 $R_s$ 和环境因子的多年平均值。

1.3.3 多元回归残差分析 采用多元回归残差分析方法将气候变化(CC)和人类活动(HA)对 $R_s$ 年际变

化的贡献进行分离和量化。首先,建立 $R_s$ 与 $T$ 、 $P$ 和SR的回归方程,预测气候变化对 $R_s$ 的影响( $R_{sCC}$ )。然后,计算土壤呼吸观测值 $R_{sobs}$ 与 $R_{sCC}$ 的差值,此值即代表人类活动对 $R_s$ 的影响,( $R_{sHA}$ )计算公式为<sup>[16]</sup>:

$$R_{sCC} = a \times T + b \times P + c \times \text{SR} + d \quad (3)$$

$$R_{sHA} = R_{sobs} - R_{sCC} \quad (4)$$

运用一元线性回归法计算 slope( $R_{sCC}$ )和 slope( $R_{sHA}$ ),分别为2000—2020年因气候变化和人类活动驱动的 $R_s$ 变化趋势。当 slope $> 0$ 时,表明该变量对 $R_s$ 具有正向驱动效应;反之则产生负向影响,气候变化和人类活动对 $R_s$ 贡献率具体计算方法见表2。

1.3.4 地理探测模型 采用地理探测器中的因子探测评估各环境因子独立解释 $R_s$ 空间变异的能力。解释能力的强弱用*q*衡量,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中:SSW 与 SST 分别为层内方差总和与全区总方差; $h$  为因变量或自变量的分层; $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的样本量; $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  分别为层  $h$  和全区  $R_s$  的方差。 $q$  取值为 0~1, 值越大说明影响因子对  $R_s$  空间变异的解释能力越强, 反之说明解释能力越弱。

采用地理探测器的交互探测来识别两因子间的交互作用。评估方法为将交互探测得到的  $q$  与单因子探测得到的  $q$  相比较, 判断 2 个驱动因子的交互作用是增

表 2 气候变化和人类活动对土壤呼吸年际变化贡献计算方法

Table 2 Methods for calculating contributions of climate change and human activities to interannual variation of soil respiration

slope	驱动因子	驱动因子分类标准		驱动因子贡献率/%	
		slope( $R_{sCC}$ )	slope( $R_{sHA}$ )	气候变化	人类活动
>0	CC and HA	>0	>0	slope( $R_{sCC}$ )/slope( $R_{sobs}$ )	slope( $R_{sHA}$ )/slope( $R_{sobs}$ )
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC and HA	<0	<0	slope( $R_{sCC}$ )/slope( $R_{sobs}$ )	slope( $R_{sHA}$ )/slope( $R_{sobs}$ )
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

## 2 结果与分析

### 2.1 黄土高原土壤呼吸的年际变化趋势

2000—2020 年, 黄土高原  $R_s$  年际变化整体呈波动增长趋势( $p < 0.05$ ), 年平均  $R_s$  以 7.61 g/m<sup>2</sup>(以 C 计)的速率增加。黄土高原  $R_s$  各年平均值为 389.73~552.60 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计), 在 2018 年达到最大值 [552.59 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)], 在 2001 年达到最小值

强、独立还是减弱, 具体判断依据见文献[31]。

1.3.5 结构方程模型 结构方程模型(SEM)具备同时处理多因变量并解析其直接与间接效应的能力。在构建该模型前, 需预先对变量间的相关关系提出假设。本研究借助 SPSS 软件开展主成分分析, 对变量进行降维, 从中提取第 1 主成分参数作为自变量, 之后运用 Amos Graphics 软件构建模型并进行分析。用于判断模型适配性的指标标准涵盖卡方( $\chi^2$ )检验、绝对拟合度指标(RMSEA)、增值拟合度指标(CFI)和综合拟合度指标(DF)<sup>[32]</sup>。

[389.72 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)], 20 年  $R_s$  平均值为 472.41 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)(图 2a)。从各生态分区来看, 6 个生态分区的  $R_s$  年际变化也均呈显著上升趋势, 但不同生态分区的增长速率存在差异(图 2b)。其中, 以 B2 亚区的年变化速率最高, 达 17.57 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计), 而 D 亚区的年变化速率最低, 为 3.85 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)。A2、B1 和 B2 亚区的增长率高于黄土高原整体水平, A1、C 和 D 亚区的增长率低于整体水平。

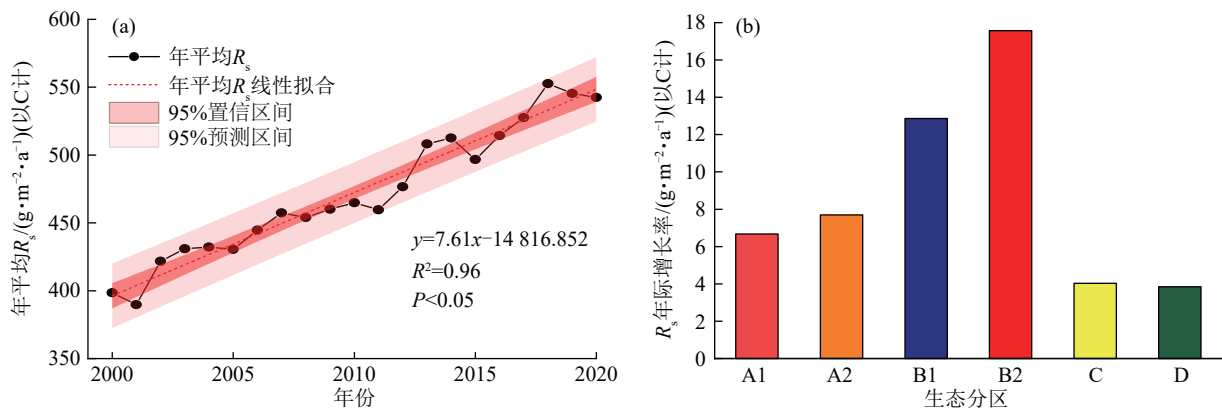


图 2 2000—2020 年黄土高原全域  $R_s$  年际变化和 6 大生态分区  $R_s$  的年际增长速率

Fig. 2 Interannual variation of  $R_s$  across Loess Plateau and  $R_s$  interannual growth rates in six major ecological subregions from 2000 to 2020

### 2.2 黄土高原土壤呼吸的空间格局与变化

2000—2020 年黄土高原  $R_s$  平均值呈自东南向西北递减的分布格局(图 3a), 较高值 [ $> 900$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)]集中在黄土高原东南部(D 区南部), 较低

值 [ $< 300$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计)]分布在西北部(C 区、A 区北部和 B 区西北部), 变化范围为 119.13~1 326.45 g/(m<sup>2</sup>·a)(以 C 计), 变异系数为 0.102。方差分析表明, 6 个生态分区  $R_s$  的年平均值差异显著

( $p < 0.01$ ),最大值为最小值的 2.45 倍(图 3b),D 亚区最高,为  $657.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),A2 区次之,为  $565.69 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计),C 区最低,为  $265.30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)。20 a  $R_s$  年增幅也存在明显的空间异质性(图 4a),80.20% 的面积呈上升趋势,其中 63.24% 区域显著( $p < 0.05$ )或极显著( $p < 0.01$ )增加。微增幅区域(年增幅  $< 20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计))面积占比为

72.5%,中增幅区域(年增幅  $> 20 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计)、 $< 40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计))面积占比为 1.2%,高增幅区(年增幅  $> 40 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以 C 计))面积占比为 6.6%。中高增幅的区域分布较为集中,主要分布于 A 区中部和 B2 大部分地区。 $R_s$  负增长区域离散分布在黄土高原的边缘地带,占黄土高原总面积的 19.8%(图 4b)。

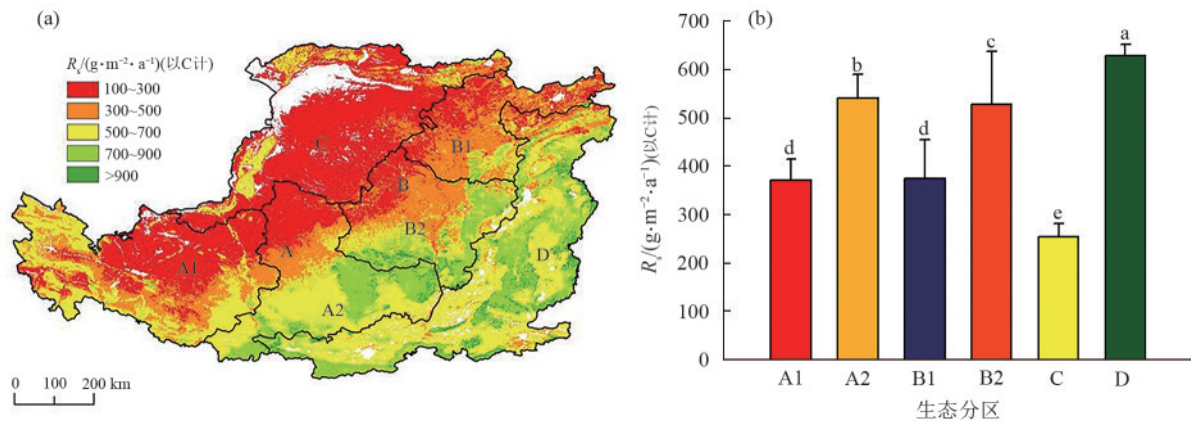


图 3 2000—2020 年黄土高原土壤呼吸空间分布及生态分区区年平均值

Fig. 3 Spatial distribution of  $R_s$  on Loess Plateau and mean annual  $R_s$  values for its ecological subregions from 2000 to 2020

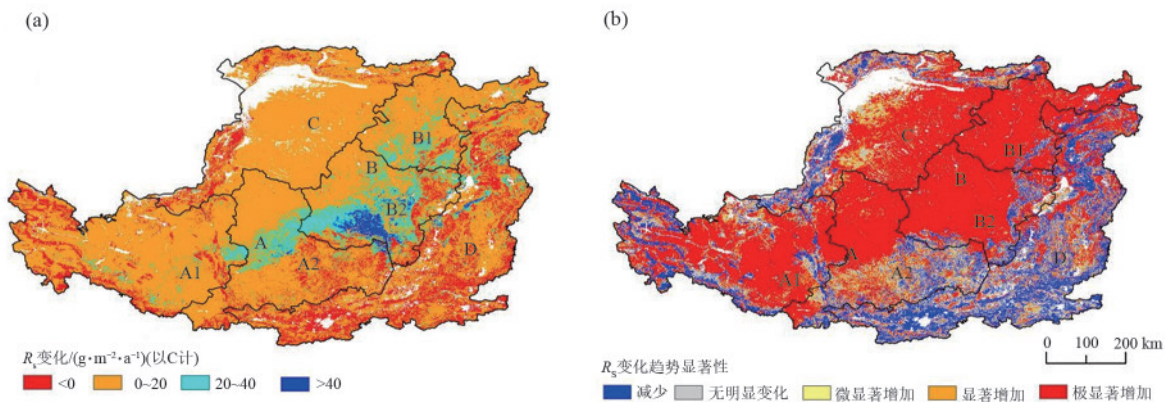


图 4 2000—2020 年黄土高原  $R_s$  的变化趋势和显著性水平的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of  $R_s$  variation trends and significance levels on the Loess Plateau from 2000 to 2020

### 2.3 黄土高原土壤呼吸年际变化的影响因子

相关分析表明,黄土高原全域及 6 个生态分区的生物因子(NPP、NDVI、SIF)和人为因子(HA)的年际变化与  $R_s$  的年际变化均表现为极显著正相关( $p < 0.01$ ),除 C 区的 HA 和 NPP 以外,相关系数均在 0.90 以上,总体达 0.8 以上。3 个生物因子中,NPP 的年际变化与  $R_s$  的年际变化的相关性弱于 NDVI 和 SIF 的(表 3)。5 个气候因子中,黄土高原全区 SW、P 的年际变化与  $R_s$  的年际变化相关性达到极显著( $p < 0.01$ )或显著水平( $p < 0.05$ ),相关系数分别为 0.581、0.482,而 T、LST 和 SR 的年际变化与  $R_s$  的年际变化相关性均不显著( $p > 0.05$ ),表明水分因子对黄土高原  $R_s$  年际变化的作用要大于温度和太阳辐射的作用。气候因子对各生态分区  $R_s$  年际变化的影响程度

有明显差异。A1、B1、C 和 B2 区 SW 的年际变化与  $R_s$  的年际变化相关性达到极显著水平( $p < 0.01$ ),相关系数分别为 0.884、0.866、0.803、0.708,而 A2 和 D 区相关性不显著;A1、B2、C 区 P 的年际变化与  $R_s$  的年际变化呈显著( $p < 0.05$ )或极显著( $p < 0.01$ )相关,表明水分因子对  $R_s$  年际变化的影响程度在黄土高原北部和西部较大,而南部和东部影响较小。在 B1 和 C 区,  $R_s$  的年际变化与 T 和 SR 呈显著正相关( $p < 0.05$ ),而在其他 4 个生态亚区,其相关系数没有统计学意义( $p > 0.05$ ),表明温度对黄土高原北部  $R_s$  的年际变化的影响程度大于其他区域。除 C 区,LST 的年际变化与黄土高原及各生态分区  $R_s$  的年际变化均呈负相关,其中 A1 区中 LST 与  $R_s$  的相关系数达到  $-0.503$ ( $p < 0.05$ )。

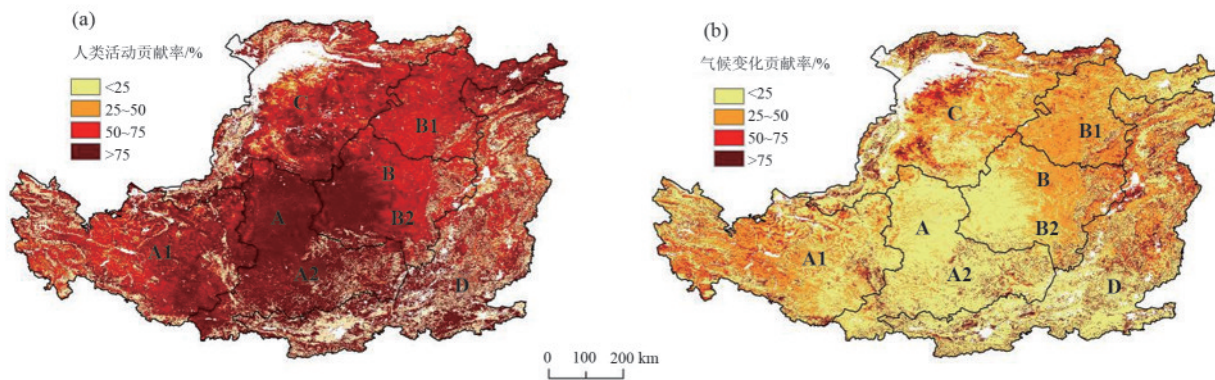
表3 2000—2020黄土高原及各生态分区 $R_s$ 的年际变化与生物因子、气候因子和人类活动的相关系数Table 3 Correlation coefficients between  $R_s$  interannual variations and biotic, climatic, and human factors on Loess Plateau and its ecological subregions from 2000 to 2020

影响因子	全区	A1	A2	B1	B2	C	D
NPP	0.946**	0.947**	0.929**	0.952**	0.961**	0.888**	0.906**
NDVI	0.970**	0.954**	0.951**	0.972**	0.982**	0.945**	0.928**
SIF	0.977**	0.963**	0.951**	0.960**	0.981**	0.931**	0.940**
$T$	0.409	0.392	0.256	0.439*	0.360	0.462*	0.329
$P$	0.482*	0.571**	0.310	0.402	0.466*	0.476*	0.358
SR	0.412	0.423	0.383	0.474*	0.349	0.447*	0.257
LST	-0.190	-0.503*	-0.331	-0.121	-0.413	0.075	-0.212
SW	0.581**	0.884**	0.308	0.866**	0.708**	0.803**	0.367
HA	0.961**	0.913**	0.944**	0.930**	0.940**	0.887**	0.904**

注:\*\*表示极显著水平( $p < 0.01$ );\*表示显著水平( $p < 0.05$ )。

多元回归残差分析表明,黄土高原全域人类活动对 $R_s$ 年际变化的贡献率达75.28%,气候因子的贡献率为24.72%。从1 km 栅格尺度看,42.27%的区域人类活动对 $R_s$ 的年际变化贡献率 $>75\%$ ,主要

分布于A2亚区大部分区域、B2亚区西部及A1亚区东部(图5a)。35.41%的区域气候因子对 $R_s$ 贡献率 $<25\%$ ,主要分布于A2亚区、B2亚区西部及D亚区南部(图5b)。

图5 气候变化和人类活动对黄土高原 $R_s$ 年际变化的贡献率Fig. 5 Contribution rates of climate change and human activities to interannual  $R_s$  variations on Loess Plateau

## 2.4 黄土高原土壤呼吸空间分异的驱动因子

因子探测表明,5类环境因子对 $R_s$ 空间变化影响的强度由大到小排序依次为生物、气候、土壤、地形和人类活动。生物因子NPP(0.707)、SIF(0.699)、NDVI(0.679)的 $q$ 位于前3;气候因子中 $P$ 对 $R_s$ 空间分异的影响最大(0.609),其次是SR(0.533)和SM(0.523),温度的解释力最弱。人类活动对 $R_s$ 空间变异的作用最小, $q$ 仅为0.034(图6a)。从交互作用探测的结果来看,二因子交互作用的 $q$ 均大于交互前2个因子 $q$ 的最大值或二者之和,说明研究区二因子间的交互作用增强对研究区 $R_s$ 的空间分异的解释能力,即为正交互作用。交互作用最强的分别为NPP $\cap$ DEM( $q=0.800$ )、NPP $\cap$ T( $q=0.790$ )和NPP $\cap$ P( $q=0.789$ )。总体来看,交互作用较强的多数为气候因子( $P$ 、SR、LST、 $T$ 等)和生物因子(NPP、NDVI、SIF)两两交互作用的结果,也与单因子探测的结果相呼应,进一步佐证生物和气候因子对黄土高原 $R_s$ 空间

异质性的的重要性(图6b)。

结构方程模型(SEM)对 $R_s$ 空间异质性的总体解释度为73.2%,结果表明,黄土高原 $R_s$ 空间变化的主要驱动因子是气候因子和生物因子,标准化总效应分别为0.781、0.686。气候因子对黄土高原 $R_s$ 空间变化直接影响效应较小,路径系数仅为0.205,但其通过调控生物因子(路径系数0.839,解释生物因子69.4%变异)来间接地主导 $R_s$ 空间变化,间接效应为0.576;地形因子对土壤呼吸的直接效应仅为0.04,并调控土壤因子间接影响 $R_s$ (对土壤因子影响路径系数为0.476,解释土壤因子22.6%变异),其间接效应为-0.027,总效应为0.013。总体而言,对黄土高原 $R_s$ 空间变化的影响最为显著的是气候和生物因子,而地形、土壤和人类因子对 $R_s$ 空间变化的影响微弱,也与地理探测器的结果相对应(图7)。

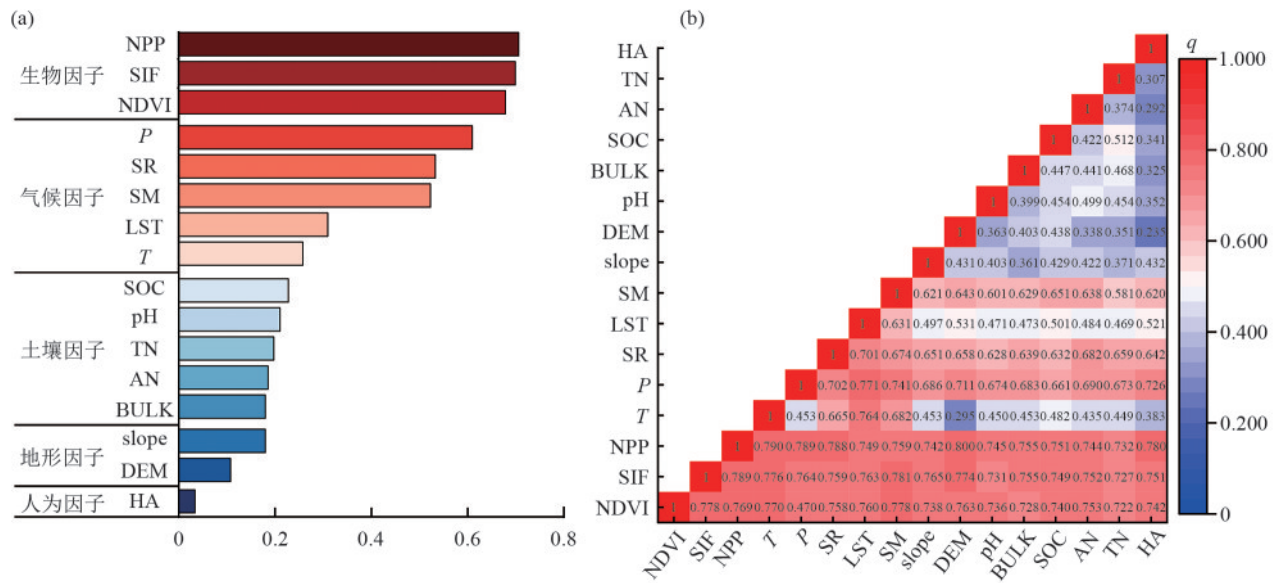
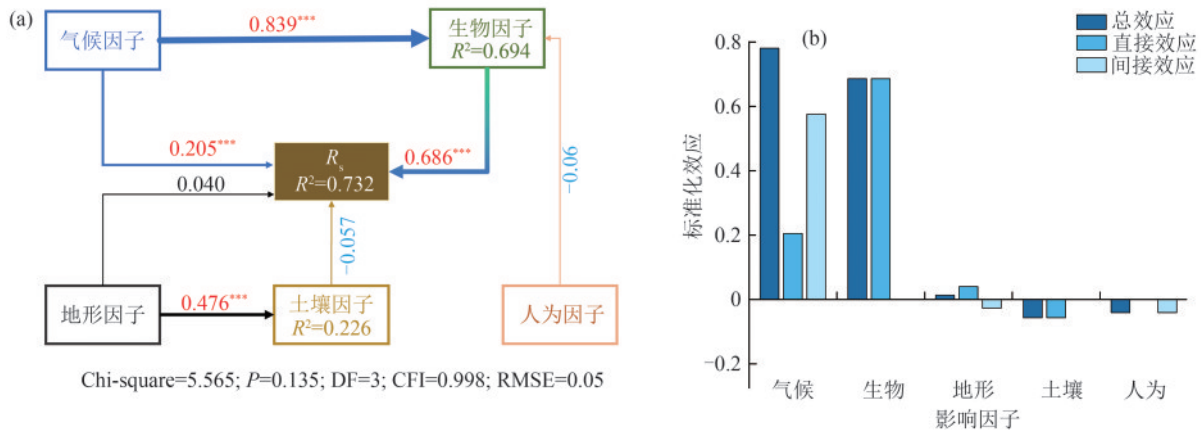


图 6 因子探测和交互探测结果

Fig. 6 Factor detection and interaction detection results



注:气候因子为  $T$ 、 $P$ 、 $SR$ 、 $LST$  和  $SW$  的降维值;生物因子为  $NPP$ 、 $NDVI$  和  $SIF$  的降维值;地形因子为  $DEM$ 、 $slope$ 、 $aspect$  的降维值;土壤因子为  $AN$ 、 $TN$ 、 $SOC$ 、 $BULK$ 、 $pH$  的降维值;人为因子为  $HA$ 。线越粗表示标准化路径系数越大;\*\*\*表示  $p < 0.001$ ;\*\*表示  $p < 0.01$ ; \*表示  $p < 0.05$ 。

图 7 结构方程模型分析结果

Fig. 7 Results of structural equation modeling analysis

### 3 讨论

#### 3.1 黄土高原和各生态分区 $R_s$ 年际动态变化

本研究发现,2000—2020年黄土高原  $R_s$  多年平均值为  $472.41 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计),该数值与 HUANG 等<sup>[6]</sup>估算的 2000—2014 年全球  $R_s$  单位面积平均值 [ $480 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计)]相近,表明黄土高原  $R_s$  平均水平与全球整体水平基本持平。同时,2000—2020 年黄土高原  $R_s$  整体呈显著波动上升趋势(图 2),年平均增长速率为  $7.61 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计),该增速显著高于其他研究,是全球  $R_s$  增速 [ $0.10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计)<sup>[6]</sup>]的 76 倍,为 CEN 等<sup>[5]</sup>报道的中国北方  $R_s$  增速 [ $2.53 \pm 0.23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计)]的 3 倍,也远超 JIAN 等<sup>[14]</sup>所述的中国 1982—1998 年  $R_s$  增速 [约  $0.08 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$  (以 C 计)]。不同研究的  $R_s$  平均值与增速存在差异,核心原因有二:一是数据来源(如站点观

测、遥感反演等)与分析方法的不同;二是时空尺度(全球/区域/时段)及研究区域的差异,黄土高原近几十年独特的生态恢复背景与强烈人为干预,正是其  $R_s$  增速异于其他区域的关键驱动因素。不过,各研究仍存在共识,近几十年来全球及中国不同区域的土壤呼吸均呈总体增加趋势<sup>[5-6,14]</sup>。

关于年际变化的驱动因子,本研究表明,生物因子(如  $NPP$ )和人类活动是导致黄土高原  $R_s$  年际变化的主要因素,与先前的研究<sup>[5-6,14]</sup>结论相类似。 $NPP$  作为生态系统碳循环的主要驱动因素,不仅通过直接刺激植物根系分布和持水能力来增强土壤自养呼吸,还通过促进凋落物输入和增加有机碳来间接增强微生物分解,从而增加异养呼吸<sup>[33-34]</sup>。植被覆盖度的增加对地表起到遮荫的作用进而降低地表温度,减少土壤水分蒸发,或在冬季起到保温作用。适宜

的土壤温度有利于土壤微生物活动和根系呼吸,进而影响 $R_s$  [35]。自黄土高原实施退耕还林等生态工程以来,植被覆盖度和生产力大幅度提高 [17], NPP在2000—2020年的增长率为 $6.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计), SIF几乎增加1倍以上(从0.04增加至0.09)。土壤有机碳和氮库的总量增加,根系和微生物活性也得到改善,最终使得 $R_s$ 也随之增长 [36]。同时,CEN等 [5]研究表明,在不同LUCC类型中,变化的土地利用类型和稳定的草地 $R_s$ 增加速率最快,主导中国北方 $R_s$ 的增加,其增长速率分别为 $(4.71 \pm 0.27)$ 、 $(3.53 \pm 0.25) \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计),并指出,随着LUCC的变化,土壤碳库的稳定性在很大程度上遭到破坏 [37],并通过改变植被覆盖、有机质输入和分解速率、微生物群落结构及土壤性质来影响 $R_s$  [6,38]。从另一个角度解释近几十年来黄土高原 $R_s$ 呈显著线性上升趋势的原因。随着生态恢复项目的不断推进,黄土高原经历大范围的土地覆被变化,该转换对 $R_s$ 增长起到重要作用,也进一步解释为什么在年际尺度上人类活动对 $R_s$ 的影响大于气候变化,原因可能是人类活动通过实施各项生态工程(退耕还林还草、生态修复和植树造林等)改善地表植被进而影响 $R_s$ ,而黄土高原作为典型的生态修复区,近几十年来,生态成效十分突出,且相比于CEN等 [5]研究中的西北和东北地区的自然禀赋条件更好,因此 $R_s$ 年际增长率更大。气候因子对 $R_s$ 的影响程度具有一定的空间异质性,相关分析(表3)表明,在A1、B1、B2和C区,土壤水分与 $R_s$ 呈极显著正相关,相关系数超过0.8,且降水量在A1、B2、C区也达到显著或极显著正相关,是因为在这几个生态区的气候比较干旱,而在干旱和半干旱地区,土壤呼吸可能在很大程度上受到水分胁迫的限制 [39]。因此,分布在黄土高原偏西的A1、B2、C区与降水和土壤水分的相关性比东部的生态分区更强。在黄土高原北部的B1和C亚区,土壤呼吸的年际变化与气温( $T$ )和太阳辐射( $SR$ )呈显著正相关,是因为B1和C亚区纬度较高,相比于南部热量条件较差,土壤呼吸主要受到温度和光照条件的限制,相关性更为显著。

6个生态分区的 $R_s$ 也均呈上升趋势,但增长速率有所不同(图2)。B2亚区 $R_s$ 增长速率最快,年增长速率为 $17.57 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计),是因为该区域早期存在地面破碎和不合理土地利用模式,使得当地的生态环境明显退化 [16],然而在退耕还林等生态工程实施后,植被覆盖度显著提高,生态环境明显改善 [36,40]。B2亚区由耕地转为林地和草地的面积在2000—2020年分别占耕地总变化量的20.75%和

86.56%,区域森林和草地覆盖率提高1.76% [21],因此,B2亚区相比于其他5个生态分区 $R_s$ 增长速率最为突出。D亚区 $R_s$ 增长速率最慢 [ $3.85 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)],是因为D区经济活动较为繁荣,拥有相比于其他分区更多的大城市,如西安、太原、郑州等区域 [16],因此,该区大范围建设生态工程的条件相对有限,且加上D区位于黄土高原东部、南部,水热条件较为充足,植被条件相比其他几个生态分区中较好(D区的NPP平均值为最小值C区的2.6倍),使得通过人为因素改善当地植被的上升空间较小, $R_s$ 增长速率最慢。

### 3.2 黄土高原 $R_s$ 空间异质性

黄土高原 $R_s$ 呈由东南向西北递减的空间分布特征,与区域水热条件、植被覆盖度及人类活动的空间差异密切相关。C亚区 $R_s$ 年平均值为 $265.30 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计),显著低于其他分区,该现象源于双重因素,自然层面,该区气候干旱、降水匮乏的本底条件显著制约 $R_s$ 过程;人为层面,不合理的水资源开发利用加剧生态胁迫,导致区域水资源总量失衡、干旱胁迫升级,进而引发地表植被覆盖度下降。自然与人为因素的叠加效应,最终使C亚区 $R_s$ 均值成为各生态分区的最低值 [21]。D亚区年平均值最高 [ $657.60 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ (以C计)],主要归因于其较优越的气候条件(D区的年平均气温和年降水量是6个分区中的最大值,分别为 $10.50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $570.92 \text{ mm}$ )、较高的林地面积和植被覆盖度(D区的NPP平均值为最小值C区的2.6倍) [21]。较适宜的水热组合为土壤微生物活动和植物根系呼吸提供良好环境,而较为丰富的林地资源与高植被覆盖度,不仅保障持续稳定的有机碳输入,也维持较高的土壤生物活性,多重优势因素共同作用,使得D亚区的土壤呼吸总量远超其他区域 [5,14]。

交互探测结果显示,气候因子与生物因子共同作用时的 $q$ 均高于二者单独作用时的 $q$ ,表明二者间存在正向交互作用,即交互后对 $R_s$ 空间分异格局的解释能力显著增强。SEM分析进一步佐证该结论,一方面,生物因子与气候因子的标准化总效应分别达0.686和0.781,远高于地形、土壤属性及人类活动等其他因子的贡献,凸显二者在驱动 $R_s$ 空间变异中的主导作用;另一方面,气候因子虽对 $R_s$ 空间变化的直接效应较弱(直接效应值0.205),但可通过显著调控生物因子产生较强的间接效应(0.576),进而主导 $R_s$ 空间格局的整体形成过程。综上所述,黄土高原 $R_s$ 的空间异质性主要受生物因子与气候因子的协同作用所控制,其中气候因子以“间接调控生物因子”为主要路径参与该协同过程。HAN等 [41]研究表明,

玉米田生长季 $R_s$ 主要由土壤温度和生物因子驱动;刘国彬等<sup>[17]</sup>在黄土高原庞泉沟自然保护区的研究也显示,以NDVI和温度( $T$ )为自变量的多元线性回归模型可解释 $R_s$ 空间异质性的64.3%,该研究结论均与本研究成果相一致。气候因子中的气温和降水总体呈自东南向西北递减的分布格局<sup>[21]</sup>,与黄土高原 $R_s$ 的空间分布高度吻合,进一步证明气候因子对于黄土高原 $R_s$ 空间变化的重要作用。因子探测显示,降水对 $R_s$ 空间变化的影响强于温度(图6),可能是由于黄土高原大部分区域气候干旱,相较于温度,降水成为影响植物生长的主要限制因子,降水增加可促进植物生长,土壤呼吸也随之增加<sup>[42]</sup>。黄土高原太阳辐射的空间分布与土壤呼吸呈相反趋势,整体表现为西北高、东南低。在黄土高原西北部,年降水量 $<300$  mm,且太阳辐射超过 $500$  MJ/m<sup>2</sup>,太阳辐射增强可加剧区域热量累积,促使水分蒸散量上升,导致土壤含水量持续下降,植物长期处于干旱胁迫状态。此过程显著抑制浅根植物的代谢活动及其有机质输出,最终使得该区域的土壤呼吸作用被削弱<sup>[39]</sup>。关于生物因子,已有研究<sup>[16]</sup>表明,黄土高原净生态系统生产力(NEP)空间分异的主要驱动因子是 $P$ 和 $SR$ ,也与本文结构方程模型得出的结论(图6)相呼应。黄土高原东南部水热条件较充足( $P>550$  mm, $SW>0.25$  m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>),为植物生长提供适宜的环境,而植物可通过影响土壤微气候环境、凋落物数量和质量、根系呼吸及土壤微生物,进而影响土壤呼吸<sup>[38]</sup>。地形因子主要通过水热条件再分配、植被类型分布和地表物质迁移等过程影响土壤理化性质(如土壤养分、pH、土壤水分和温度等),进而对 $R_s$ 产生间接作用<sup>[43]</sup>。结构方程模型显示,地形因子对土壤因子的标准化总效应值为0.476,对 $R_s$ 的总效应值为0.04(图6)。值得注意的是,与年际变化不同,人为因子对黄土高原 $R_s$ 空间分异的影响最小( $q$ 仅为0.034)。主要是因为 $R_s$ 空间异质性主要由气候、植被和土壤等自然因子的宏观格局所主导,该类因子不仅具有强烈的经纬向梯度,且气候因子还通过调控植被生长间接强化对 $R_s$ 空间分布的控制作用<sup>[4]</sup>。相比之下,人类活动(如植树造林、生态修复等)在空间上呈局部和碎片化分布,其影响力被自然因子形成的强大背景格局所掩盖,因此,对 $R_s$ 整体空间分异的解释贡献有限。

### 3.3 研究的局限性

研究首次系统量化2000—2020年黄土高原土壤呼吸对气候、生物、地形、土壤和人类活动5大类因素的响应,与之前关注站点或特定生态系统的研究不同,本研究基于长期数据,在连续且广泛的地理尺度

上揭示土壤呼吸时空变化的机制。更重要的是,以往研究仅关注土地利用、气候变化和植被等环境因子对土壤呼吸的单一影响,但本文的研究强调多种因素的交互效应并揭示各驱动因子对土壤呼吸的直接和间接效应。

本研究可能存在一些局限性和不确定性。首先,人为因子仅选择了HA代表人类活动强度<sup>[33]</sup>,涵盖土地利用、人口密度、人类可达性和基础设施等维度,但人类活动是复杂的动态过程,仅基于HA指标可能无法准确反映不同的土地利用和管理措施的真实情况,导致土壤呼吸对人类因子响应估计存在一定偏差,未来考虑增加土地利用/覆被变化(LUCC)来进一步评估人类活动对 $R_s$ 的贡献率;关于生物因子的选择,本文仅考虑NPP、NDVI等表征植被的指数而忽略微生物的作用,尽管ZHAO等<sup>[1]</sup>在研究中表明,虽然微生物在异养呼吸中影响有限,且微生物活性受气候和底物可用性影响,因此,未专门关注微生物影响。但若未来需要进一步区分 $R_s$ 自养和异养呼吸组分,则需要增加代表微生物活性的指标。多元回归残差分析该研究方法有待改进,它简单地将对 $R_s$ 驱动因子划分为气候变化和人类活动,但实际上土壤呼吸受到多种因子交互影响,更准确地说,该模型方法其实把驱动因子分离为气候因子和非气候因子,把非气候因子等同于人类活动,可能放大人类活动对 $R_s$ 的贡献率。

## 4 结论

1) 2000—2020年黄土高原全区及各生态分区 $R_s$ 均呈显著增长趋势,全区年平均增长率为 $7.61$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计),B2亚区增速最快,为 $17.57$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计),D区增速最慢,为 $3.85$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计)。

2) 研究区 $R_s$ 空间分布呈“东南向西北递减”特征,6个生态分区中D区年平均 $R_s$ 最高,为 $657.60$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计),C区最低,为 $265.30$  g/(m<sup>2</sup>·a)(以C计);2000—2020年,80.30%的区域 $R_s$ 呈增加趋势,A2亚区中部与B2亚区西南部为增幅较显著区域。

3)  $R_s$ 年际变化主要受生物因子和人类活动驱动,二者与全区及各生态分区 $R_s$ 年际变化均呈极显著正相关( $p<0.01$ , $r>0.8$ ),且人类活动对 $R_s$ 年际变化的解释度达75.28%。

4)  $R_s$ 空间变异由生物和气候因子通过正向交互作用共同主导,气候因子主要通过调控生物因子间接影响 $R_s$ 空间分布,地形、土壤和人类活动因子对空间变化的影响微弱。

本研究不仅深化干旱半干旱区生态系统碳循环的理论认识,也为黄土高原生态修复与“双碳”目标的协同推进提供实践依据。

## 参考文献:

- [1] ZHAO W, YANG M, YU G R, et al. The temporal response of soil respiration to environment differed from that on spatial scale[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2023, 342: e109752.
- [2] 展小云, 于贵瑞, 郑泽梅, 等. 中国区域陆地生态系统土壤呼吸碳排放及其空间格局: 基于通量观测的地质统计评估[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 97-108.  
ZHAN X Y, YU G R, ZHENG Z M, et al. Carbon emission and spatial pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: Based on geostatistic estimation of flux measurement [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(1): 97-108.
- [3] 李志刚, 侯扶江. 黄土高原不同地形封育草地的土壤呼吸日动态与影响因子分析[J]. *草业学报*, 2010, 19(1): 42-49.  
LI Z G, HOU F J. Analysis of soil respiration diurnal dynamics and factors influencing it in enclosed natural grasslands under different topographies in the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(1): 42-49.
- [4] 冉漫雪, 丁军军, 孙东宝, 等. 全球气候变化下土壤呼吸对温度和水变化响应的特征综述[J]. *中国农业气象*, 2024, 45(1): 1-11.  
RAN M X, DING J J, SUN D B, et al. A review of the response characteristics of soil respiration to temperature and moisture changes under global climate change [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2024, 45(1): 1-11.
- [5] CEN Y F, SUN G F, LI H K, et al. Climate change and vegetation carbon inputs under land use/cover change enhanced soil respiration in northern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 496: e145156.
- [6] HUANG N, WANG L, SONG X P, et al. Spatial and temporal variations in global soil respiration and their relationships with climate and land cover [J]. *Science Advances*, 2020, 6(41): eabb8508.
- [7] 陈书涛, 黄耀, 邹建文, 等. 中国陆地生态系统土壤呼吸的年际间变异及其对气候变化的响应[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(8): 1273-1281.  
CHEN S T, HUANG Y, ZOU J W, et al. Interannual variability in soil respiration from terrestrial ecosystems in China and its response to climate change [J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2012, 42(8): 1273-1281.
- [8] JANSSENS I A, LANKREIJER H, MATTEUCCI G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests [J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.
- [9] REICHSTEIN M, REY A, FREIBAUER A, et al. Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): e1104.
- [10] 郭慧敏, 张彦军, 刘庆芳, 等. 黄土高原半干旱区土壤呼吸对土地利用变化的响应[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(10): 1686-1695.  
GUO H M, ZHANG Y J, LIU Q F, et al. Responses of soil respiration to land use changes in a semiarid region of Loess Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(10): 1686-1695.
- [11] 张恒, 贾辉, 崔莹莹, 等. 亚热带人工幼林土壤呼吸与植物功能性状的关系[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 2898-2906.  
ZHANG H, JIA H, CUI Y Y, et al. Linkages of soil CO<sub>2</sub> emission with plant functional traits in young subtropical plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(11): 2898-2906.
- [12] 马进鹏, 庞丹波, 陈林, 等. 荒漠草原4种典型植物枯落物分解过程中土壤呼吸对短期氮、水变化的响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(11): 4722-4733.  
MA J P, PANG D B, CHEN L, et al. Response of soil respiration to short-term changes of nitrogen and water during decomposition of four typical plant litter in desert steppe [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(11): 4722-4733.
- [13] 李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 等. 庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4858-4866.  
LI X M, YAN J X, DU Z Q, et al. Detection of influencing factors of spatial variability of soil respiration in Pangquangou nature reserve [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4858-4866.
- [14] JIAN J S, YUAN X F, STEELE M K, et al. Soil respiration spatial and temporal variability in China between 1961 and 2014 [J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2): 739-755.
- [15] LUO Z K, FENG W T, LUO Y Q, et al. Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions [J]. *Global Change Biology*, 2017, 23: 4430-4439.
- [16] 周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 等. 2000—2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子[J]. *环境科学*, 2024, 45(5): 2806-2816.  
ZHOU Y T, YAN J X, LIU J, et al. Spatio-temporal variation in NEP in ecological zoning on the Loess Plateau and its driving factors from 2000 to 2021 [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5): 2806-2816.
- [17] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 11-19.  
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 11-19.

- [18] YAN J X, TONG M, LIU J, et al. Temperature and moisture sensitivities of soil respiration vary along elevation gradients: An analysis from long-term field observations[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912:e169150.
- [19] YAN J X, FENG Y, LI J J, et al. Response of soil respiration and Q10 to temperature and moisture in naturally regenerated and bare lands based on an 11-year observation period[J]. *Catena*, 2022, 208:e105711.
- [20] 付微, 黄明斌, 邵明安, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错带不同立地条件下土壤呼吸特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(13):74-80.
- FU W, HUANG M B, SHAO M A, et al. Soil respiration characteristics under different site conditions in wind-water crisscross erosion region on Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13):74-80.
- [21] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 等. 黄土高原生态分区及概况[J]. *生态学报*, 2019, 39(20):7389-7397.
- YANG Y F, WANG B, WANG G L, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20):7389-7397.
- [22] PENG S Z, DING Y X, LIU W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. *Earth System Science Data*, 2019, 11:1931-1946.
- [23] 徐新良. 中国地表温度 LST 年度 1 KM 数据集 [DB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2022.
- XU X L. Annual 1 KM dataset of land surface temperature in China [DB/OL]. Resource and Environmental Science Data Registration and Publication System, 2022.
- [24] 郑超磊, 贾立, 赵天杰. 全球 1 km 分辨率地表土壤水分数据集 (2000—2020) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2023.
- ZHENG C L, JIA L, ZHAO T J. Global 1km resolution surface soil moisture dataset (2000—2020) [DB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2023.
- [25] 刘峰, 张甘霖. 中国高分辨率国家土壤信息网格基本属性数据集 (2010—2018) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2021.
- LIU F, ZHANG G L. China soil basic attribute dataset with high resolution national soil information grid (2010—2018) [DB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2021.
- [26] MU H W, LI X C, WEN Y N, et al. A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018[J]. *Scientific Data*, 2022, 9(1):e176.
- [27] DIDAN K. MODIS/Terra Vegetation indices 16-day L3 global 250 m SIN Grid V061 [DB/OL]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, 2021.
- [28] LI X, XIAO J F. A global, 0.05-degree product of solar-induced chlorophyll fluorescence derived from OCO-2, MODIS, and reanalysis data[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(5):e517.
- [29] HIRSCH R M, SLACK J R. A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. *Water Resources Research*, 1984, 20(6):727-732.
- [30] 梁吉业, 冯晨娇, 宋鹏. 大数据相关分析综述[J]. *计算机学报*, 2016, 39(1):1-18.
- LIANG J Y, FENG C J, SONG P. A survey on correlation analysis of big data [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2016, 39(1):1-18.
- [31] 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 J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [32] VEHKALAHTI K. Structural equation modeling with mplus: Basic concepts, applications, and programming by Barbara M. Byrne [J]. *International Statistical Review*, 2014, 82:141-142.
- [33] YAN Y J, WANG J S, TIAN D S, et al. Sustained increases in soil respiration accompany increased carbon input under long-term warming across global grasslands [J]. *Geoderma*, 2022, 428:e116157.
- [34] QIN S Q, CHEN L Y, FANG K, et al. Temperature sensitivity of SOM decomposition governed by aggregate protection and microbial communities [J]. *Science Advances*, 2019, 5(7):eaau1218.
- [35] 夏国威, 汪东方, 朱涛, 等. 氮添加和凋落物去除对黔中喀斯特地区柳杉人工林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(20):8587-8597.
- XIA G W, WANG D F, ZHU T, et al. Effects of nitrogen addition and litter removal on soil respiration of *cryptomeria fortunei* plantation in karst area of central Guizhou Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(20):8587-8597.
- [36] SHI P, QIN Y L, LIU Q, et al. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707:e135507.
- [37] NAIDU D G T, BAGCHI S. Greening of the earth does not compensate for rising soil heterotrophic respiration under climate change [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(10):2029-2038.
- [38] ADACHI M, ITO A, YONEMURA S, et al. Estimation of global soil respiration by accounting for land-use changes derived from remote sensing data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 200:97-104.

(下转第450页)