刘鑫如,邝昱玮,胡远安,等.基于时空耦合分区的共和盆地植被碳固定变化特征及驱动机制研究[J].中国沙漠,2026,46(5):92-102.

# 基于时空耦合分区的共和盆地植被碳固定变化特征及驱动机制研究

刘鑫如[1],邝昱玮[1],胡远安[1],杨思琪[1],贾 虹[2]

(1.中国地质大学(北京) 地下水循环与环境演化教育部重点实验室,北京 100083;2.太原师范学院 地理科学学院,山西 太原 030619)

**摘要**:共和盆地位于青藏高原东北缘,属典型生态脆弱区,其植被固碳功能对区域碳循环研究及"双碳"目标实现具有重要价值。本研究基于CASA模型量化植被碳固定,创新性构建时空耦合分区框架,结合地理探测器揭示2010—2022年植被碳固定的时空变化特征及其驱动机制。结果表明:共和盆地2010—2022年间碳固定整体呈增加趋势,均值范围为65.60~104.89 g·m$^{-2}$·a$^{-1}$,高值区主要分布于东部与东南部,低值区分布于西北部及盆地边缘。共和盆地2010—2022年碳固定总体显著变化区域约占19%,其中轻微增加占51.53%,分阶段时间变化多为不显著,且呈现前期显著变化区域以增加为主,后期以减少为主的特征。结合热点分析与趋势检验,可将共和盆地碳固定功能划分为固碳核心区、潜力提升区、退化风险区、低值退化区和稳定维持区,其中稳定维持区面积最大,约10 555.62 km$^2$,低值退化区次之,主要集中于盆地西北部。地理探测器分析表明,降水($q$=0.258)和高程($q$=0.253)是共和盆地碳固定空间分异的主导因子,且驱动机制具有明显区域异质性。自然因子主要影响固碳核心区与低值退化区的空间演变,光伏分布因子则对退化风险区具有更强解释力。交互探测结果显示,双因子交互均表现为增强效应,其中水热与地形条件耦合、光伏与自然因子交互作用尤为显著。研究结果可为干旱半干旱区新能源开发、荒漠化治理协同推进及区域碳增汇提供科学依据。

**关键词**:碳固定;时空耦合分区;地理探测器;驱动机制;共和盆地

**文章编号**:1000-694X(2026)05-092-11 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00075

**中图分类号**:Q945 **文献标志码**:A

## 0 引言

全球气候变暖背景下,碳循环作为全球碳收支的关键环节,在调节大气$CO_2$浓度及缓解气候变化中发挥着不可替代的作用[1-2]。植被通过光合作用固定大气中的$CO_2$(即碳固定),是抵消人为碳排放的主要途径之一[3]。随着中国"双碳"的提出,提升陆地生态系统碳汇能力已上升为国家战略需求,特别是在生态脆弱区,准确评估其固碳现状、变化规律及驱动机制成为亟待解决的科学问题[4]。因此,明晰区域植被固碳的时空变化特征及其驱动机制,不仅有助于理解陆地生态系统对气候变化的响应,也能为制定区域差异化的生态管理政策提供理论依据。

干旱半干旱区作为全球气候变化的敏感区,其植被碳固定过程表现出强烈的波动性与脆弱性,成为学术界关注的热点区域[5]。近年来,围绕该类区域植被碳固定的时空变化特征及其驱动机制已开展了大量研究。在时空格局方面,研究表明干旱半干旱区植被碳固定整体呈波动上升趋势,但空间差异显著,荒漠草原区、山地草原区、盆地荒漠区等生态脆弱带的碳固定变化尤为剧烈[6]。在驱动因素方面,学者普遍认为降水和温度是控制该类区域植被

**收稿日期**:2026-03-15;**改回日期**:2026-05-08

**资助项目**:国家自然科学基金项目(42507664,42277226);国家重点研发计划项目(2022YFB4202101);新教师基本能力提升项目(2-9-2023-033)

**作者简介**:刘鑫如(2002—),女,山东淄博人,硕士研究生,主要从事土地利用变化与生态效应研究。E-mail:mems0807@gmail.com

**通信作者**:杨思琪(E-mail:yangsq@cugb.edu.cn)

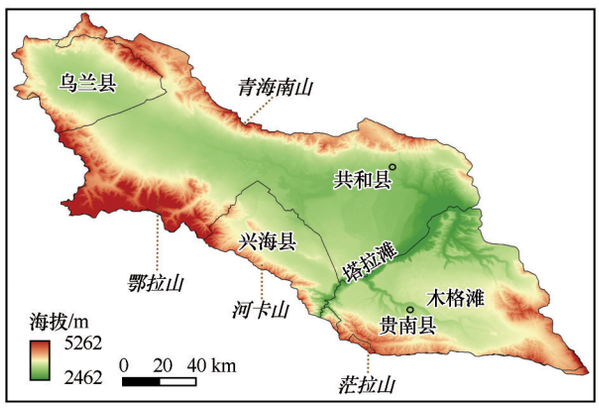
碳固定能力的主导气候因子[7]。此外，地形地貌、土壤类型、植被覆盖度等因子的交互作用也被证实会影响碳固定的空间异质性[8]。在研究方法上，实地调查法、遥感估算法、涡度相关法和生态系统过程模型模拟法等手段被广泛应用于碳汇监测研究[9]。其中，遥感估算因其大范围、长时序、低成本等优势，已成为区域尺度碳固定研究的主要技术手段[10]。在众多生态指数和模型中，CASA（Carnegie-Ames-Stanford Approach）模型因其参数获取灵活、时空分辨率高、适用范围广等优势[11]，被广泛应用于长时序、大尺度的植被碳固定动态估算[12]，目前已在青藏高原、黄土高原、内蒙古草原等典型干旱半干旱区取得了良好应用成效[13-15]。然而，现有研究多基于行政单元、流域尺度或传统自然地理单元（如地貌类型、气候带）开展整体性分析[16-17]，未能将碳固定时序变化规律与空间聚集模式纳入分区体系，导致驱动机制归因缺乏针对性，难以支撑差异化的生态管理决策。

共和盆地地处青藏高原东北缘，地形起伏显著，荒漠化特征明显，是典型的生态脆弱交错带[18]。同时，作为国家重要的新能源基地，该区域近年来光伏与风电建设规模迅速扩大，土地利用方式的剧烈变化进一步增加了生态系统碳循环的复杂性[19]。然而，现有针对共和盆地的研究多侧重于土地沙漠化防治或植被-土壤监测[20]，针对该区域长时序碳固定时空动态的系统评估仍相对不足，特别是基于植被碳固定变化特征开展功能分区并进一步识别差异化驱动机制的研究尚较少。基于此，本研究基于CASA模型评估2010—2022年植被碳固定量，耦合历史变化趋势与空间聚集特征构建功能分区，在不同分区内运用地理探测器模型量化自然因子与人类活动的差异化驱动机制。

# 1　研究区概况与数据来源

## 1.1　研究区概况

共和盆地（35°27′—36°56′N，98°46′—101°22′E），位于青藏高原东北部昆仑山系与秦岭山系之间的过渡带，海拔2 871~3 870 m（图1）。盆地地势西窄东宽，黄河自西南向东北切割形成外泄型盆地[21]，是黄河上游典型的半干旱荒漠化区，也是青海省主要风沙集中区[22]。气候类型为典型的高寒




注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS（2023）1873号标准地图制作，底图边界无修改

图1　研究区位置示意图

Fig.1　Location of the study area

干旱-半干旱大陆性气候，寒冷干燥，年均气温0.9~3.7 ℃，年降水量310~402 mm，年蒸发量1 528~1 937 mm，年均风速约1.3 m·s$^{-1}$。强烈的风蚀作用与干旱条件使生态系统极为脆弱，植被覆盖率低，生态环境对气候变化和人类活动高度敏感。土地利用类型以草地和未利用地为主，占总面积九成以上。地带性土壤以栗钙土和棕钙土为主，非地带性土壤包括风沙土、草甸土和沼泽土，典型植被有针茅、沙蒿和固沙草等[23]。

## 1.2　数据来源

本文所采用的数据包括地形数据、土地利用分类数据、夜间灯光数据、光伏数据、气象数据、人口分布数据等，详情如表1所示。将光伏电站矢量数据统一投影至WGS 1984 UTM Zone 47 N坐标系，数据指标均采用双线性内插法重采样至30 m空间分辨率。子流域数据由DEM提取。

# 2　研究方法

## 2.1　碳固定服务评估

本研究采用CASA模型评估年度植被碳储量作为碳固定服务，研究时段为2010—2022年。植被在给定时间和空间单元内的碳固定量主要由植被吸收的光合有效辐射（*APAR*）及其实际光能利用率（$\varepsilon$）共同决定：

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (1)$$

式中：$NPP(x,t)$表示单位像元$x$在$t$月份的植被净初

表 1 研究数据分类及来源

Table 1 Classification and sources of research data

| 数据分类 | 时间 | 空间分辨率/m | 来 源 |
|---|---|---|---|
| DEM | — | 30 | 地理空间数据云平台（https://www.gscloud.cn/） |
| 坡度 | — | 30 | |
| NDVI | 2010—2022 年 | 30 | Landsat 5,7,8 年最大合成 |
| 光伏 | 2013—2022 年 | — | 基于高分遥感影像解译 |
| 土地分类 | 2010—2022 年 | 30 | 中国科学院资源环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn) |
| 人口分布 | 2010—2022 年 | 100 | World Pop (https://www.worldpop.org/) |
| 降水、气温 | 2010—2022 年 | 1 000 | Climatic Research Unit Time-Series（https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/） |
| 辐射 | 2010—2022 年 | — | 中国气象数据网(http://data.cma.cn/) |
| 夜间灯光 | 2010—2022 年 | 500 | 美国国家航空航天局（NASA）与国家海洋和大气管理局（NOAA） https://zl-datas.com/12591.html |

级生产力（$g\cdot m^{-2}$）；$APAR(x,t)$表示植物所吸收的光合有效辐射（$MJ\cdot m^{-2}$）；$\varepsilon$ 表示光能利用效率；$t$ 表示时间；$x$ 表示空间位置。

$APAR$ 表示植被吸收的光合有效辐射：

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中：$SOL(x,t)$为地表太阳总辐射量（$MJ\cdot m^{-2}$）；$FPAR(x,t)$为植被吸收光合有效辐射的比例，计算依赖于归一化植被指数；常数项 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例。

$$\varepsilon(x,t) = T_{\varepsilon 1}(x,t) \times T_{\varepsilon 2}(x,t) \times W_{\varepsilon}(x,t) \times \varepsilon_{max} \quad (3)$$

式中：$\varepsilon_{max}$为植被在理想条件下的最大光能利用率（以 C 计，$g\cdot MJ^{-1}$）；$T_{\varepsilon 1}(x,t)$和$T_{\varepsilon 2}(x,t)$代表低温和高温对植被光能利用率的胁迫作用；$W_{\varepsilon}(x,t)$为水分胁迫系数，表示水分对光能利用率的影响。

FPAR、$\varepsilon_{max}$、温度胁迫、水分胁迫等参数取值参考朱文泉等[24]。

使用 CASA 模型生成 2012、2016 和 2022 年 NPP 数据，并随机抽取 1 000 个像元结果与 MODIS 产品进行对比分析，评价模型的可靠性。如图 2 所示，2012、2016、2022 年的模拟结果与 MODIS 产品在像元水平上表现出较高的相关性；决定系数（$R^2$）分别为 0.691、0.662、0.754，均高于 0.6。这表明模型模拟结果与遥感产品之间具有较好的一致性。

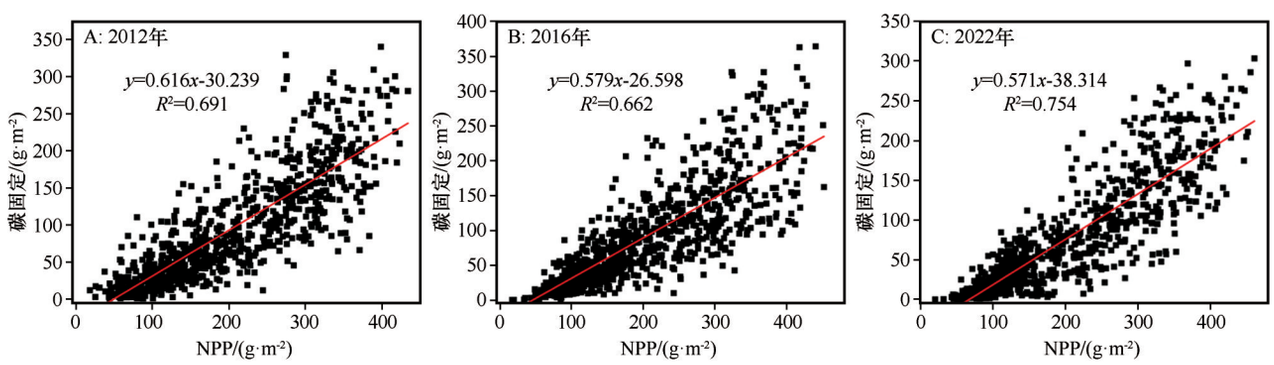



图 2 碳固定模拟结果精度验证

Fig.2 Accuracy verification of carbon sequestration estimation results

## 2.2 碳固定时序变化趋势与显著性检验

为分析长时间序列的变化趋势，采用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析[25]，在像元尺度上有效刻画碳固定的时序变化特征及其变化规律，变化趋势用 $K$ 表示。

$$K = median\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (4)$$

式中：$x_j$和$x_i$分别表示第 $j$ 年和第 $i$ 年的 $NPP$ 值，$j>i$。

采用 Mann-Kendal 检验法对 $NPP$ 时间序列值趋势进行显著性检验，构建统计量 $S$。

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j-x_i) \tag{5}$$

$$S=(x_j-x_i)=\begin{cases}1, & x_j-x_i>0\\ 0, & x_j-x_i=0\\ -1, & x_j-x_i<0\end{cases} \tag{6}$$

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S<0\end{cases} \tag{7}$$

式中：$x_j$和$x_i$分别表示第$j$年和第$i$年的$NPP$值；$Z$表示标准化的检验统计量；$Var(S)$为$S$的方差。

本研究依据区域气候变化与人类活动强度的阶段性差异，并考虑Sen+MK趋势检验对样本量的最低要求（$n$≥5），将2010—2022年划分为3个阶段，以在保证统计有效性的前提下捕捉不同时期的生态变化特征。

### 2.3　碳固定空间聚集特征识别

为揭示共和盆地碳固定量的空间聚集与分散特征，本研究采用热点分析方法（Getis-Ord $G_i^*$）识别碳固定的高值聚集区（热点）与低值聚集区（冷点）。首先，基于2010—2022年逐年碳固定量计算多年均值，在此基础上利用ArcGIS 10.8的热点分析工具进行$G_i^*$统计量计算。根据$G_i^*$统计量及其对应的置信度水平，将研究区划分为热点区、次热点区、过渡区、次冷点区与冷点区五类，以此识别共和盆地碳固定量的空间聚类格局与局部分异特征[26]。其基本表达式为：

$$G_i^*=\frac{\sum_j^n W_{ij}X_j}{\sum_j^n X_j} \tag{8}$$

$$Z(G_i^*)=\frac{G_i^*-E(G_i^*)}{\sqrt{VAR(G_i^*)}} \tag{9}$$

式中：$G_i^*$是单元$i$的冷热点统计值，反映该单元的空间聚集性；$X_j$是空间单元$j$的观测值；$W_{ij}$是单元$i$和$j$之间的权重矩阵；$E(G_i^*)$是所有空间单元的均值；$VAR(G_i^*)$是标准差。

### 2.4　基于时空耦合的碳固定功能分区构建

为揭示共和盆地碳固定功能的时空分异格局，构建了时间趋势与空间聚集特征耦合的功能分区框架，采用Sen-Mann-Kendall趋势分析与$G_i^*$空间聚集分析相结合的方法进行空间趋势类型划分。将时间维度的趋势类型与空间维度的聚集类型进行矩阵耦合，划分为五类碳固定功能区，以实现“时空耦合”的功能区划分（表2）。

**表2　共和盆地碳固定功能分区类型及划分依据**

**Table 2　Classification of carbon sequestration functional zones in the Gonghe Basin**

| 类别 | 时间趋势特征 | 空间聚集特征 | 生态含义 |
|---|---|---|---|
| 固碳核心区 | 显著增加 | 热点区 | 碳固定持续增强且空间高值聚集，为区域碳汇的核心贡献区 |
| 潜力提升区 | 显著增加 | 冷点区 | 碳固定呈增长趋势但当前仍处于低值聚集区，具备碳汇提升潜力 |
| 退化风险区 | 显著减少 | 热点区 | 碳固定水平较高但呈下降趋势，面临碳汇退化风险 |
| 低值退化区 | 显著减少 | 冷点区 | 碳固定低且持续衰退，为区域碳固定功能的薄弱区域 |
| 稳定维持区 | 变化不显著 | — | 碳固定功能在研究时段内无显著方向性变化，整体保持相对稳定 |

### 2.5　碳固定驱动因子的异质性探测

地理探测器是一种用于揭示空间分异性驱动机制的统计方法[27]。该方法能够同时处理定性与定量因子，并有效识别多因子之间的交互作用。结合研究区的自然地理特征，本研究从气候（降水、气温）、地形（高程、坡度）、人为活动（夜间灯光、人口密度、光伏分布）3个方面共选取7个驱动因子作为自变量，对各驱动因子进行了离散化处理。对于连续型变量，采用自然断点法（Jenks）进行分级处理。对于分类变量则依据其原始类别属性进行直接赋值处理：

$$q=\frac{1-\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2}=1-\frac{SSW}{SST} \tag{10}$$

$$SSW=\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2 \tag{11}$$

$$SST=N\sigma^2 \tag{12}$$

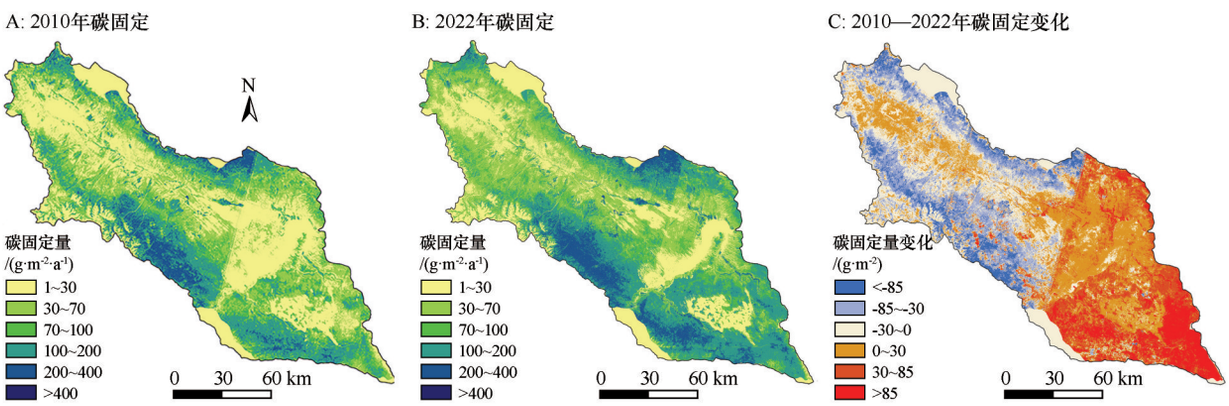
式中：$h$为变量$Y$或因子$X$的分层，即分类或分区；$N_h$和$N$分别为层$h$和全区的单元数；$\sigma_h^2$和$\sigma^2$分别是层$h$和全区的$Y$值的方差；$SSW$、$SST$分别为层内方差之

和、全区总方差；$q$是自变量对碳固定量的解释力，范围在0到1之间。

## 3 结果与分析

### 3.1 植被碳固定的时空变化特征

2010—2022年共和盆地植被碳固定均值范围为65.60~104.89 g·m$^{-2}$·a$^{-1}$，空间分布总体呈现中部及东南部高、西北部及边缘地带低的空间分布特征，且不同时期表现出明显的阶段性差异（图3）。2010年共和盆地碳固定量中高值区主要分布在盆地中西部及东南部地区，呈带状和斑块状分布。其中，共和县西北部、河卡山以及盆地中西部边缘地区碳固定量相对较高；碳固定量低值区域主要集中在中部和西北部地区（图3A）。到2022年，共和盆地碳固定量整体较2010年有所上升，其中盆地东南部及贵南县周边地区碳固定量明显增加（图3B）。2010—2022年共和盆地碳固定变化整体呈上升趋势且呈现显著的空间分异特征（图3C）。碳固定增加区域主要分布在盆地东部和东南部，增幅多超过85 g·m$^{-2}$，这与近年来共和盆地实施的生态工程及防沙治沙措施密切相关。




注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)1873号标准地图制作，底图边界无修改

图3 2010和2022年共和盆地碳固定空间分布

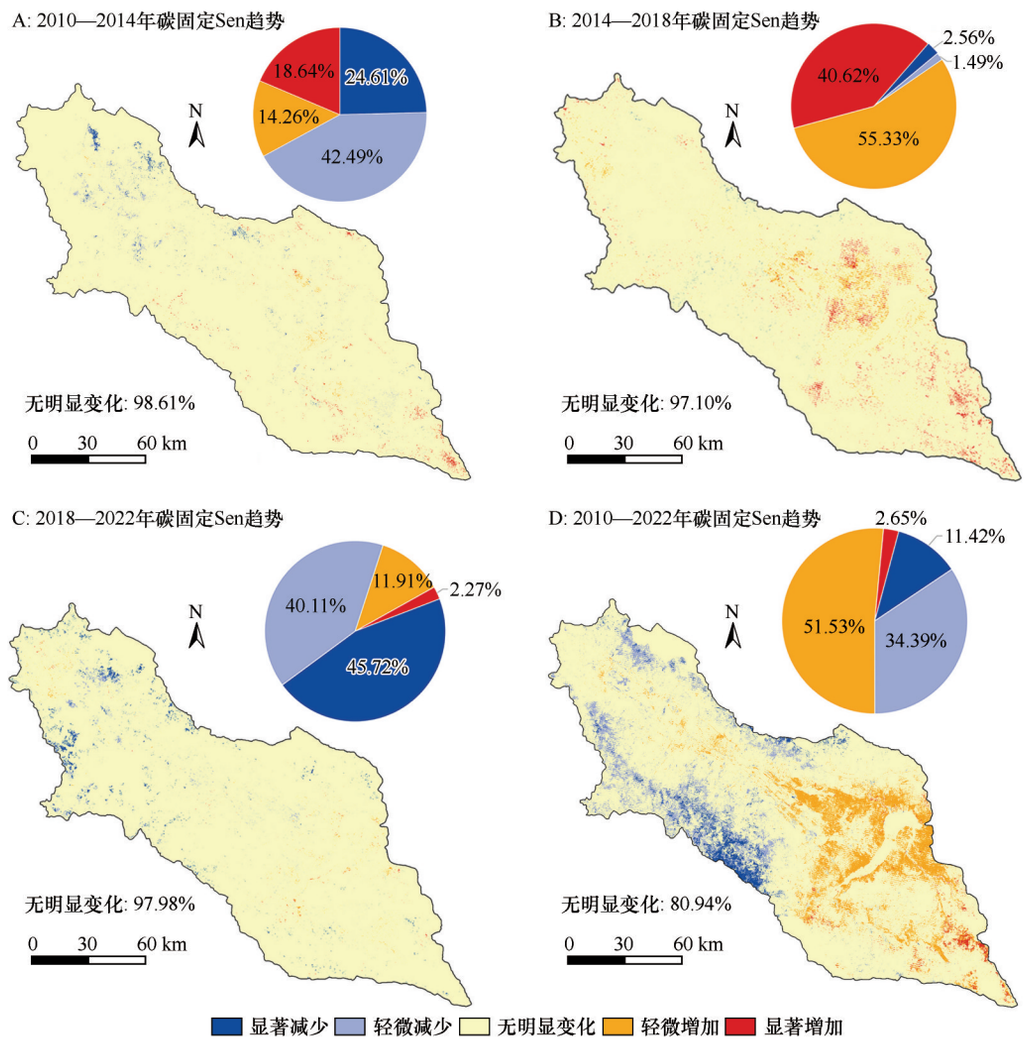
Fig.3 Spatial distribution of the Gonghe Basin in 2010 and 2022

### 3.2 植被碳固定时间变化趋势的空间分异

从碳固定Sen趋势空间分布来看，2010—2022年，无明显变化区域面积占比高达80.94%，而在具有显著变化的区域中，显著减少和轻微减少区域分别占11.42%和34.39%，轻微增加和显著增加区域合计占54.18%（图4D）。空间上，碳固定减少区域主要集中于盆地西北部及部分中部边缘地区，这些区域多为盐碱地、风蚀强烈区或植被稀疏区。碳固定增加区域则主要分布于盆地东南部。分时段来看，2010—2014年碳固定变化最为平稳，无明显变化占比达98.61%（图4A）；2014—2018年增加趋势有所增强，塔拉滩及共和县附近区域碳固定量高值面积显著扩大，这可能与该时期光伏产业园区建设带来的植被恢复效应有关（图4B）；2018—2022年减少趋势明显加剧，减少区域主要集中在盆地西北部（图4C）。总体而言，在空间上呈现出西北减少、东南增加的分异格局。

### 3.3 植被碳固定冷热点聚集格局与时空耦合功能分区

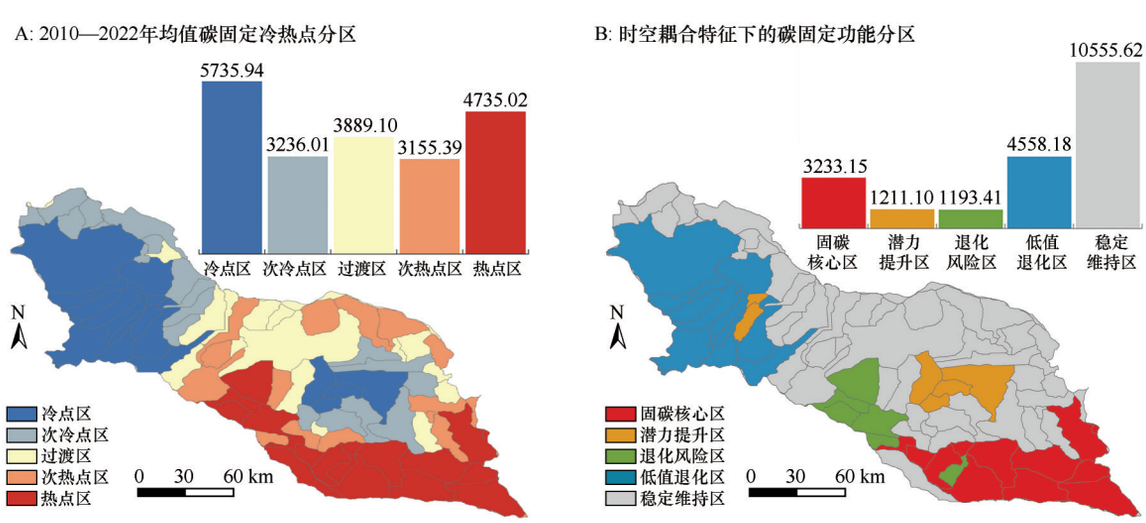
基于热点分析，共和盆地碳固定量的空间聚集格局呈现出显著的分异特征（图5A）：热点区（4 735.02 km²）主要集中于盆地东南部，沿东北—西南走向呈连片聚集分布；冷点区（5 735.94 km²）主要分布于盆地西北部。次热点区（3 155.39 km²）位于热点区外围的中南部地区，次冷点区（3 236.01 km²）位于冷点区南侧及盆地中部地区，过渡区（3 889.10 km²）介于二者之间，沿盆地中部呈带状展布。在此基础上，将热点分析结果与趋势分析进行耦合叠加，构建时空耦合的碳固定功能分区（图5B）。就面积和分布范围而言，稳定维持区面积最大（10 555.62 km²），主要覆盖盆地中东部大片区域；低值退化区（4 558.18 km²）集中分布于盆地西北部；固碳核心区（3 233.15 km²）主要分布于盆地南部；潜力提升区（1 211.10 km²）零散分布于盆地西北部及中部边缘地带；退化风险区（1 193.41 km²）主要位于盆地中南部局部区域。




注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)1873号标准地图制作，底图边界无修改

图4　共和盆地碳固定2010—2022年分阶段时间序列变化

Fig.4　Staged time series changes of carbon sequestration in the Gonghe Basin from 2010 to 2022




注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)1873号标准地图制作，底图边界无修改

图5　基于时空耦合的分区空间布局

Fig.5　Spatial distribution of functional zoning based on spatiotemporal coupling

### 3.4 碳固定驱动机制的分区异质性

#### 3.4.1 单因子驱动效应的分区分异特征

在整体区域尺度上，降水（$q$=0.258）与高程（$q$=0.253）是碳固定空间分异的主要控制因子，光伏分布（$q$=0.217）次之；人口密度、夜间灯光等人为因子的解释力较弱（图6）。各功能区的驱动机制存在显著的分区异质性：自然因子（气温、高程、降水）在多数分区中占据主导地位，但其相对重要性因分区类型不同而有所变化；光伏分布作为人为因子在退化风险区表现出较强的解释力。具体而言，固碳核心区以气温（$q$=0.166）和高程（$q$=0.102）为主要驱动因子。潜力提升区中光伏分布（$q$=0.221）的解释力最强，高程（$q$=0.192）次之。退化风险区中气温（$q$=0.472）的解释力远高于其他因子，高程（$q$=0.400）次之。低值退化区以高程（$q$=0.294）、降水（$q$=0.258）和气温（$q$=0.241）为主导，三者解释力较为接近。稳定维持区以高程（$q$=0.316）和气温（$q$=0.289）为主导。

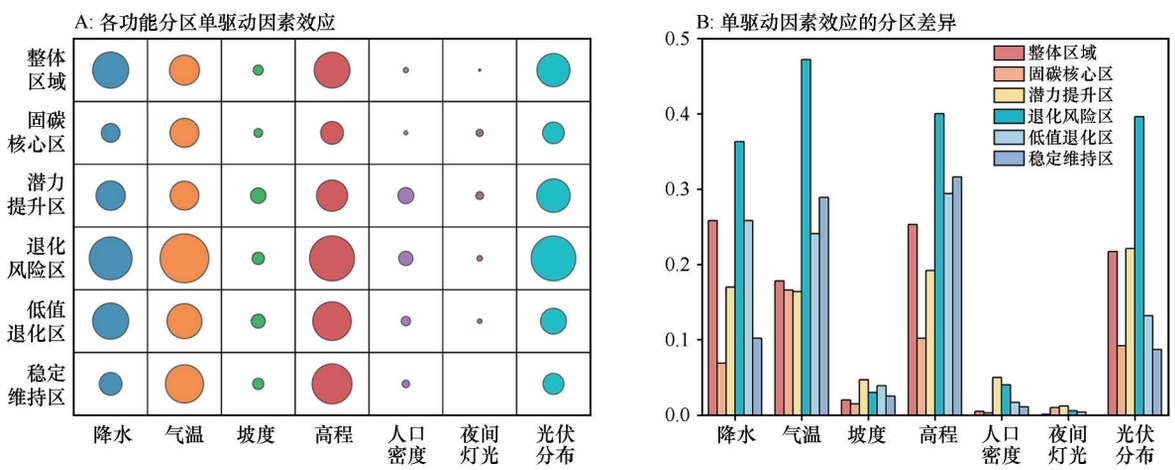



图6 各功能分区碳固定单因素驱动因子解释力

Fig.6 Single-factor detection results

#### 3.4.2 多因子交互作用下的分区驱动机制

在整体区域及各功能区尺度上，任意两因子的交互作用$q$值均高于各自的单因子效应（图7）。在整体区域尺度上（图7F），降水与气温（$q$=0.508）、降水与高程（$q$=0.507）的交互作用解释力最强，水热条件与地形因子的协同效应是碳固定空间分异的主要驱动力。各功能区的交互驱动机制存在显著差异：固碳核心区（图7A）以气温与高程（$q$=0.346）、降水与光伏分布（$q$=0.321）的交互作用为主，主要受地形与水热条件协同控制；潜力提升区（图7B）中降水与高程（$q$=0.510）、光伏分布与气温（$q$=0.498）的交互作用较为突出；退化风险区（图7C）以降水与气温（$q$=0.613）的交互作用最为显著；低值退化区（图7D）以高程与光伏分布（$q$=0.465）、降水与高程（$q$=0.438）的协同作用为主，驱动机制以自然因子主导；稳定维持区（图7E）中降水与气温（$q$=0.481）的交互作用最强，整体以自然气候因子驱动为主。

## 4 讨论

### 4.1 共和盆地植被碳固定的时空变化特征

本研究表明2010—2022年共和盆地碳固定量在空间上表现出明显的区域分异特征，高值区主要集中在盆地中部及东南部，而西部及盆地边缘地区碳固定能力相对较低（图3）。该结果与已有结论基本一致，刘凤等[28]指出，2000—2015年青海高原植被净生态系统生产力整体呈现由东南向西北逐渐减弱的空间趋势，多年均值为128.40 g·m$^{-2}$·a$^{-1}$C；耿垭鑫等[29]发现，水热条件是影响青藏高原植被生产力与生态系统碳固定能力的关键因素。共和盆地中部山麓及东南部受周边山地地形影响，降水条件相对较好，草地植被覆盖度较高，因而形成碳固定高值区；相比之下，西北部及盆地边缘地区气候干旱、风蚀作用较强，植被覆盖度较低，碳固定能力相对较弱。总体而言，共和盆地碳固定量的空间格局在较大程度上反映了区域水热条件及植被生长环境的差异。

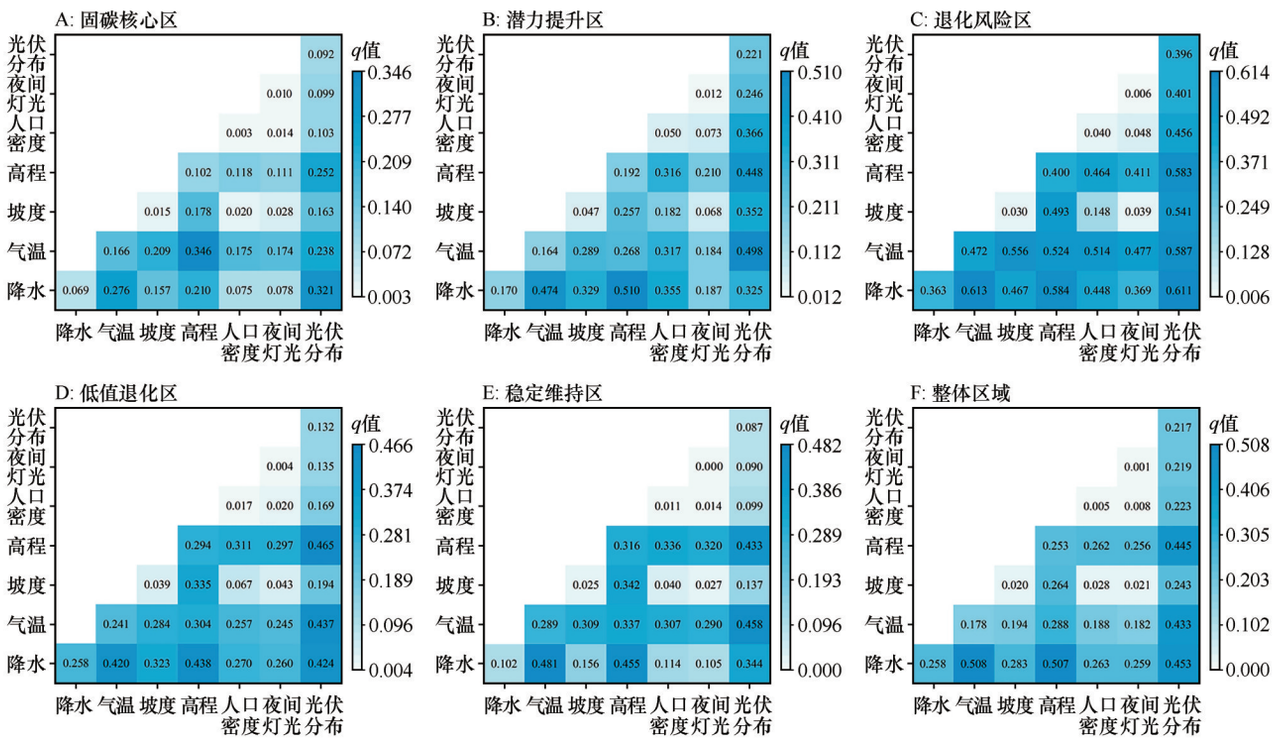



图 7　各功能分区碳固定驱动因子交互作用解释力

Fig.7　Explanatory power of interactive driving factors for carbon sequestration across functional zones

就时间变化特征，2010—2014 年碳固定整体变化趋势比较平稳，减少区域主要分布在盆地西北部及中部部分地区，这些区域多为盐碱地和风蚀沙化地表，土壤贫瘠、植被稀疏，在气候波动条件下植被生产力易降低。2014—2018 年碳固定增加趋势有所增强，高值区在中部及东南部明显扩展，这一变化与近年来青藏高原气候变暖背景下植被生长条件改善的趋势一致[30]。同时，近年来共和盆地实施的草地生态保护、退化草地治理、围栏休牧及适度放牧等措施，促进了植被恢复，提高了植被覆盖度和生物量，进而增强了区域植被碳固定能力[31]。2018—2022 年碳固定减少趋势加剧，减少区主要集中在西部和南部生态脆弱区。这些地区受干旱气候和风沙活动影响较大，生态系统稳定性较弱，气候波动或人为干扰易导致植被覆盖下降，进而削弱碳固定能力。

## 4.2　共和盆地碳固定功能的驱动机制及分区差异

已有研究表明，气候变化和人类活动是影响青藏高原及共和盆地生态系统服务格局变化的重要因素。总体来看，水热条件与地形结构的耦合作用主导其空间分异，而气候变暖、植被恢复和人类活动则通过与自然因子交互影响局部生态格局[32-34]。区别于以往研究，本研究先识别共和盆地碳固定时空分区，再分析不同分区的驱动机制，从而揭示碳固定功能驱动因素的空间异质性。结果表明，整体尺度上，水热条件与地形仍是影响碳固定空间分异的核心因素，但不同功能区的主导因子及其交互作用存在明显差异。

在固碳核心区，气温与高程的交互作用表现最为显著，说明在高海拔高寒环境中，热量条件对植被生长和碳固定能力具有重要限制作用，气温的适度升高能够促进植被光合作用和生物量积累，从而提升区域净初级生产力。在潜力提升区，高程与光伏分布的交互作用更为显著，表明光伏建设的生态影响具有明显的地形依赖性；结合已有研究所指出的共和盆地光伏开发在一定条件下对生态系统服务具有协同效应潜力[35]，在此类区域推进光伏开发时应将地形敏感性纳入选址准入、工程布局优化及扰动强度控制等关键环节。相较之下，退化风险区和低值退化区的碳固定功能对人类活动更为敏感，应通过分区管控与差异化布局降低开发扰动带来的生态退化风险。此外，稳定维持区内部的碳固定空间异质性尚未在本研究中深入探讨，可作为该区域生态系统稳定性的研究方向。

基于上述研究结果，本研究提出面向不同功能

区的差异化生态管理建议。对于固碳核心区和稳定维持区，应以生态保护为主，维持现有植被结构及水热条件优势，减少不必要的人为扰动，并加强水源涵养和地形环境保护，以保持较高的碳固定能力。对于退化风险区和低值退化区，应重点推进生态修复与人类活动管控，通过恢复耐旱或适应性较强的植被类型、优化土地利用方式以及规范基础设施建设，降低生态退化风险，这与已有研究关于通过土地利用优化和适应性植被恢复改善退化生态系统结构的认识一致[36]。对于潜力提升区，则应在保障生态安全的前提下，统筹推进生态恢复与清洁能源开发，通过优化光伏设施布局并配套植被恢复措施，促进生态系统功能提升与能源利用协调发展，这也与高原地区清洁能源开发应兼顾生态恢复和植被重建的研究结论相契合[37]。总体而言，基于功能分区实施差异化管理，有助于提升共和盆地整体碳固定能力，并为区域生态保护与可持续发展提供决策参考。

### 4.3 研究局限与未来展望

本研究基于时空耦合分区较系统地刻画了共和盆地碳固定功能的时空变化特征及其驱动机制，但仍存在以下局限性。在数据层面，多源数据原始空间分辨率不同，统一至30 m过程中的重采样处理可能带来信息平滑与局部细节损失等尺度效应。在方法层面，本研究对碳固定的评估主要基于光能利用率模型，未纳入土壤碳库相关参数，对生态系统整体碳收支的表征尚不完整；同时，所采用的方法体系对复杂非线性反馈过程的刻画能力有限。在研究内容层面，当前分析主要聚焦于光伏建设的生态效应，尚未纳入风电开发等其他人类活动因素。未来可通过引入更高精度数据源、开展多尺度对比分析，并结合情景模拟方法探讨不同开发方案下碳固定功能的变化趋势，进一步提升研究的应用价值与决策支撑能力。

## 5 结论

2010—2022年，共和盆地碳固定整体呈上升趋势，高值区主要集中于盆地中部和东南部，低值区分布于西部及盆地边缘。时空耦合分区表明，固碳核心区和稳定维持区是维持区域碳平衡的关键区域，主要位于中部和东南部；退化风险区与低值退化区则集中在西北部及部分中部地区。驱动机制分析显示，碳固定空间分异是多因子协同作用的结果，其中水热条件与地形结构在整体及多数功能区中占主导地位，人类活动与气候因子的交互作用进一步增强了空间异质性。总体而言，共和盆地碳固定空间分异受自然因子主导，并受到人类活动协同影响。管理上，核心区与稳定区应以保护维持为主，退化区应加强气候适应性生态修复，潜力提升区可通过优化新能源布局和植被恢复实现生态与能源协同增益。未来需加强多源数据整合与情景模拟，为高寒干旱区生态管理和“双碳”目标实施提供科学依据。

**参考文献：**


[1] Don A, Seidel F, Leifeld J, et al. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation: definitions and pitfalls[J]. Global Change Biology, 2024, 30(1): e16983.

[2] 冯起，常宗强，席海洋，等. 基于碳氮循环的中蒙荒漠生态脆弱区生态系统对全球变化响应研究[J]. 地球科学进展，2022，37(11)：1101-1114.

[3] 王灿，张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理，2020，12(6)：58-64.

[4] 于贵瑞，朱剑兴，徐丽，等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径：基于自然解决方案[J]. 中国科学院院刊，2022，37(4)：490-501.

[5] Ru J, Wan S Q, Hui D F, et al. Increased internal year precipitation variability enhances the carbon sink in a semi-arid grass [J]. Functional Ecology, 2022, 36(4): 987-997.

[6] 潘竟虎，文岩. 中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局[J]. 生态学报，2015，35(23)：7718-7728.

[7] Zheng K, Shi M J, Wu H Q, et al. Estimation and simulation of carbon sequestration in typical dryland areas of China under future climate change scenarios[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1250586.

[8] 张琨，吕一河，傅伯杰，等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报，2020，75(5)：949-960.

[9] 朴世龙，何悦，王旭辉，等. 中国陆地生态系统碳汇估算：方法、进展、展望[J]. 中国科学：地球科学，2022，52(6)：1010-1020.

[10] Chen C, Ren T, Liu P, et al. Spatiotemporal dynamics of terrestrial carbon storage driven by land-use and land-cover change in island ecosystems: insights from long-term remote sensing [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2026, 19: 7042-7057.

[11] 张静静，朱文博，朱连奇，等. 伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J]. 地理学报，2020，75(5)：975-988.

[12] 景海超，刘颖慧，贺佩，等. 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[J]. 生态学报，2022，

42(7):2657-2673.
[13] 高峰,律可心,乔智,等.青藏高原东缘生态过渡带碳中和评估与预测[J].生态学报,2022,42(23):9442-9455.
[14] 杨丹,王晓峰.黄土高原气候和人类活动对植被NPP变化的影响[J].干旱区研究,2022,39(2):584-593.
[15] 翟涌光,王晓妮,郝蕾,等.2001-2020年内蒙古净生态系统生产力格局多时间尺度分析[J].生态环境学报,2024,33(2):167.
[16] Zhang Z, Wan H, Peng S, et al.Differentiated factors drive the spatial heterogeneity of ecosystem services in Xinjiang Autonomous Region, China[J].Frontiers in Ecology and Evolution, 2023,11:1168313.
[17] Chen B, Zhao J Y, Yao Y L, et al.Spatiotemporal characteristics of land use carbon budget and carbon balance capacity in karst mountainous areas: a case study using social network analysis[J].Systems,2025,13(8),686.
[18] 周虹,刘雲祥.青海共和盆地人工固沙植被恢复对土壤微生物数量的影响[J].干旱区资源与环境,2022,36(1):178-185.
[19] 殷代英,马鹿,屈建军,等.大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响[J].水土保持通报,2017,37(3):15-21.
[20] 屈准,杨肃昌,赵鹏,等.青藏高原东北缘大规模光伏电站对高寒沙地植被-土壤的影响研究:以青海共和盆地为例[J].干旱区资源与环境,2024,38(12):92-106.
[21] 苏万峰,汉光昭,叶得力,等.共和盆地生态环境遥感评价及驱动力分析[J].中国沙漠,2023,43(5):74-84.
[22] 贾虹,张建鹏,刘连友,等.共和盆地生境质量演变及多情景模拟[J].中国沙漠,2025,45(2):29-36.
[23] 彭强.共和盆地白刺沙堆形成年代及演化过程研究[D].西宁:青海师范大学,2022.
[24] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.
[25] 吴东清,侯伟,桑会勇,等.西藏植被碳源/汇时空变化特征及其影响因子分析[J].测绘科学,2022,47(8):105-113,134.
[26] 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.
[27] Li Y H, Tao S L, Li R P, et al.Temporal and spatial evolution of NPP and its responses to terrain factors in Liaoning Province[J].Journal of Meteorology and Environment, 2021, 37(5): 107-112.
[28] 刘凤,曾永年.2000-2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].生态学报,2021,41(14):5792-5803.
[29] 耿垭鑫,易桂花,张廷斌,等.青藏高原气候变化对草地碳汇/源格局的影响[J].自然资源学报,2024,39(5):1208-1221.
[30] 陈发虎,汪亚峰,甄晓林,等.全球变化下的青藏高原环境影响及应对策略研究[J].中国藏学,2021(4):21-28
[31] Kruse J, Adams M, Winkler B, et al.Optimization of photosynthesis and stomatal conductance in the date palm *Phoenix dactylifera* during acclimation to heat and drought[J].New Phytologist,2019,223(4):1973-1988.
[32] Gao L M, Zhang L L.Spatiotemporal dynamics of the vegetation coverage in Qinghai Lake Basin[J].Journal of Geo-information Science,2019,21(9):1318-1329.
[33] Chen S S, Wu M C, Zhang S L, et al.Unraveling the impacts of temperature and vapor pressure deficit on gross primary productivity from current to future scenarios[J].Journal of Hydrology, 2026,664:134432.
[34] 张倚浩,阎建忠,程先.气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展[J].生态学报,2023,43(6):2180-2193.
[35] Yang S Q, He T, Yang N, et al.Ecological synergy of solar development on the Qinghai-Tibet Plateau: a decade of ecosystem service change assessment at Talatan Solar Park[J].Environmental Research Letters,2025,20(7):074014.
[36] 胡光印,董治宝,杨林海,等.共和盆地土地利用/覆盖变化(LUCC)及其驱动因素[J].地球环境学报,2025,16(3):333-343.
[37] 魏佳荣,周侃,张健.青藏高原光伏产业园区的土地退化过程及其空间效应:基于土地退化平衡的视角[J].地理研究,2025,44(8):2057-2079.

# Spatiotemporal coupling zoning-based analysis of the variation characteristics and driving mechanisms of vegetation carbon sequestration in the Gonghe Basin

Liu Xinru[1], Kuang Yuwei[1], Hu Yuanan[1], Yang Siqi[1], Jia Hong[2]

(1. *MOE Key Laboratory of Groundwater Circulation and Environmental Evolution, China University of Geosciences (Beijing), Beijing* 100083, *China*; 2. *Institute of Geographical Science, Taiyuan Normal University, Taiyuan* 030619, *China*)

**Abstract**: The Gonghe Basin, located on the northeastern Qinghai-Tibet Plateau, is an ecologically fragile region with important vegetation carbon sequestration functions. Using the CASA model, a spatiotemporal zoning framework, and geodetector analysis, this study examined vegetation carbon fixation and its drivers from 2010 to 2022. Results showed an overall increase in carbon fixation, with mean values ranging from 65.60 to 104.89 $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$. High-value areas were mainly located in the eastern and southeastern basin, while low-value areas occurred in the northwest and basin margins. Significant temporal changes covered about 19% of the basin, and slightly increased areas accounted for 51.53%. Carbon fixation was classified into five functional zones, among which the stable maintenance zone was the largest, covering about 10 555.62 $km^2$. Geodetector analysis results indicated that precipitation and elevation were the dominant drivers, while photovoltaic distribution showed stronger effects in the degradation risk zones. All two-factor interactions showed enhanced effects, especially hydrothermal-topographic coupling and photovoltaic-natural factor interactions. These findings support coordinated renewable energy development, desertification control, and carbon sink enhancement in arid and semi-arid regions.

**Key words**: carbon sequestration; spatiotemporal coupling zoning; geodetector; driving mechanisms; Gonghe Basin