

DOI: 10.12401/j.nwg.2023072

## 西北地区生态系统碳汇时空分布特征 及相关驱动因子分析

李彦娥, 王化齐\*, 刘江, 马红娜

(中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 西北地区气候干旱、降水稀少, 能源丰富, 生态环境脆弱敏感, 是双碳目标战略实现的难点和关键区域, 其生态系统碳汇功能及其驱动因素研究具有非常重要的意义。笔者在分析近 40 年间碳汇用地演化的基础上, 揭示了碳汇的时空变化规律, 深入探讨了碳汇变化与地形地貌、温度和降水等主要驱动因素的关系。结果表明: ①西北地区碳汇用地类型整体变化不大, 但局部有一定的变化。②2020 年生态碳汇量约为 5 826.44 万 tC/a, 其中林地占主导地位, 其次为草地、水域、耕地、湿地、未利用地; 碳汇量从大到小依次为新疆、陕西、甘肃、青海、内蒙古(西北片区)、宁夏; 碳汇强度大小依次为陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海、内蒙古(西北片区); 40 年来碳汇量变化整体呈波动上升趋势, 个别区域在某一时期有所下降。③碳汇驱动因素主要有地形地貌、降雨和气温, 地形地貌决定了生态系统碳汇强度, 碳汇强度与降水呈强正相关性, 与气温呈现正相关。

**关键词:** 生态系统; 碳汇; 时空变化; 驱动因素; 西北地区

中图分类号: P66

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)04-0185-11

### Spatial and Temporal Distribution and Driving Factors of Ecosystem Carbon Sink in Northwest China

LI Yan'e, WANG Huaqi\*, LIU Jiang, MA Hongna

(Xi'an Center of China Geological Survey / Northwest China Center for Geoscience Innovation, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

**Abstract:** Northwest China is a difficult and key area for the realization of the dual carbon target strategy due to its arid climate, scarce precipitation, abundant energy and fragile and sensitive ecological environment. The study on its ecosystem carbon sink function and its driving factors is of great significance. Based on the analysis of the evolution of carbon sink land in the past 40 years, this paper reveals the temporal and spatial change law of carbon sink, and deeply explores the relationship between carbon sequestration change and major driving factors such as topography, temperature, and precipitation. The results show that: ① The overall change of land types for carbon sink in northwest China is small, but there are some changes in some parts. ② In 2020, the ecological carbon sinks will be about 58 264 400 tC/a, of which forest land will dominate, followed by grassland,

收稿日期: 2022-12-04; 修回日期: 2023-04-17; 责任编辑: 姜寒冰

基金项目: 中国地质调查局项目“丝绸之路境内段(新疆)资源环境承载力监测评价”(DD20221731)资助。

作者简介: 李彦娥(1976-), 女, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查工作。E-mail: 153017340@qq.com。

\* 通讯作者: 王化齐(1980-), 女, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查工作。E-mail: whqi321@163.com。

water area, farmland, wetland and unused land; From large to small, the carbon sinks is Xinjiang, Shaanxi, Gansu, Qinghai, Inner Mongolia (northwest area), Ningxia; The carbon sink intensity is in order of Shaanxi, Gansu, Ningxia, Xinjiang, Qinghai, Inner Mongolia (northwest region). Over the past 40 years, the change of carbon sinks has shown an overall upward trend, and declined in some regions in a certain period. ③ The driving factors of carbon sink mainly include landform, rainfall and temperature. The landform determines the intensity of ecological carbon sink. The intensity of carbon sink is strongly positively correlated with rainfall and positively correlated with temperature.

**Keywords:** ecosystem; carbon sink; temporal and spatial changes; drivers; Northwest China

碳汇的增加和碳源的减少是降低大气中  $\text{CO}_2$  浓度、实现“碳达峰、碳中和”目标的 2 个主要途径(王**国强等, 2023**)。生态系统能够通过光合作用将  $\text{CO}_2$  吸收并固定在植被、土壤、湿地等载体中(李**姝等, 2015**), 因此在增加“碳汇”、调节区域碳循环中具有重要作用。围绕生态系统的碳汇功能评估, 国内学者目前已开展了一系列研究工作, 其中包括针对不同类型陆地生态系统的碳汇评估方法(潘**竟虎等, 2015**; 关**晋宏等, 2016**; 冯**晶红等, 2020**; 谢**立军等, 2022**; 张**杰等, 2022**), 不同区域不同土地利用类型生态系统的碳汇时空变化(彭**文甫等, 2016**; 杨**文学等, 2016**; 严**慈等, 2021**; 魏**媛等, 2022**; 杨**静媛等, 2022**; 洪**增林等, 2023**)及碳汇影响因素(胡**雷等, 2015**; 张**赫等, 2020**; 李**磊等, 2022**)等。但是, 由于方法的不同、样本量的限制, 有关生态系统碳汇变化估算结果仍存在极大不确定性。现有的碳汇评估方法多针对某一区域的单一生态系统类型进行, 涉及不同土地利用类型时多采用同一固碳系数进行评估, 难以体现不同区域不同时期生态系统的碳汇能力的差异; 同时, 关于碳汇评估效果的影响因素的研究相对缺乏, 主要集中在经济发展、产业结构、土地利用变化等方面。

位于胡焕庸线以西的西北地区占据着国土面积的 32%, 但深居内陆, 气候干旱、降水稀少, 生态系统敏感脆弱, 是双碳目标实现的关键和难点区域。精准估算西北地区生态系统碳汇, 是促进区域生态保护, 寻求生态系统碳汇能力提升途径的基础, 对中国碳中和战略目标实现有着重要意义。笔者以西北地区为对象, 在分析近 40 年碳汇用地演化的基础上, 在省域尺度上采用特异性的固碳速率法分析了不同区域、不同时期和不同类型生态系统碳汇时空变化规律, 并深入探讨了其驱动因素, 以期对西北地区低碳国土空间塑造、固碳能力提升及双碳目标实现提供重要的参考依据。

## 1 研究区概况

西北地区地理位置为  $\text{E } 73^{\circ} \sim 123^{\circ}$ ,  $\text{N } 36^{\circ} \sim 50^{\circ}$ , 深居中国西北部内陆, 涵盖陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆 5 省(区)和内蒙古自治区西部, 面积约为  $375 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该区地域辽阔, 人口相对稀少, 气候干旱, 降水稀少, 蒸发旺盛(党**学亚等, 2022**), 多年平均降水量为 235 mm。特殊的地理位置及气候条件决定了西北地区水资源短缺, 生态环境脆弱(李**文明等, 2022**; 徐**友宁等, 2022**)。根据西北地区地形地貌特点(计**文化等, 2022**), 将研究区划分为平原、台地、丘陵、低山、中山、高山 6 类, 其中平原和丘陵面积最大(28.51% 和 28.37%), 高山次之(18.53%), 低山最小(0.76%)。

## 2 估算方法及数据来源

文中土地利用、地貌类型、降水、气温等数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。土地利用数据涉及 1980~2020 年, 通过 Arcgis10.2 软件按生态系统类型将其划分为林地、草地、农田、湿地、未利用地、水域 6 类, 建设用地不涉及碳汇, 本次估算不包括在内。

受数据资料限制, 文中碳汇估算系数采用不同时期省域平均值测算, 虽能体现不同省域不同时期生态系统碳汇能力的差异, 但省域内地域性差异无法体现。耕地生态系统碳汇只考虑了施肥、秸秆还田、无固碳措施对土壤固碳速率的影响, 忽略免耕固碳效应, 测算的耕地碳汇量会有所偏低。

### 2.1 陆地生态系统碳汇估算

根据《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》(生态环境部环境规划院, 中国科学院生态环境研究中心, 2020), 采用固碳速率法直接测算林地、草地、

农田、湿地4种生态系统净碳汇量,其计算公式为:

$$Q_t = FCS + GSCS + WCS + CSCS \quad (1)$$

式中:  $Q_t$  为碳汇总量( $\text{tC/a}$ );  $FCS$  为林地碳汇量( $\text{tC/a}$ );  $GSCS$  为草地碳汇量( $\text{tC/a}$ );  $WCS$  为湿地碳汇量( $\text{tC/a}$ );  $CSCS$  为农田碳汇量( $\text{tC/a}$ )。

$$FCS = FCSR \times SF \times (1 + \beta) \quad (2)$$

式中:  $FCSR$  为林地固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $SF$  为林地面积( $\text{km}^2$ );  $\beta$  为土壤固碳系数。

$$GSCS = GSR \times SG \quad (3)$$

式中:  $GSR$  为草地土壤固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $SG$  为草地面积( $\text{km}^2$ )。

$$WCS = SCSR_i \times SW_i \quad (4)$$

式中:  $SCSR_i$  为第  $i$  类水域湿地的固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $SW_i$  为第  $i$  类水域湿地的面积( $\text{km}^2$ )。

$$CSCS = (BSS + SCSR_n + PR \times SCSR_s) \times SC \quad (5)$$

式中:  $BSS$  为无固碳措施下固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $SCSR_n$  为施用化肥固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $SCSR_s$  为秸秆还田固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $PR$  为秸秆还田率。

$$BSS = NSC \times BD \times H \times 0.1 \quad (6)$$

式中:  $NSC$  为土壤有机碳的变化;  $BD$  为土壤容重( $\text{g/cm}^3$ );  $H$  为土壤厚度(取  $20 \text{ cm}$ )。

$$SCSR_n = 0.6352 \times TNF - 1.0834S \quad (7)$$

式中:  $TNF$  为单位面积耕地化学氮肥、复合肥总施用量( $\text{kg/hm}^2 \cdot \text{a}$ )

$$TNF = (NF + CF \times 0.3) / S_p \quad (8)$$

式中:  $S_p$  为耕作面积( $\text{hm}^2$ );  $NF$  和  $CF$  为化学氮肥和复合肥施用量( $\text{t}$ )。

$$SCSR_n = 17.116 \times S + 30.553 \quad (9)$$

式中:  $S$  为单位面积秸秆还田量( $\text{t/hm}^2 \cdot \text{a}$ )。

$$S = \sum_{j=1}^n C_{yj} \times SGR_j / S_p \quad (10)$$

式中:  $C_{yj}$  为作物  $j$  在当年的产量( $\text{t}$ );  $SGR_j$  为作物  $j$  的草谷比;  $S_p$  为耕作面积( $\text{hm}^2$ )。

## 2.2 水域及未利用地碳汇估算

文中水域及未利用地的碳汇量估算采用以下公式:

$$Q_i = \sum_{j=1}^n S_i \times F_i \quad (11)$$

式中:  $Q_i$  为碳汇量( $\text{tC/a}$ );  $S_i$  为不同土地类型面积( $\text{km}^2$ );  $F_i$  为不同土地类型的固碳速率( $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ )。所用参数具体值及来源见表1和表2。

## 2.3 分布指数

为消除不同地貌区面积差异的影响,引入分布指数( $P$ )来描述碳汇类型在地貌区的分布情况,计算公式如下(李磊等, 2022):

$$P = (S_{ie}/S_i)/(S_e/S) \quad (12)$$

式中:  $P$  为分布指数;  $S_{ie}$  为在  $e$  区域内  $i$  类型的面积;  $S_i$  为研究区内  $i$  类型的总面积;  $S_e$  表示  $e$  区域(本研究中指地貌区域)的面积;  $S$  为研究区总面积。当  $P=1$  时,表示该类型在  $e$  区域平稳分布;当  $P>1$  时,表示该类型在  $e$  区域为优势分布,反之劣势分布,且  $P$  值越大,分布优势越显著。

表1 主要参数列表

Tab. 1 List of main parameters

| 参数                | 定义            | 取值              | 单位                              | 来源          |
|-------------------|---------------|-----------------|---------------------------------|-------------|
| $FCSR$            | 林地固碳速率        | 0.28~1.36       | $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ | 陆地GEP核算技术指南 |
| $\beta$           | 林地土壤固碳系数      | 0.646           | /                               | 陆地GEP核算技术指南 |
| $GSR$             | 草地土壤固碳速率      | 0.02~0.06       | $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ | 陆地GEP核算技术指南 |
| $SCSR_i$          | 湿地的固碳速率       | 0.302 6~0.671 1 | $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ | 陆地GEP核算技术指南 |
| $S_{\text{水域}}$   | 水域的固碳速率       | 0.303           | $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ | 张赫等, 2020   |
| $S_{\text{未利用地}}$ | 未利用地固碳速率      | 0.000 5         | $\text{tC/hm}^2 \cdot \text{a}$ | 张赫等, 2020   |
| $PR$              | 秸秆还田推广实行率     | 0.8%~33.2%      | /                               | 张国等, 2017   |
| $NSC$             | 土壤有机碳的变化      | 0.06            | /                               | 陆地GEP核算技术指南 |
| $H$               | 土壤厚度          | 20              | $\text{cm}$                     | 陆地GEP核算技术指南 |
| $NF$              | 化学氮肥施用量       | /               | $\text{t}$                      | 各省统计年鉴      |
| $CF$              | 复合肥施用量        | /               | $\text{t}$                      | 各省统计年鉴      |
| $C_{yj}$          | 作物 $j$ 在当年的产量 | /               | $\text{t}$                      | 各省统计年鉴      |
| $SGR_j$           | 作物 $j$ 的草谷比   | 见表2             | /                               | 农业农村部办公厅    |

表 2 不同作物的草谷比

Tab. 2 Ratio of grass to grain of different crops

| 作物 | 草谷比   | 作物   | 草谷比  |
|----|-------|------|------|
| 水稻 | 0.623 | 油料   | 2.0  |
| 麦类 | 1.366 | 棉花   | 8.1  |
| 玉米 | 2.0   | 豆类   | 1.57 |
| 薯类 | 0.5   | 麻类   | 8.10 |
| 烟叶 | 1.0   | 其它谷物 | 0.85 |

3 结果分析

3.1 西北地区土地利用时空演化特征

土地利用覆被变化是影响生态系统碳汇最主要的因素之一。从 40 年间西北地区土地利用分布可以

看出(图 1),受特有的气候和自然地理条件限制,未利用地和草地在西北地区占主导地位。未利用地主要分布于塔里木盆地、准噶尔盆地的荒漠区以及内蒙古北部的沙漠区,占比达 46.11%~47.35%;草地主要分布于新疆天山山脉地区、青海南部地区及内蒙古赛罕塔拉城中草原、鄂尔多斯草原,占比达 35.79%~36.90%;

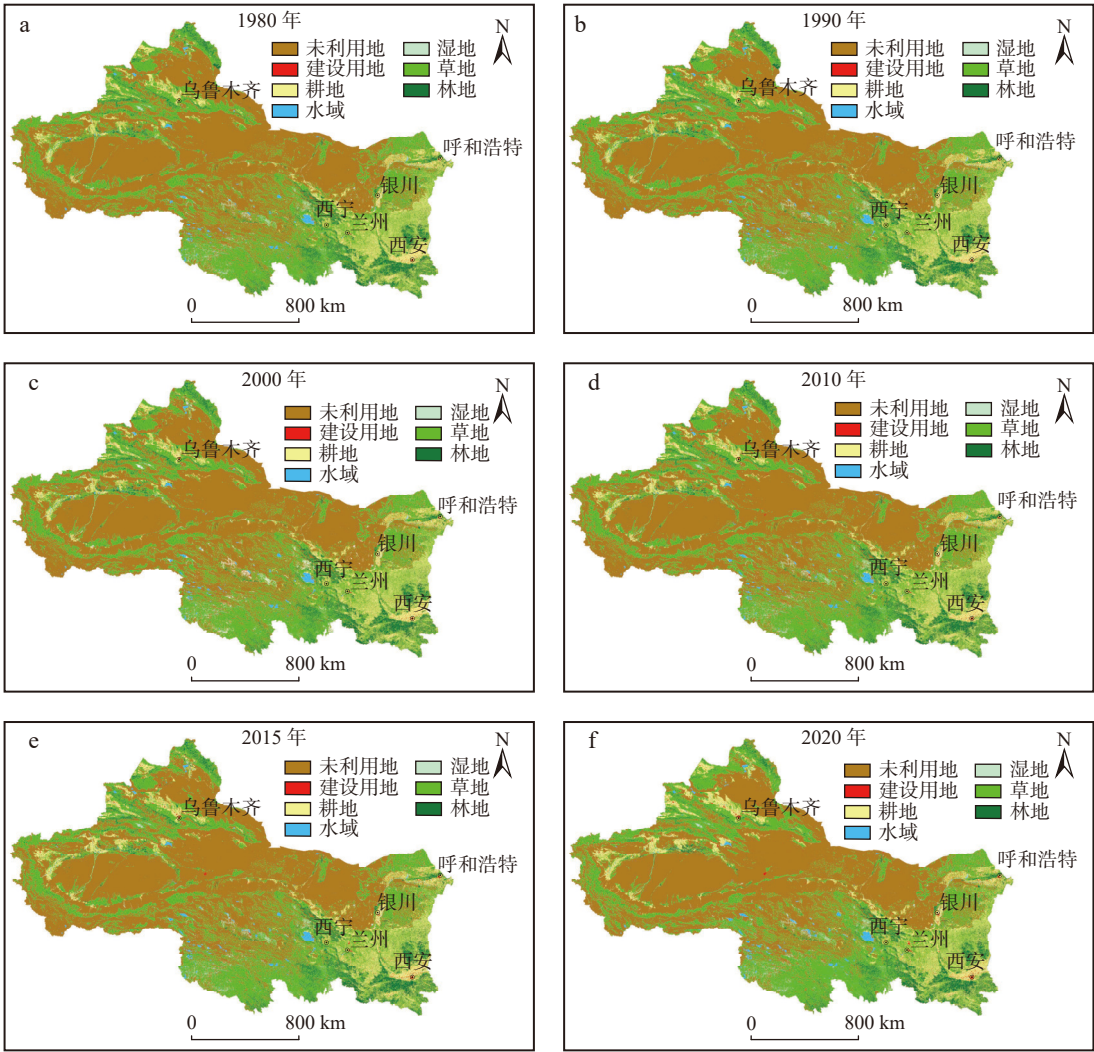


图 1 1980~2020 年西北地区土地利用分布图

Fig. 1 Land use distribution in Northwest China from 1980 to 2020

其次为耕地,主要分布在环塔里木盆地和环准噶尔盆地的边缘地带、关中平原、银川平原、甘肃的高原地区等,占比为7.55%~8.24%;再次是林地,主要分布在陕西秦岭、甘肃南部及中部武威地区、青海东南部,占4.80%~5.04%;湿地、水域和建设用地很少,分别占1.28%~1.46%、1.66%~2.04%和0.48%~0.94%。

时间尺度上,1980~2020年西北地区土地利用类型整体变化不大,但局部有一定的变化。林地、湿地和水域分布有增有减,其中林地在2015年前总体呈缓慢增长趋势,增幅1.52%,之后减少8 926 km<sup>2</sup>,减幅4.72%;湿地最大年变幅1.10%,40年总体减少14 190 km<sup>2</sup>。草地在2015年前呈波动性减少,2015年之后有所增加,40年中总体表现为增加,增加量14 265 km<sup>2</sup>,增幅1.04%。耕地和建设用地持续增加,40年分别增加27 017 km<sup>2</sup>和17 041 km<sup>2</sup>,增幅分别为9.58%和94.48%,这与城市不断扩张有关。未利用地波动性减少,减少40 434 km<sup>2</sup>,减幅2.28%。

### 3.2 西北地区碳汇时空分布特征

#### 3.2.1 西北地区碳汇的时序演化规律

随着不同历史时期土地利用分布的变化,生态系统碳汇量也发生一系列的变化(表3)。1980~2020年,西北地区生态系统碳汇量从1980年的3 956.50×10<sup>4</sup> tC/a上升至2020年的5 826.44×10<sup>4</sup> tC/a,整体呈波动上升态势,仅个别区域(新疆)在2020年略有下降。区域生态系统碳汇总量的变化可分为2个阶段:1980年

至2015年间,碳汇总量持续上升至6 203.08×10<sup>4</sup> tC/a,35年间增加2 246.58×10<sup>4</sup> tC/a;2016~2020年,由于新疆片区生态系统碳汇下降376.64×10<sup>4</sup> tC/a,导致区域碳汇总量降至5 826.44×10<sup>4</sup> tC/a。碳汇强度随时间的变化与碳汇量趋势一致,整体呈波动上升态势,仅个别时期有所下降。1980~2015年,生态系统碳汇强度从0.105 tC/hm<sup>2</sup>上升到了0.165 tC/hm<sup>2</sup>,但之后有所降低,2020年碳汇强度为0.155 tC/hm<sup>2</sup>。区域生态碳汇类型主要以林地碳汇为主,占比74.08%~81.77%,其次是草地(6.83%~10.95%)、水域(4.47%~7.55%)、耕地(4.48%~5.25%)、湿地(1.44%~2.30%)和未利用地(0.13%~0.21%)。

#### 3.2.2 西北地区碳汇空间分布特征

由于自然地理条件的差异,西北地区不同区域碳汇量差异较大(图2)。1980~2010年,碳汇量从高到低依次为新疆、甘肃、陕西、青海、内蒙古(西北片区)、宁夏;2015~2020年,碳汇空间格局发生变化,陕西超越甘肃位居第二。整个研究期内碳汇量最高的区域是新疆,达1 386.63~1 817.34×10<sup>4</sup> t/a。

由于不同行政区域面积相差较大,相比碳汇总量,碳汇强度更能客观反映一个地区的碳汇水平,便于不同地区进行横向比较。碳汇强度分布图(图3)显示,整个研究期内陕西省碳汇强度最高,达28.09~58.43 t/km<sup>2</sup>,其主要原因是该省林地面积占比较高,达22.55%~23.66%;甘肃省次之(林地占比9.57%~

表3 40年间西北地区生态系统碳汇量及占比

Tab. 3 Carbon sink amount and proportion of ecosystem in Northwest China in 40 years

| 年份   | 碳汇量(10 <sup>4</sup> tC/a)及占比 |        |        |       |        |       | 碳汇强度(tC/hm <sup>2</sup> ) |
|------|------------------------------|--------|--------|-------|--------|-------|---------------------------|
|      | 林地                           | 草地     | 耕地     | 湿地    | 水域     | 未利用地  | 合计                        |
| 1980 | 2 953.84                     | 433.05 | 177.17 | 90.40 | 293.69 | 8.34  | 3 956.50                  |
|      | 74.66%                       | 10.95% | 4.48%  | 2.28% | 7.42%  | 0.21% | 100.00%                   |
| 1990 | 2 980.04                     | 433.42 | 188.55 | 90.54 | 282.87 | 8.33  | 3 983.73                  |
|      | 74.81%                       | 10.88% | 4.73%  | 2.27% | 7.10%  | 0.21% | 100.00%                   |
| 2000 | 2 971.03                     | 428.09 | 208.04 | 92.34 | 302.70 | 8.35  | 4 010.57                  |
|      | 74.08%                       | 10.67% | 5.19%  | 2.30% | 7.55%  | 0.21% | 100.00%                   |
| 2010 | 3 923.06                     | 424.95 | 262.92 | 91.62 | 292.55 | 8.38  | 5 003.49                  |
|      | 78.41%                       | 8.49%  | 5.25%  | 1.83% | 5.85%  | 0.17% | 100.00%                   |
| 2015 | 5 072.23                     | 423.64 | 314.07 | 89.46 | 295.36 | 8.32  | 6 203.08                  |
|      | 81.77%                       | 6.83%  | 5.06%  | 1.44% | 4.76%  | 0.13% | 100.00%                   |
| 2020 | 4 734.70                     | 435.97 | 299.90 | 87.40 | 260.22 | 8.25  | 5 826.44                  |
|      | 81.26%                       | 7.48%  | 5.15%  | 1.50% | 4.47%  | 0.14% | 100.00%                   |

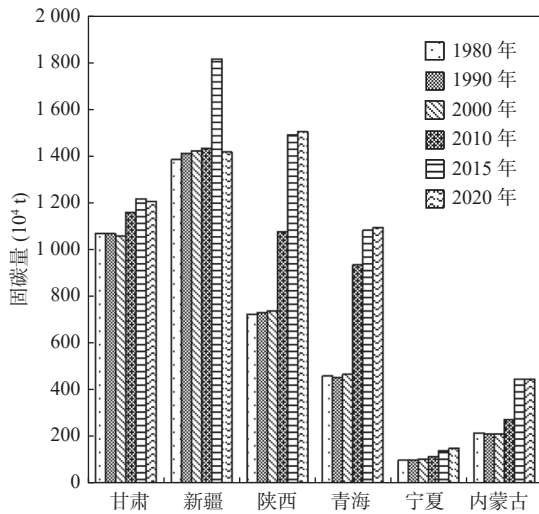


图2 不同区域碳汇量分布图

Fig. 2 Distribution of carbon sink in different regions

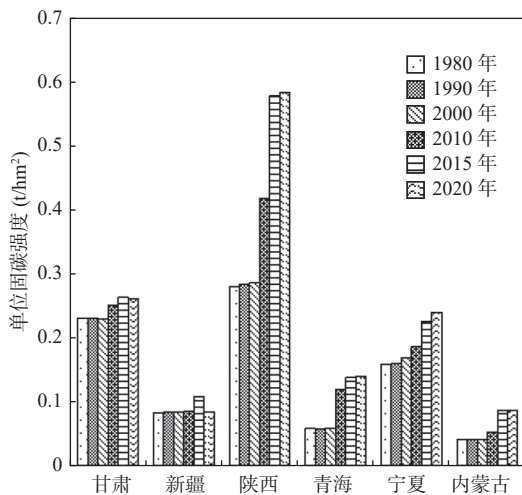


图3 不同区域碳汇强度分布

Fig. 3 Distribution of carbon sink strength in different regions

10.23%)，宁夏第三；新疆在1980~2000年位列第四、青海位列第五，但2010~2020年间青海超过新疆，位居第四；整个研究期内蒙古(西北片区)一直位居第六，主要与该地区林地面积占比仅为1.84%~2.07%有关。

研究期内各区域的碳汇效应在时间变化上具有较大差异性。陕西、宁夏整体呈持续上升趋势，但1980~2000年上升相对较缓，之后上升速率加快；甘肃、内蒙古、青海碳汇强度整体呈波动上升趋势，且上升较缓；新疆呈先持续缓慢上升到2015年又有所下降。

### 3.3 不同生态系统类型碳汇变化趋势

不同生态系统类型中湿地和未利用地的碳汇量

占比很小，且变化趋势不明显。因此，文中仅分析林地、草地、水域、耕地4类生态系统的碳汇量变化趋势(图4)。

#### 3.3.1 林地生态系统

通过评估，西北地区林地碳汇量整体呈持平-持续上升-下降或基本持平态势，不同区域在时间变化上有所差异。1980~2000年，各区域基本呈持平状态，之后持续上升。2015~2020年，除新疆外基本持平或略增；新疆先波动持平，2010年开始上升，2015年又开始下降。2000~2015年，青海、内蒙古(西北片区)、陕西上升幅度较大，年增幅分别达23.99%和20.86%、7.62%；宁夏、甘肃上升幅度较小，年增幅分别达2.54%和1.02%。2000年以后，各区域林地碳汇量持续上升，与当地相继开展的“天然林资源保护工程”和“退耕还林”等政策有关(胡雷等, 2015; 关晋宏等, 2016; 张杰等, 2022)。新疆林地碳汇量由开始的持平到2015年后大幅下降，与区域林地从1990开始缓慢减少到2015年后大幅降低有关，这与马丽娜等(2022)研究结论一致。

#### 3.3.2 草地生态系统

评估期内，草地碳汇量整体处于基本持平态势，不同区域在时间变化上有所差异。内蒙古(西北片区)、甘肃、陕西、宁夏整体呈持平趋势；青海1980~2015年先波动持平，之后上升，年上升幅度1.10%；新疆1980-2015年波动缓慢下降(年下降幅度0.11%)，在2015年又开始上升(年上升幅度0.73%)；宁夏持续减少，减少约5 929 tC/a，降幅9.50%。

内蒙古(西北片区)、甘肃、陕西、宁夏草地碳汇量年度变化差异不大，这与草地面积变化较小有关。新疆2015年之前碳汇量缓慢下降，与区域草地退化，草地面积减少有关；之后受土地利用转移影响(王志强等, 2022)，草地面积增加导致其碳汇量相应增加。青海碳汇量增加与2015年后草地面积增加有关。

#### 3.3.3 耕地生态系统

据评估，近40年的耕地碳汇量除青海外整体呈波动性增长态势。但不同区域在时间变化上也有所差异。受节水灌溉等影响，新疆、宁夏呈持续上升趋势，年升幅分别为3.62%和2.40%，这与40年间耕地面积不断增加，及农业产量提高有关；青海40年间整体变化不大，仅增加1.55万t，这与其耕地面积较少、作物产量较低有关。陕西、甘肃、内蒙古(西北地区)呈现先持续上升，2015年后又下降态势，2015年前升幅分别为1.76%、0.68%、3.13%，2015年后降幅分别

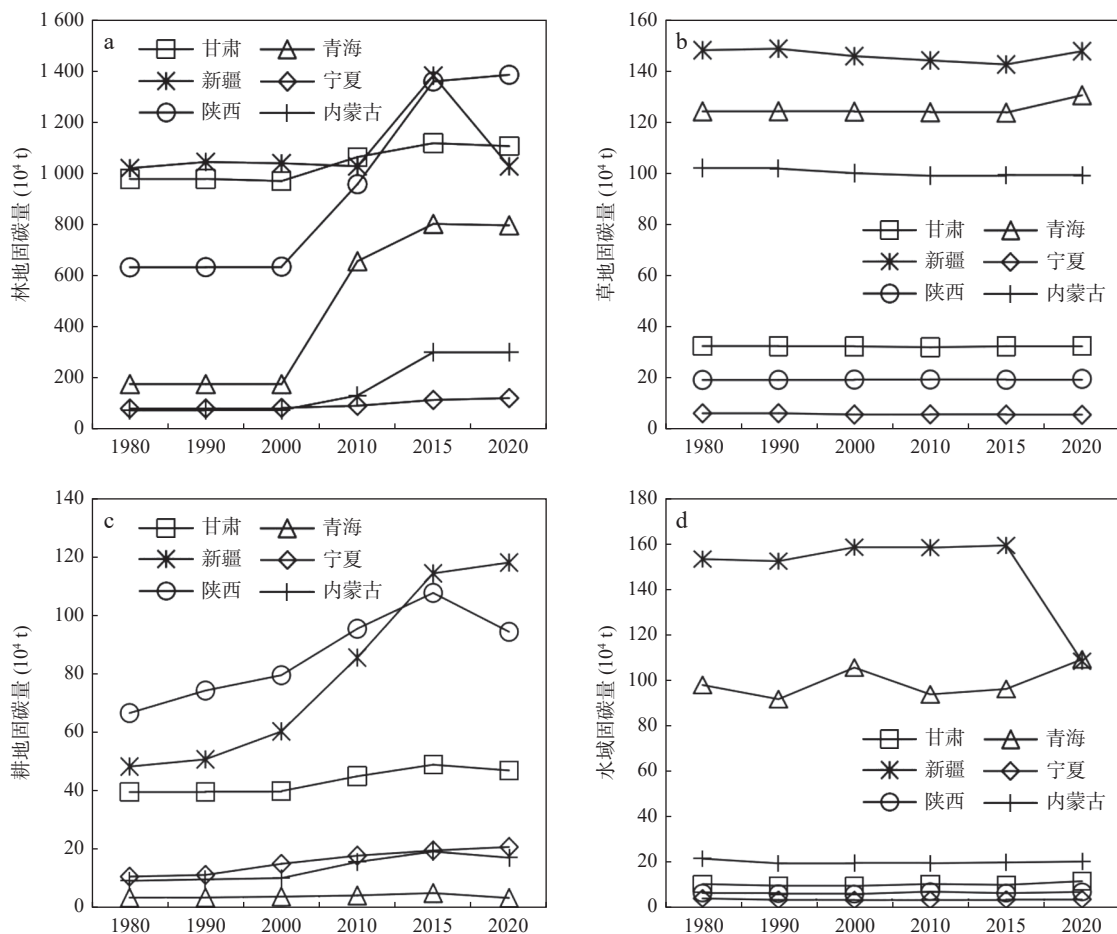


图4 不同生态系统碳汇变化趋势

Fig. 4 Change trend of carbon sink in different ecosystems

为2.47%、0.81%和2.20%。陕西从1980年耕地面积虽然在缓慢减少,但由于作物产量提高,加上复合肥投入的增加,导致碳汇强度提高,从而使碳汇量不断增加;但由于2015~2020年耕地面积减少幅度增大,从而使整体碳汇量有所降低。近40年,甘肃和内蒙古耕地数量基本持平,由于作物产量提高及复合肥投入加大,使碳汇量不断增加,之后甘肃耕地面积大量缩减导致碳汇量降低,而内蒙古(西北片区)由于耕地面积、复合肥投入的减少略有降低。

### 3.3.4 水域生态系统

近40年来,内蒙古(西北片区)、甘肃、陕西、宁夏水域碳汇量整体呈持平趋势;新疆呈现先波动上升,至2015年又下降趋势,5年间下降 $50.80 \times 10^4$  t,年降幅6.39%;青海有升有降,之后2010年持续上升,年上幅1.64%。水域碳汇量随水域面积变化而变化,新疆受冰川融化、降水等(徐丽萍等, 2020)影响水域面积发生改变。青海2010年之后受径流量、降水等影响,水域面积逐年增大(郭丰杰等, 2022)。

## 4 西北生态系统碳汇与地形地貌、温度和降水等驱动因素的关系

植被生长变化受多种要素影响。地貌是自然环境最基本的组成要素,在不同尺度上制约着气候、植被、土壤、水文等其他自然环境要素的变化(巩杰等, 2017)。气候因素中,温度和降水是影响生态系统净生产力的两个最主要因素(刘应帅等, 2022),它通过影响植物的光合作用和呼吸作用进而影响生态系统的碳汇能力。因此探讨碳汇强度与地貌、降水、温度的关系对生态系统碳汇的提升至关重要。西北地区碳汇强度及各驱动因素分布见图5。

### 4.1 生态系统碳汇与地貌的关系分析

西北地区地处中国第一和第二地势阶梯之上,横跨干旱—半干旱区、青藏高原高寒区、东部季风区3大自然地理分区;有阿尔泰山、天山、昆仑山、阿尔金山、祁连山、秦岭、大巴山、巴颜喀拉山和可可西里山等

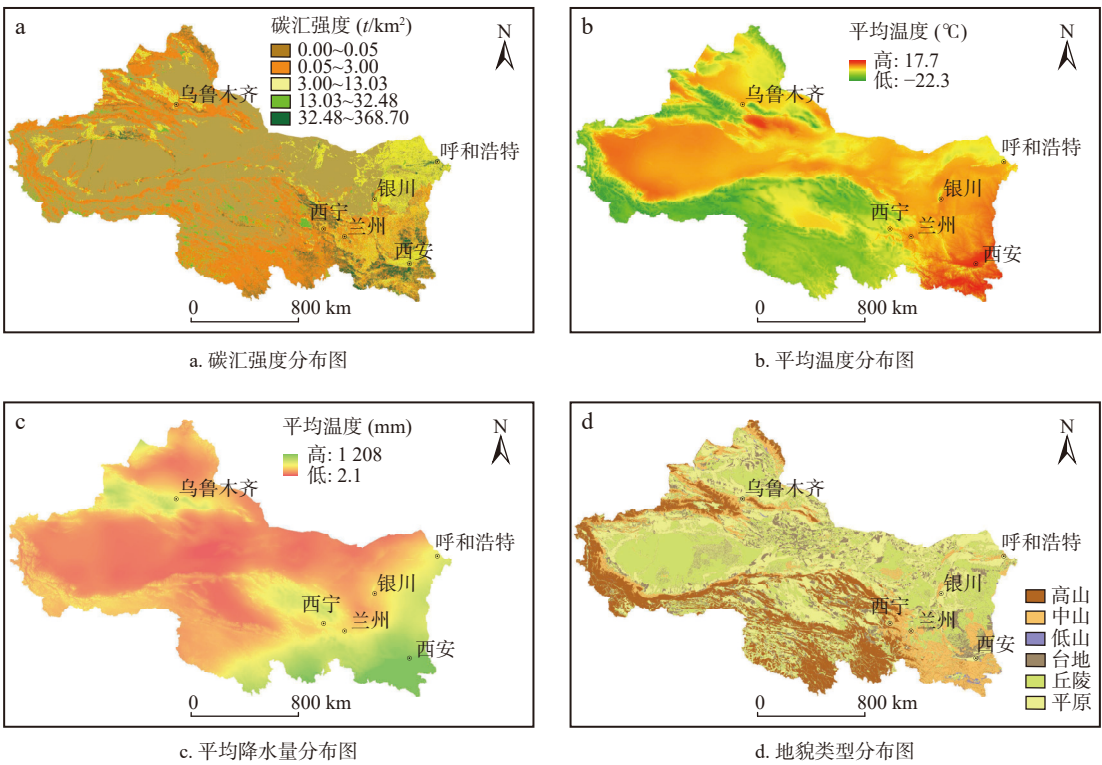


图5 西北地区碳汇强度及各驱动因素分布图

Fig. 5 Distribution of carbon sink intensity and driving factors in Northwest China

山脉;并有内蒙古高原、黄土高原、准噶尔盆地、塔里木盆地、柴达木盆地(党学亚等, 2022)。不同的地貌类型,其生态系统的碳汇量也有差异。通过评估,各生态碳汇类型在地貌区中的分布见表4。地貌对生态碳汇类型的分布具有明显的控制作用。林地在山区呈优势分布,特别是中山地貌区,分布指数达4.4,在其他地貌类型区呈劣势分布;草地在山区呈优势分布,在其他地貌类型区呈劣势分布;耕地在地势较为平坦的平原和台地呈优势分布,在低中山区呈稳态分布;水域和湿地在平原呈优势分布;未利用地在丘陵区呈优势分布,在平原和台地呈稳态分布。

表4 生态碳汇类型在地貌类型中的分布指数

Tab. 4 Distribution index of ecological carbon sink types in landform types

| 类型   | 平原  | 台地  | 丘陵  | 低山  | 中山  | 高山  |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 林地   | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 1.6 | 4.4 | 1.3 |
| 草地   | 0.8 | 0.9 | 0.8 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 耕地   | 1.7 | 1.3 | 0.7 | 1.0 | 1.2 | 0.1 |
| 水域   | 2.5 | 0.9 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | 0.4 |
| 未利用地 | 1.0 | 1.1 | 1.4 | 0.6 | 0.3 | 0.8 |

4.2 生态系统碳汇与降水的关系分析

西北地区平均降水量差别较大(2.1~1 208 mm),为研究碳汇强度在不同降水区的变化趋势,以100 mm为一个梯度,将研究区降水量划分为12个级别。研究表明,西北地区碳汇强度总体上随降水量增加呈先上升后下降又上升的态势(图6)。具体地,在降水量2~802 mm段,呈持续上升阶段,并在102~802 mm出现最大值,其碳汇强度约为127.41 t/km²;在803~1 002 mm出现持续下降,最低约为44.06 t/km²;在1 003~

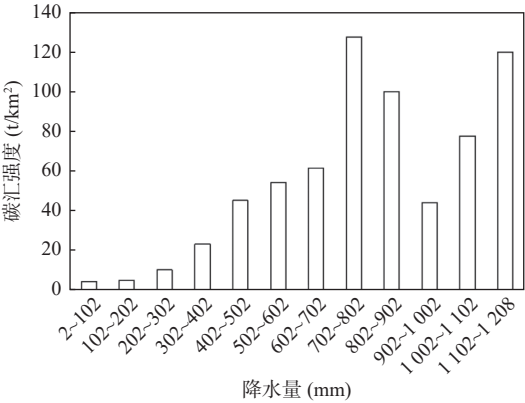


图6 不同降水区碳汇强度分布图

Fig. 6 Distribution of carbon sink intensity in different precipitation areas

1 208 mm 随降水量增加而增加。结合区域地形地貌分析,902~1 002 mm 主要分布在陕西南部汉中及汉江流域,海拔低,耕地、草地较多,其碳汇强度相对较低。

为进一步分析降水量与碳汇强度相关性,对不同降水区平均降水量与其对应的平均碳汇强度作相关分析。结果显示,降水量2~802 mm 段呈显著正相关( $r=0.9152$ ),803~1 002 mm 段呈显著负相关( $r=-0.9815$ );1 003~1 208 mm 段呈显著正相关( $r=0.9977$ )。

#### 4.3 生态系统碳汇与气温的关系分析

为研究碳汇强度在不同气温区的变化趋势,以3℃为一个梯度,将研究区气温(-22.3~17.7℃)划分为14个级别。研究表明,西北地区碳汇强度总体上随气温增加呈波动上升的态势(图7)。低于零下2℃区域,其碳汇强度均较低,最高为9.52 t/km<sup>2</sup>; -2.0~10℃区域,其碳汇强度变化不大,在1~4℃区最高,为12.27 t/km<sup>2</sup>; 10℃开始,其碳汇强度随温度升高而持续上升,在16~18℃区域出现最大值,其碳汇强度为71.98 t/km<sup>2</sup>。

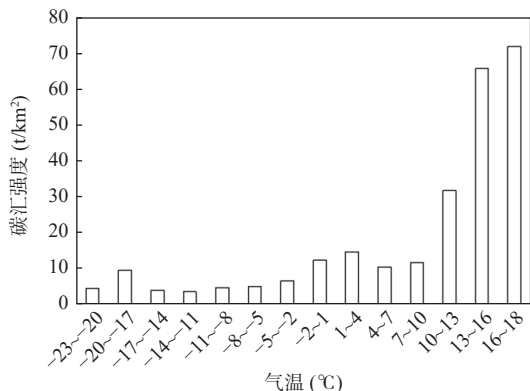


图7 不同气温区碳汇强度分布图

Fig. 7 Distribution of carbon sink intensity in different temperature zones

对不同气温区平均温度与其对应的平均碳汇强度作相关分析。结果显示,2℃以下呈正相关( $r=0.6315$ ),2℃以上呈显著正相关( $r=0.9595$ )。

## 5 结论

(1)受特有的自然地理环境控制性影响,西北地区未利用地和草地占主导地位。土地利用类型40年间整体变化不大,但局部有一定的变化。林地先呈缓慢增长趋势,2015年后开始下降;草地先波动性减少

后又增长趋势;耕地、建设用地呈持续增长趋势;未利用地波动性减少;湿地、水域则有增有减。

(2)2020年西北地区生态碳汇量约为5 826.44×10<sup>4</sup> tC/a,其中林地占主导地位,其次为草地、水域、耕地、湿地、未利用地。碳汇量大小依次为新疆、陕西、甘肃、青海、内蒙古(西北片区)、宁夏;碳汇强度大小依次为陕西、甘肃、宁夏、新疆、青海、内蒙古(西北片区)。1980~2020年,西北地区碳汇量变化整体呈波动上升态势,个别时期有所下降,主要由于新疆在2015~2020年间林地降幅较大所致。

(3)受水土保持、天然林保护等措施影响,各区域林地碳汇整体呈上升趋势,而新疆受2015年林地大幅下降影响有所降低。草地整体处于基本持平态势。耕地碳汇受灌溉、经济等投入影响,除青海外整体呈波动性增长态势。受气温等影响,青海水域面积有所增加,新疆则先增加后降低。

(4)西北地区生态碳汇与地貌、降水、气温有一定的相关关系。地貌是控制性因素,降水和气温具有一定的正相关关系。不同的地貌类型,决定了土地利用类型,决定了碳汇的强度大小;不同降水区呈现出相关差异性,低降水区和高降水区呈显著正相关,中降水区呈显著负相关;碳汇强度与气温呈现正相关,在较高温和高温区相关性显著。

## 参考文献(References):

- 党学亚,张俊,常亮,等.西北地区水文地质调查与水资源安全[J].西北地质,2022,55(3):81-95.
- DANG Xueya, ZHANG Jun, CHANG Liang, et al. Hydrogeological Survey and Water Resources Security in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 81-95.
- 冯晶红,刘瑛,肖衡林,等.三峡库区消落带典型植物光合固碳能力及影响因素[J].水土保持研究,2020,27(1):305-311.
- FENG Jinghong, LIU Ying, XIAO Henglin, et al. Photosynthesis and carbon sequestration characteristics of typical plants and their influencing factors in the reservoir riparian region of Three Gorges Reservoir[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1): 305-311.
- 巩杰,张影,钱彩云.甘肃白龙江流域净生态系统生产力时空变化[J].生态学报,2017,37(15):5121-5128.
- GONG Jie, ZHANG Ying, QIAN Caiyun. Temporal and spatial distribution of net ecosystem productivity in the Bailongjiang Watershed of Gansu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,

- 37(15): 5121–5128.
- 关晋宏, 杜盛, 程积民, 等. 甘肃省森林碳储量现状与固碳速率[J]. 植物生态学报, 2016, 40(4): 304–317.
- GUAN Jinhong, DU Sheng, CHENG Jimin, et al. Current stocks and rate of sequestration of forest carbon in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(4): 304–317.
- 郭丰杰, 李婷, 季民. 2000–2019 年青海湖面积时序特征分析及预测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 740–748.
- GUO Fengjie, LI Ting, JI Min, et al. Time series analysis and prediction of Qinghai Lake area from 2000 to 2019[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 740–748.
- 洪增林, 成星, 张瑜, 等. 黄土高原碳汇系统研究展望[J]. 西北地质, 2023, 56(3): 39–50.
- HONG Zenglin, CHENG Xing, ZHANG Yu, et al. Key Issues of Earth System Science in the Study of Carbon Sinks in the Loess Plateau[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(3): 39–50.
- 胡雷, 王长庭, 王根绪, 等. 青海省森林生态系统植被固碳现状研究[J]. 西南农业学报, 2015, 28(2): 826–832.
- HU Lei, WANG Changting, WANG Genxu, et al. Carbon sequestration of ecosystem vegetation in Qinghai Province[J]. Southwest China Journal of Agriculture Sciences, 2015, 28(2): 826–832.
- 计文化, 王永和, 杨博, 等. 西北地区地质、资源、环境与社会经济概貌[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 15–27.
- JI Wenhua, WANG Yonghe, YANG Bo, et al. Overview of Geology, Resources, Environment and Social Economy in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 15–27.
- 李磊, 兰安军, 钟九生. 黔中水利枢纽工程区植被覆盖变化及其对地形与地貌的响应[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 176–183.
- LI Lei, LAN Anjun, ZHONG Jiusheng. Change in vegetation cover and their response to topography and geomorphology in Qianzhong Water Conservancy Hub engineering areas[J]. Research of Soil and Water conservation, 2022, 29(4): 176–183.
- 李文明, 李健强, 徐永, 等. 西北生态地质调查研究进展与展望[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 108–119.
- LI Wenming, LI Jianqiang, XU Yong, et al. Progress and Prospects of Ecological Geological Survey in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 108–119.
- 李姝, 喻阳华, 袁志敏, 等. 碳汇研究综述[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(34): 136–139.
- LI Shu, YU Yanghua, YUAN Zhimin, et al. Review on carbon sink[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(34): 136–139.
- 刘应帅, 余瑞, 郑彬彬, 等. 海南岛森林植被 NEP 季节性时空变化规律及气候驱动因素分析[J]. 热带生物学报, 2022, 13(2): 166–176.
- LIU Yingshuai, YU Rui, ZHENG Binbin, et al. Analysis of seasonal spatial and temporal variation patterns of forest vegetation NEP and climate drivers in Hainan Island[J]. Journal of tropical biology, 2022, 13(2): 166–176.
- 马丽娜, 张飞云, 翟玉鑫, 等. 1980–2020 新疆土地利用变化下生态系统服务价值时空演变分析[J/OL]. 干旱区地理, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20220818.1615.003.html>.
- MA Lina, ZHANG Feiyun, ZHAI Yuxin, et al. Temporal and spatial evolution of ecosystem service value under land use change in Xinjiang from 1980 to 2020[J/OL]. Arid Land Geography, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.X.20220818.1615.003.html>.
- 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.
- PAN Jinghu, WEN Yan. Estimation and spatial-temporal characteristics of carbon sink in the arid region of northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7718–7728.
- 彭文甫, 周介铭, 徐新良, 等. 基于土地利用变化的四川省碳排放与碳足迹效应及时空格局[J]. 生态学报, 2016, 37(22): 7244–31.
- PENG Wenfu, ZHOU Jieming, XU Xinliang, et al. Change of land use changes on the temporal and spatial patterns of carbon emissions and carbon footprints in the Sichuan Province of Western China from 1990 to 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 37(22): 7244–31.
- 王国强, 李婷, 陈隽璐, 等. 中国西北地区超基性岩封存 CO<sub>2</sub> 潜力研究[J]. 西北地质, 2023, 56(1): 186–193.
- WANG Guoqiang, LI Ting, CHEN Junlu, et al. Assessment of Carbon Dioxide Sequestration Potential of Ultramafic Rocks in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(1): 186–193.
- 王志强, 李雪薇. 新疆土地利用类型转变的碳强度变化规律分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(5): 165–203.
- WANG Zhiqiang, LI Xuewei. Analysis on the change rule of carbon intensity in the transformation of land use types in Xinjiang[J]. China Agricultural Machinery Chemistry Journal, 2022, 43(5): 165–203.
- 魏媛, 简小玉. 基于碳达峰中和的贵州省土地利用碳排放演变及预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(4): 108–114.
- WEI Yuan, JIAN Xiaoyu. Research Evolution of Carbon Emissions from Land Use in Guizhou Province Based on Carbon Peak and

- Carbon Neutrality and the According Predictions[J]. Ecological economy, 2022, 38(4): 108–114.
- 谢立军, 白中科, 杨博宇, 等. 碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J]. 地学前缘, 2023, 30(02): 447–462.
- XIE Lijun, BAI Zhongke, YANG Boyu, et al. Research progress on carbon sink assessment methods of terrestrial ecosystems at home and abroad under the background of carbon neutrality[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(02): 447–462.
- 徐丽萍, 李彭辉, 李忠勤, 等. 新疆山地冰川变化及影响研究进展[J]. 水科学进展, 2020, 31(6): 946–959.
- XU Liping, LI Penghui, LI Zhongqin, et al. Advances in research on changes and effects of glaciers in Xinjiang mountains[J]. Advances in water science, 2020, 31(6): 946–959.
- 徐友宁, 张江华, 何芳, 等. 西北地区矿山地质环境调查与防治研究[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 129–139.
- XU Youning, ZHANG Jianghua, HE Fang, et al. Investigation and Preventive Research of Mine Geological Environment in Northwest China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 129–139.
- 严慈, 侯兰功. 基于灰色理论的陕西省土地利用变化及其碳排放研究[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(1): 25–31.
- YAN Ci, HOU Langong. Study on land use change and carbon emission in Shaanxi Province based on grey theory[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(1): 25–31.
- 杨静媛, 张明, 多玲花, 等. 江西省土地利用碳排放空间格局及碳平衡分区[J]. 环境科学研究, 2022, 35(10): 2312–2321.
- YANG Jingyuan, ZHANG Ming, DUO Linghua, et al. Spatial Pattern of Land Use Carbon Emissions and Carbon Balance Zoning in Jiangxi Province[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(10): 2312–2321.
- 杨文学, 张小平. 甘肃省土地利用碳排放变化及影响因素分解[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(33): 49–53.
- YANG Wenxue, ZHANG Xiaoping. Carbon emissions effect of Land-Use and influencing factors decomposition emiddion in Gansu Province[J]. Journal of Anhui Agri, 2016, 44(33): 49–53.
- 张国, 逯非, 赵红, 等. 我国农作物秸秆资源化利用现状及农户对秸秆还田的认知态度[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 981–988.
- ZHANG Guo, LU Fei, ZHAO Hong, et al. Residue usage farmers' recognition and attitude toward residue retention in China's croplands[J]. Journal of Agro- Environmental Science, 2017, 36(5): 981–988.
- 张赫, 彭千芮, 王睿, 等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8988–8998.
- ZHANG He, PENG Qianrui, WANG Rui, et al. Spatiotemporal patterns and factors influencing county carbon sinks in china[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 8988–8998.
- 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21–31.
- ZHANG Jie, CHEN Hai, LIU Di, et al. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(1): 21–31.