

于静,武文硕,付铭,等.科尔沁沙地植被覆盖度时空变化及成因[J].中国沙漠,2026,46(4):160–174.

科尔沁沙地植被覆盖度时空变化及成因

于 静¹,武文硕¹,付 铭²,高亚敏^{1,3}

(1.通辽市气象局,内蒙古 通辽 028000; 2.赤峰市气象局,内蒙古 赤峰 024000; 3.中国气象局兰州干旱气象研究所 中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,甘肃 兰州 730020)

摘要:作为中国防沙治沙的主战场,科尔沁沙地植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)的变化是评估区域生态治理成效的关键指标。本研究基于Google Earth Engine(GEE)平台,反演2000—2023年生长季FVC长时序数据集,综合运用Sen-MK趋势分析、变异指数、Hurst指数等方法,系统揭示FVC的时空演变、稳定性及未来趋势,进而通过偏相关分析、土地利用转移矩阵和冗余分析(RDA),定量辨析气候与人类活动的驱动作用。结果表明:(1)时间尺度,生长季FVC呈上升趋势,年均增长率为0.43%,等级结构显著优化,极高覆盖度占比从17.45%跃升至49.78%;空间尺度,FVC呈现高覆盖度广布、低覆盖度斑块交错格局,无显著方向性分异。(2)FVC稳定变化区域占比为47.89%,不稳定变化区域占比为44.13%,后者多呈斑块状分布于科尔沁沙地西部;Hurst指数显示,90.13%的区域未来变化与过去一致,其中63.28%的区域持续性极强($H>0.7$),预示改善趋势将长期维持。(3)降水是主导气候因子,与FVC呈正相关的区域占74.05%(显著正相关占12.46%, $P<0.05$);人类活动呈双向驱动,其中裸地→草地/林地转化带来了显著的生态正向收益,而耕地→建设用地及草地→裸地转化则对局部植被生长有负向效应。冗余分析定量揭示人类活动是影响科尔沁沙地植被空间格局的核心驱动力,其对格局变化的解释贡献度达67.44%。本研究可为科尔沁沙地生态治理与干旱半干旱区植被动态监测提供科学依据与方法参考。

关键词: 科尔沁沙地; 植被覆盖度; 时空变化; 成因

文章编号: 1000-694X(2026)04-160-15

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00016

中图分类号: Q948.156

文献标志码: A

0 引言

植被作为陆地生态系统的核心组成部分,在维持生态平衡、调节气候、保障生态安全等方面发挥着不可替代的作用^[1-3],政府间气候变化专门委员会(IPCC)的多份报告也持续强调植被在全球碳循环与气候反馈机制中的关键地位,这从全球尺度印证了深入开展植被动态监测研究的紧迫性与重要性^[4]。近年来,在“三北”防护林、退耕还林还草等国家重大生态工程的持续推动下,科尔沁沙地植被状况已呈现显著改善趋势^[5-8]。但受到沙质地表特性、水热条件时空异质性及人类活动强度差异的影响,植被覆盖度的时空演变规律及其驱动机制仍存在复杂的不确定性,准确揭示其变化特征并量化驱动成因已成为制定精准、适应性生态管理策略的迫切

需求^[9]。

遥感技术因其大范围、长时序的监测能力,已成为植被动态研究的主要手段。针对科尔沁沙地,学者基于多源遥感数据(如SPOT NDVI^[10]、MODIS NDVI^[7,11-12]或GIMMS NDVI^[13])开展了系统研究,初步揭示了该区域植被覆盖度自20世纪80年代以来总体呈波动上升趋势,并明确了降水为主导气候驱动因子,生态工程为关键人为推动力的宏观认识^[14-20]。然而,随着研究深入,现有研究在方法精度与机制解析深度上面临挑战。在数据层面,广泛使用的归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)在高植被覆盖区存在饱和效应,在低植被区缺乏敏感性,可能影响变化趋势评估的准确性^[21]。新兴的核归一化植被指数(ker-

收稿日期:2025-11-14; 改回日期:2026-03-03

资助项目:内蒙古自治区气象局科技创新项目(nmqxkjcx202414);干旱气象科学研究基金项目(IAM202310);中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室开放基金项目(ECSS-CMA202411);内蒙古自治区自然科学基金面上项目(2025MS03094)

作者简介:于静(1991—),女,内蒙古通辽市人,工程师,主要从事气候变化、陆表蒸散以及干旱监测研究。E-mail: yjharhope@163.com

通信作者:高亚敏(E-mail: gaoyaminok@163.com)

nel Normalized Difference Vegetation Index, $kNDVI$) 通过引入核函数能有效解决以上问题,该指数已在黄土高原、西北荒漠区等生态脆弱区的植被恢复评估、驱动因子解析中证明其优异适用性^[22-28],但将其系统应用于科尔沁沙地植被覆盖度长时序反演的研究尚显不足。在驱动机制层面,尽管研究普遍认识到气候与人类活动的双重影响^[8],但对于二者的精量化,特别是土地利用变化作为人类活动直接载体的定量驱动机制的探讨仍较为薄弱^[29]。现有研究多限于将人类活动视为整体或通过残差法估算,未能有效量化耕地扩张、林地转化、建筑用地占用等具体土地利用转换过程对植被覆盖变化的贡献。此外,基于 Google Earth Engine(GEE)平台的遥感数据处理技术,凭借其高效的大数据处理能力和丰富的数据源支持,已成为区域植被动态监测的重要手段。

科尔沁沙地地处中国北方农牧交错带,是典型的生态脆弱区和气候变化敏感区,曾是中国北方沙尘暴的主要策源地之一^[30-31]。鉴于其植被动态直接关系到东北、华北地区的生态安全^[32-33],对该区域的植被覆盖度进行深入研究具有重要意义。本研究基于 Google Earth Engine(GEE)平台,提取 2000—2023 年科尔沁沙地生长季 $kNDVI$ 数据,实现科尔沁沙地植被覆盖度的高精度反演,并运用趋势分析等方法系统揭示其时空演变格局。在此基础上,本研究引入冗余分析方法量化各驱动因子及其组合对

植被变化总方差的独立解释贡献,定量辨识降水、温度等自然因子与人类活动对植被变化的驱动作用,以期为该区域生态保护修复、土地沙化防治与可持续管理提供科学依据,并为干旱半干旱区植被动态监测研究提供方法借鉴。

1 材料与方法

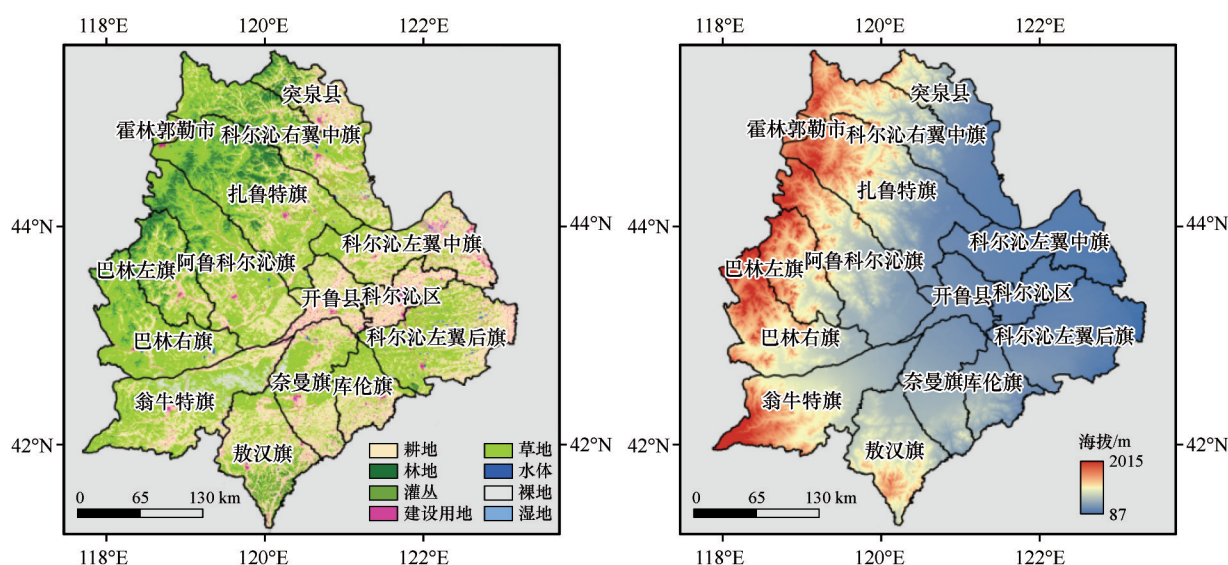
1.1 研究区概况

科尔沁沙地横跨内蒙古、吉林、辽宁三省区,主要涵盖内蒙古通辽市、赤峰市和兴安盟部分旗县,吉林省白城市、双辽市以及辽宁省彰武县,本文以内蒙古境内的 15 个旗县为研究区(图 1),行政区域总面积约 13.02 万 km^2 。该区域地处松辽平原西侧、大兴安岭东麓,是内蒙古高原向东北平原过渡区,西辽河水系贯穿其中,地貌坳甸相间,沙层覆盖广泛^[34]。该区域属温带大陆性季风气候向温带干旱气候的过渡带,四季分明、雨热同期。2000—2023 年多年平均气温约 $6.2\text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降水量为 384.3 mm,且降水多集中在 6—8 月,约占全年总量的 80%。

1.2 数据与方法

1.2.1 $kNDVI$ 计算

本研究采用 MOD09GA 数据集^[35]红光和近红外两个波段计算 $NDVI$,进而计算 $kNDVI$,MOD09GA 数据集是 500 m 分辨率日尺度地表反射率产品,涵



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区示意图

Fig.1 Location of the study area

盖可见光至短波红外(0.62~2.10 μm)的7个波段,其中第3至7波段适用于植被指数计算、土地覆盖分类及生物参数反演。基于GEE平台得到2000—2023年科尔沁沙地生长季 $kNDVI$ 数据集。

核归一化植被指数($kNDVI$)由Camps-Valls等^[36]提出,其运用核方法理论的机器学习方法,通过先进的非线性数据分析技术优化 $NDVI$ 的应用,提升了植被监测的精度和效率,在干旱半干旱生态系统中,该指数的核心优势在于其对低生物量植被具有更强的敏感性^[37],有效提升了对植被生物量积累信息的捕捉能力与抗噪声的鲁棒性^[24-25],从而为植被动态精准监测提供了更优技术路径。其计算公式为:

$$kNDVI = \tan h(NDVI)^2 \quad (1)$$

式中: $\tan h$ 为双曲正切函数; $NDVI$ 为归一化植被指数。

1.2.2 像元二分法

基于 $kNDVI$,利用像元二分法计算科尔沁沙地植被覆盖度,其计算公式为:

$$FVC = \frac{kNDVI - kNDVI_s}{kNDVI_v - kNDVI_s} \quad (2)$$

式中: $kNDVI_s$ 表示无植被(裸土) $kNDVI$ 值,取 $kNDVI$ 的5%分位值; $kNDVI_v$ 纯植被覆盖区 $kNDVI$ 值,取 $kNDVI$ 的95%分位值; $FVC(\%)$ 表示植被覆盖度,研究中将其分为5个等级:极低覆盖度($FVC < 20\%$)、低覆盖度($20\% \leq FVC < 40\%$)、中覆盖度($40\% \leq FVC < 60\%$)、高覆盖度($60\% \leq FVC < 80\%$)和极高覆盖度($FVC \geq 80\%$)^[14]。

1.2.3 趋势与突变分析

为量化 FVC 的长期变化趋势并检验其显著性,本研究采用Theil-Sen Median趋势分析法与Mann-Kendall(MK)非参数统计检验相结合的方法。Theil-Sen Median方法能稳健地估计趋势斜率,对数据误差和异常值不敏感,且计算效率高,非常适合长时序数据分析。在此基础上,利用Mann-Kendall检验对计算出的趋势进行显著性判断($P < 0.05$),以识别 FVC 变化中具有统计学意义的区域。计算公式为:

$$Sen_x = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right) \quad (3)$$

式中: Sen_x 为 FVC 的变化趋势; i, j 为 FVC 的时间序号($2000 \leq i < j \leq 2023$); X_i, X_j 分别表示 i, j 对应的 FVC

值。 $Sen_x > 0$ 表明呈上升趋势, $Sen_x < 0$ 为下降趋势。

Mann-Kendall(MK)检验由式(4)~(7)组成:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (4)$$

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1, & X_j - X_i > 0 \\ 0, & X_j - X_i = 0 \\ -1, & X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \quad (6)$$

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

式中: S 为检验统计量; $\text{sgn}()$ 为符号函数; Z 为标准化的检验统计量; $Var(S)$ 为方差; n 为序列个数。在给定显著性水平下, $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时,认为趋势显著。设定了显著性水平 $\alpha=0.05$,给定临界值 $Z_{1-\alpha/2}=\pm 1.96$,研究中进一步将 Z 绝对值分别设置为1.96和2.58,表示趋势分别通过了可信度为95%和99%的显著性检验。 FVC 趋势显著性判断方法见表1。

表1 Mann-Kendall检验趋势分类

Table 1 Mann-Kendall test trend categories

Sen_x	$ Z $	变化趋势
$Sen_x > 0$	$ Z > 2.58$	极显著上升
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著上升
	$ Z \leq 1.96$	不显著上升
$Sen_x = 0$	$ Z $	无变化
$Sen_x < 0$	$ Z > 2.58$	极显著下降
	$1.96 < Z \leq 2.58$	显著下降
	$ Z \leq 1.96$	不显著下降

1.2.4 稳定性分析

为评估 FVC 年际波动的剧烈程度,即其时间序列上的稳定性,本研究采用变异系数作为评估指标。其计算公式如下:

$$CV_x = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

式中: CV_x 为变异系数; $\bar{x}$ 表示2000—2023年 FVC 多年平均值; n 表示研究时段总年数($n=24$); i 为年份

序号($i=1, 2, \dots, 24$, 分别对应 2000—2023 年); x_i 表示第 i 年的 FVC 值。通常认为, 变异系数大值区, 受自然或人类活动影响更明显。为更直观反映科尔沁沙地 FVC 的稳定性, 将 CV_x 值分为 4 个级别: 非常稳定 ($CV_x \leq 0.1$)、稳定 ($0.1 < CV_x \leq 0.2$)、不稳定 ($0.2 < CV_x \leq 0.3$) 和很不稳定 ($CV_x > 0.3$)^[5]。

1.2.5 相关性分析

相关性分析中使用的气温、降水及潜在蒸散发数据源自国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn>)^[38-40], 提取生长季数据与同期 FVC 像元进行匹配, 利用 Pearson 相关系数分别计算 FVC 与降水(x)、温度(y)、潜在蒸散量(z)的相关系数, 进而分析气象因子对 FVC 的响应机制, 其中代表公式如下, 其余类同^[41]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

式中: R_{xy} 表示变量 x 、 y 的线性相关系数; x_i 与 y_i 分别是 x 、 y 影响因子在第 i 年的值 (i 为 2000、2001 年…2023 年); $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 表示 n 年的均值。

在多元分析中, 偏相关分析在研究两个变量之间的相关性时, 能够控制其他变量的影响。因此, 采用偏相关系数来量化 FVC 与各影响因素之间的关系。假设存在 3 个变量 X_x 、 X_y 和 X_z , 控制 X_z 的影响后, X_x 与 X_y 之间的偏相关系数计算为:

$$R_{xy.z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}} \quad (10)$$

式中: R_{xy} 、 R_{xz} 、 R_{yz} 分别代表 X_x 与 X_y 、 X_y 与 X_z 、 X_x 与 X_z 的 Pearson 相关系数。

1.2.6 Hurst 指数

为直观量化不同地区 FVC 的未来变化趋势, 本研究利用重标极差 (R/S) 来计算 Hurst 指数, 分析科尔沁沙地 FVC 变化趋势的未来持续性, 其基本原理是假定一个 FVC 时间序列

FVC_t , 对于任意正整数 τ , 定义以下内容:

均值序列:

$$\overline{FVC}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} FVC_i \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

累积离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{j=1}^t (FVC_j - \overline{FVC}_\tau) \quad (12)$$

极差:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (13)$$

标准差:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^{\tau} (FVC_j - \overline{FVC}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$R(\tau)/S(\tau) = \left(\frac{\tau}{2} \right)^H \quad (15)$$

式中: H 称为 Hurst 指数, 值域为 0 到 1; t 的值域为 1 到 τ 。 H 值分 3 种情形: 当 $0.5 < H < 1$ 时为持续性, 表示 FVC 未来变化趋势与目前相同; 当 $H=0.5$ 时为随机性, 表示目前变化对未来趋势无影响; 当 $0 < H < 0.5$ 时为反持续性, 表示 FVC 未来趋势与目前变化相反^[42]。

1.2.7 土地利用转移矩阵

土地利用数据源自 Yang 等^[43] 发布的中国年度土地覆盖数据集 CLCD (annual China Land Cover Dataset), 原数据包含 9 类用地类型, 文中根据实际未保留冰雪, 见图 1。土地利用转移矩阵是分析不同时期土地利用类型转化关系的核心工具, 主要用来描述土地利用结构的变化及其变化方向。公式如下:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: A_{ij} 表示研究期结束时 i 类土地利用类型转化为 j 类土地利用类型的面积; n 表示土地利用类型的数量; i 和 j 分别表示研究期开始和结束时的土地利用类型。

1.2.8 生态贡献量

为量化人类活动对植被覆盖度的影响强度, 研究中以多期土地利用转移矩阵为基础, 通过匹配逐像元 FVC 变化, 构建生态贡献量指标, 揭示不同转移类型对植被覆盖度改善或退化的实际效应^[44], 计算公式为:

$$EC = A \times \overline{\Delta FVC} / 100 \quad (17)$$

式中: EC 为生态贡献量 (km^2); A 为土地利用转移类型的累计转移面积 (km^2); 平均 ΔFVC 为该转移类型对应像元的植被覆盖度变化量均值 (%), 即后期 FVC 与前期 FVC 的差值均值, 计算中通过平均 $\Delta FVC/100$, 将其转换为无量纲变化系数。该指标正

负值分别对应正向/负向生态效应,数值绝对值反映影响强度。

1.2.9 冗余分析

为量化气温、降水、潜在蒸散量和土地利用类型等环境因子对科尔沁沙地植被覆盖度空间格局的影响。本文采用冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)方法,RDA方法是一种适用于整合连续型与分类型解释变量的约束性排序技术,其通过多元线性回归将响应变量(植被覆盖度)投影到解释变量(环境因子)定义的约束空间,再对投影结果进行主

成分分析,从而提取表征环境梯度主要变异方向的约束轴^[45]。具体公式如下:

$$Y = XB + E \quad (18)$$

式中: Y 表示响应变量矩阵,即植被覆盖度(FVC); X 表示解释变量矩阵,分别是气温、降水、潜在蒸散量及土地利用类型; B 表示回归系数矩阵; E 表示残差矩阵。

本研究所用数据详细信息见表2,为保证空间一致性,将所有数据重采样统一为500 m,投影坐标系为Albers_Conic_Equal_Area。

表2 数据来源
Table 2 Data source

数据产品	空间分辨率	时间	数据网址
中国1 km分辨率逐月平均气温数据集	1 km	2000—2023年	https://www.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/71ab4677-b66c-4fd1-a004-b2a541c4d5bf
中国1 km分辨率逐月降水量数据集	1 km	2000—2023年	https://www.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/faae7605-a0f2-4d18-b28f-5ccee413766a2
中国1 km逐月潜在蒸散发数据集	1 km	2000—2023年	https://www.tpdac.ac.cn/zh-hans/data/8b11da09-1a40-4014-bd3d-2b86e6dccc44
植被数据	500 m	2000—2023年	https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD09GA.061
中国年度土地覆盖数据集 CLCD	30 m	2000、2005、2010、 2015、2020、2023年	http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809

1.3 NDVI与kNDVI对比分析

探究NDVI与kNDVI对科尔沁沙地植被变化的响应差异,研究中选取2023年生长季4—9月kNDVI数据,结合同期土地利用数据与NDVI做对比分析,结果表明,二者均值呈现先升后降的一致变化趋势,但kNDVI在数值分布上呈现出更显著的梯度扩展效应,对于低生物量植被敏感性更高。在裸地、草地、林地等植被类型中,kNDVI均值呈现清晰梯度(裸地0.032、草地0.057、林地0.081),而NDVI均值集中在0.18~0.28,区分度更低。尤为关键的是,kNDVI的变异系数(0.23~0.50)显著地高于NDVI的变异系数(0.12~0.33),这一特征在箱线图中得到直观验证(图2):kNDVI对裸地、草地与林地的箱体分离度明显更高,而NDVI在该区间箱体重叠。在像元尺度上,kNDVI值的相对离散程度更大,这反映了其能够更清晰、更稳定地揭示微弱地表植被变化梯度。

2 结果与分析

2.1 FVC时空变化特征

2000—2023年,科尔沁沙地生长季FVC呈上升趋势,年均增长率为0.43%。植被覆盖等级结构显著优化:中、低覆盖度面积大幅减少,而高、极高覆盖度面积显著增加;极高覆盖度区域的面积占比从2000年的17.45%提升至2023年的49.78%,成为占比最高的等级,标志着该区域植被覆盖率整体得到提升(表3)。

空间上,2000—2023年研究区FVC年变化率为-0.09%~0.86%(图3A),呈改善趋势的面积占63.35%;Mann-Kendall趋势检验结果进一步表明:呈极显著上升和显著上升的面积分别占9.91%、10.11%,集中分布在突泉县中南部、科左中旗大部、开鲁县北部、阿鲁科尔沁旗南部、敖汉旗中南部及翁牛特旗西部;显著与极显著下降区域占比3.12%,主要分布在库伦旗中部;其余超六成区域呈不显著变化,分布范围最广(图3B)。

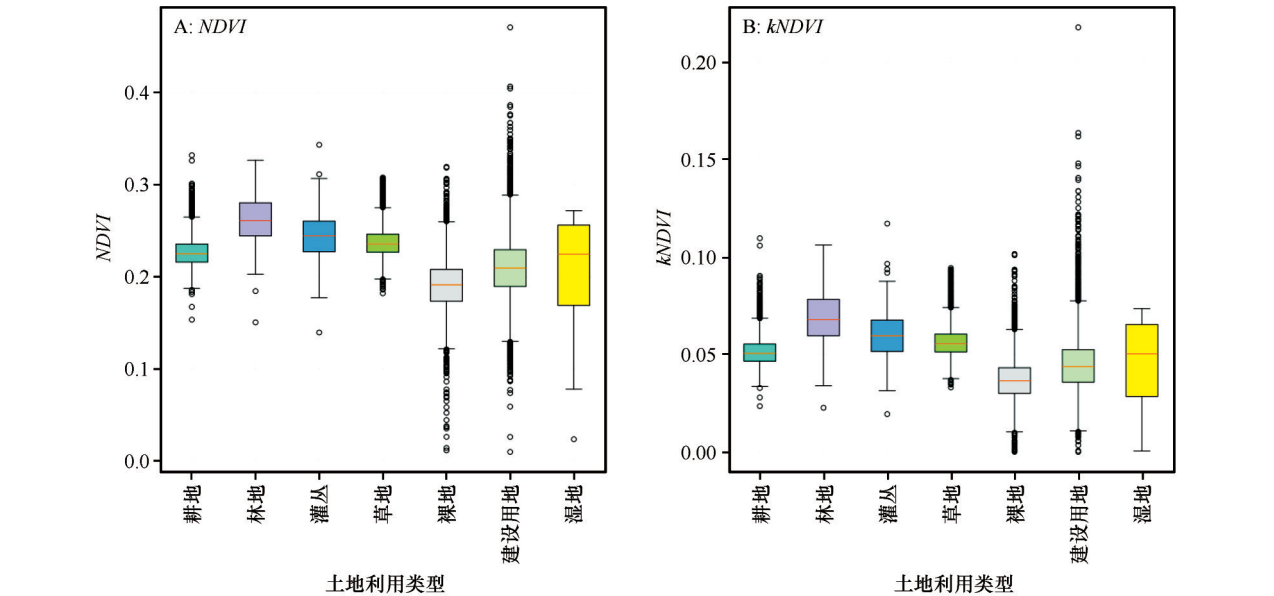


图2 NDVI与kNDVI箱线图
Fig.2 Box plot of NDVI and kNDVI

表 3 2000—2023 年科尔沁沙地 FVC 动态变化

Table 3 Dynamic changes in FVC of the Horqin Sand Land from 2000 to 2023

FVC 等级	2000 年		2023 年		2000—2023 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积变化/km ²	占比变化/%
极低覆盖度	1 642	1.30	537	0.40	−1 105	−0.90
低覆盖度	20 751	16.50	5 603	4.40	−15 149	−12.10
中覆盖度	46 253	36.77	19 472	15.48	−26 781	−21.29
高覆盖度	35 193	27.98	37 660	29.94	2 467	1.96
极高覆盖度	21 952	17.45	62 625	49.78	40 673	32.33

2.2 FVC 空间分布及稳定性

科尔沁沙地 FVC 空间上呈现高覆盖度广布、低覆盖度斑块交错格局,无显著方向性分异(图 4A)。2000—2023 年科尔沁沙地多年平均植被覆盖度为 67%,总体以高覆盖度为主,占区域总面积的 44.79%;极高覆盖度占区域总面积 21.55%。从旗县尺度看,空间异质性明显,科尔沁区高植被覆盖区占比最高(71.61%),开鲁县次之(59.59%)。

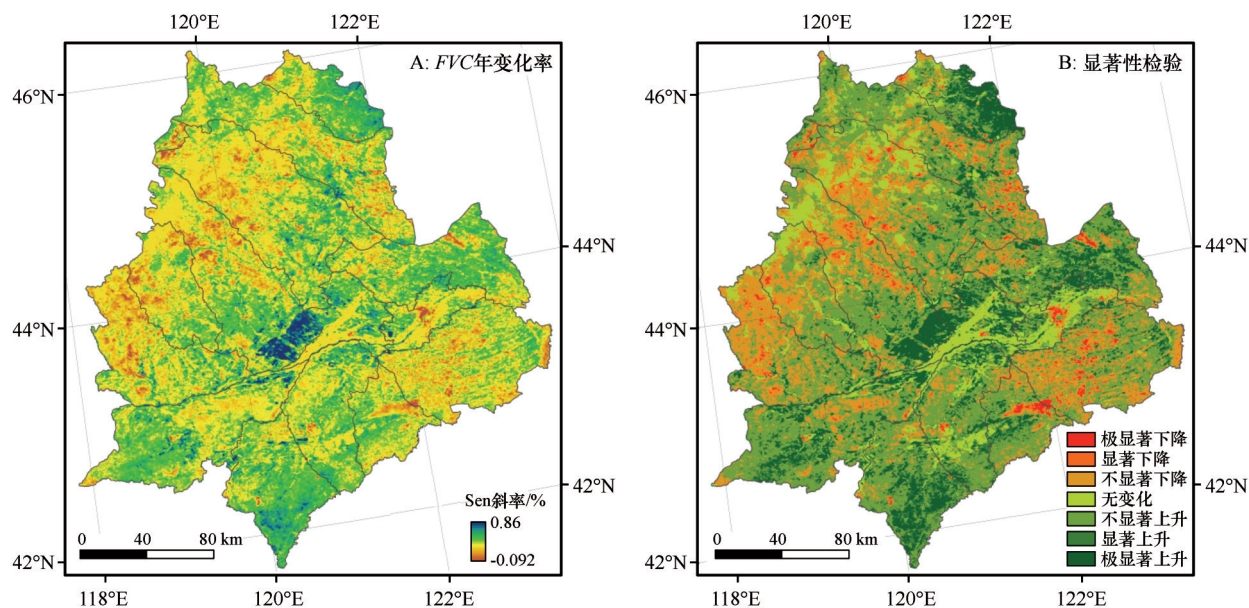
利用变异系数评估科尔沁沙地 FVC 的年际波动程度(图 4B),稳定与非常稳定区域占比 51.67%,集中连片式分布于科尔沁沙地东北部和东南部,行政区划上对应通辽市和兴安盟大部;不稳定及很不稳定区域占比 47.91%,以赤峰市境内各旗县为主,其中很不稳定区域空间上多呈斑块状,分布于科尔沁沙地西北部。

2.3 FVC 未来变化趋势

分析科尔沁沙地植被覆盖度的 Hurst 指数空间分布(图 5)可知,Hurst 指数平均值为 0.74。其中,Hurst 指数低于 0.5 的区域面积较小,约占总面积的 9.87%,表明呈反持续变化特征的区域较小;而 Hurst 指数高于 0.5 的区域占比 90.13%,且大于 0.7 的区域占总面积的 63.28%,说明 60% 以上区域植被覆盖度变化具有较强的持续性。近 24 年科尔沁沙地植被覆盖度持续向好的变化趋势,说明研究区未来具有持续性提升特征。

2.4 土地利用转移对植被覆盖度的生态贡献

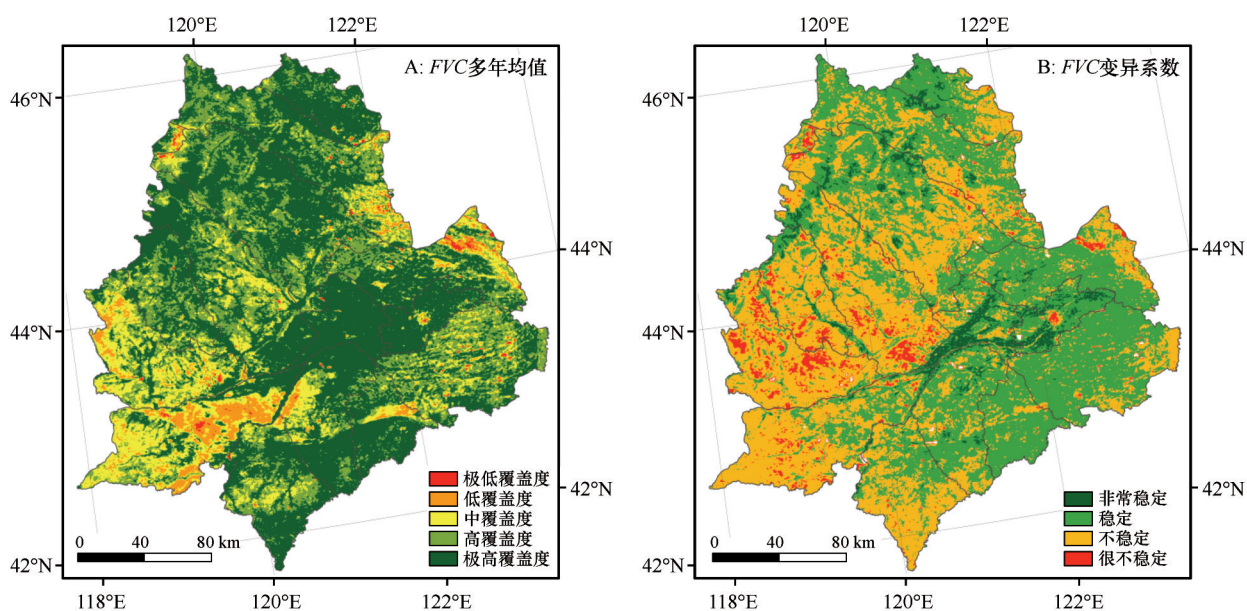
2000—2023 年科尔沁沙地核心地类转移呈现明显的阶段性特征(表 4)。其中林地呈长期、稳定的净增长,林地→林地转移面积从 2000—2005 年的 7 302 km²增至 2020—2023 年的 8 200 km²,连续 5 个



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图3 2000—2023年FVC年变化率空间分布及显著性检验

Fig.3 Trend slope of FVC change spatial distribution and significance test from 2000 to 2023



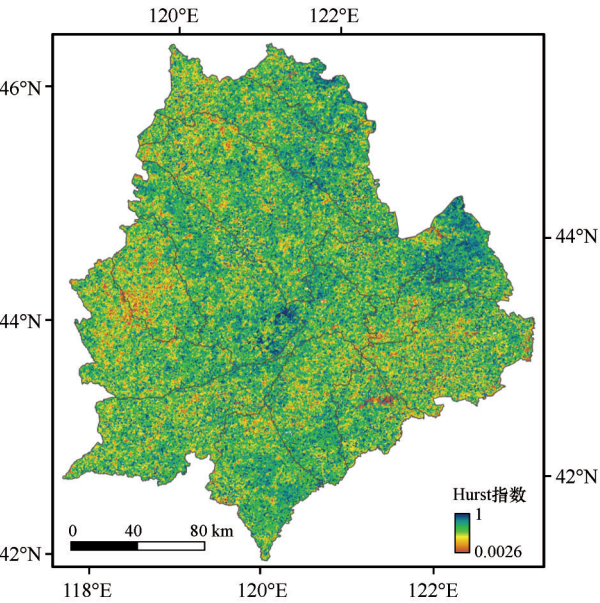
注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图4 科尔沁沙地FVC多年均值及变异系数分布

Fig.4 The distribution of the annual mean and the coefficient of variation of FVC

时段递增。建设用地扩张来源发生阶段性转变,2015年前主要依赖耕地转入,其中2010—2015年耕地→建设用地达161 km²;裸地转移则直接反映生态修复成效,裸地→草地转移在2000—2005年达峰值,为1 817 km²,但2005—2010年短暂回落,2010年以后逐步回升,累计转移3 032 km²,占裸地总转出面积的70%以上,表明草地恢复是植被覆盖度改善的重要措施。

2000—2023年科尔沁沙地的生态贡献呈现改善-退化-提升3个阶段(表5和表6):2000—2005年为初始改善期,净生态贡献达43 270 km²,此阶段改善主要受大规模裸地→草地驱动,转移面积达1 817 km²,平均 ΔFVC 提升25%;2005—2010年为短暂退化期,净生态贡献为-6 450 km²,是唯一负贡献时段,此阶段耕地→建设用地及草地→裸地转化对局部植被生长有负向贡献;2010—2023年为持续提



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号
标准地图制作，底图边界无修改
图 5 Hurst 指数空间分布

Fig.5 Spatial distribution of the Hurst index

升期,净生态贡献由 23 801 km²增至 62 951 km²,正向贡献占比从 60.3%跃升至 75.8%。

核心转移类型累计生态贡献定量揭示了植被改善与退化的主导路径(表 6)。其中,植被覆盖度改善的主导路径是裸地→草地和裸地→林地的转移,两者累计正向贡献占比 82.9%;而其退化则主要受耕地→建设用地、草地→裸地的转移影响,其中

耕地→建设用地占总负向贡献的 74.6%。

3 讨论

3.1 气象因素的影响

气象条件是影响植被覆盖度变化的关键自然因子,Pearson 相关分析表明,*FVC*与降水的相关系数均值为 0.16,高于气温(0.13)与潜在蒸散(0.08),说明水分条件是制约区域植被生长的首要气象因素。这一结论与崔珍珍等^[13]在科尔沁沙地的研究结果一致,证实了降水在干旱半干旱生态系统中的关键作用。利用偏相关分析进一步控制气温与潜在蒸散的干扰后,降水与*FVC*呈正相关的区域仍占 74.05%(图 6B),其中显著正相关比例达 12.46%($P<0.05$),显著高于气温的 6.51%与潜在蒸散的 3.40%。空间上,降水与*FVC*呈正相关区域集中分布于科左中旗东部、阿鲁科尔沁旗南部、科右中旗及突泉县等中部与北部区域,这与区域降水梯度相符^[8]。在半干旱区,降水量直接影响土壤水分有效性,进而影响植物生长与生物量积累^[46]。偏相关分析显示,气温与*FVC*呈正相关的区域占 66.16%(图 6A),显著正相关区集中于奈曼旗、库伦旗等南部地区。该区域热量条件相对较好,生长季温度升高可促进光合作用、延长生长期,对植被生长表现为增益效应,与朱远忠等^[47]关于科尔沁沙质草地高温促进群落生长的研究结论吻合。然而,在科尔沁沙地北部,

表 4 2000—2023 年科尔沁沙地核心地类多期土地利用类型转移矩阵(单位:km²)

Table 4 Multi-period land use transition matrix of core land categories from 2000 to 2023 in Horqin Sandy Land (unit:km²)

前期类型	后期类型	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2020—2023 年	2000—2023 年
耕地	耕地	40 826	40 165	42 595	43 344	44 427	38 004
	建设用地	107	151	161	126	170	807
	草地	8 293	5 870	3 766	6 607	1 536	10 087
	林地	25	26	65	44	126	170
林地	林地	7 302	7 668	7 785	7 990	8 200	7 191
	耕地	56	30	42	51	36	94
	灌丛	0	0	0	0	10	9
建设用地	建设用地	2 179	2 360	2 735	3 173	3 424	2 168
	耕地	0	0	0	0	11	2
裸地	草地	1 817	496	874	816	933	3 032
	裸地	3 770	3 598	3 757	3 422	3 039	2 238

注：核心地类含耕地、林地、建设用地、裸地；因存在多阶转移，总时段面积≠各相邻时段面积之和。

表 5 2000—2023 年科尔沁沙地多时段植被覆盖度生态贡献统计

Table 5 Ecological contribution of vegetation cover in Horqin Sandy Land in different periods from 2000 to 2023

时间	正向贡献总和/km ²	负向贡献总和/km ²	净生态贡献/km ²	正向贡献占比/%
2000—2005 年	85 621	-42 350	43 270	66.8
2005—2010 年	52 311	-58 761	-6 450	47.0
2010—2015 年	68 920	-45 121	23 801	60.3
2015—2020 年	75 641	-38 250	37 391	66.5
2020—2023 年	92 581	-29 630	62 951	75.8

表 6 科尔沁沙地核心转移类型累计生态贡献

Table 6 Cumulative ecological contribution of core transfer types in Horqin Sandy Land

转移类型	累计转移面积/km ²	平均 ΔFVC /%	累计生态贡献/km ²	贡献占比/%
裸地→草地	3 032	+25.00	+75 811	56.1
裸地→林地	896	+40.50	+36 293	26.8
耕地→建设用地	807	-58.70	-47 362	74.6
草地→裸地	522	-30.20	-15 758	25.0

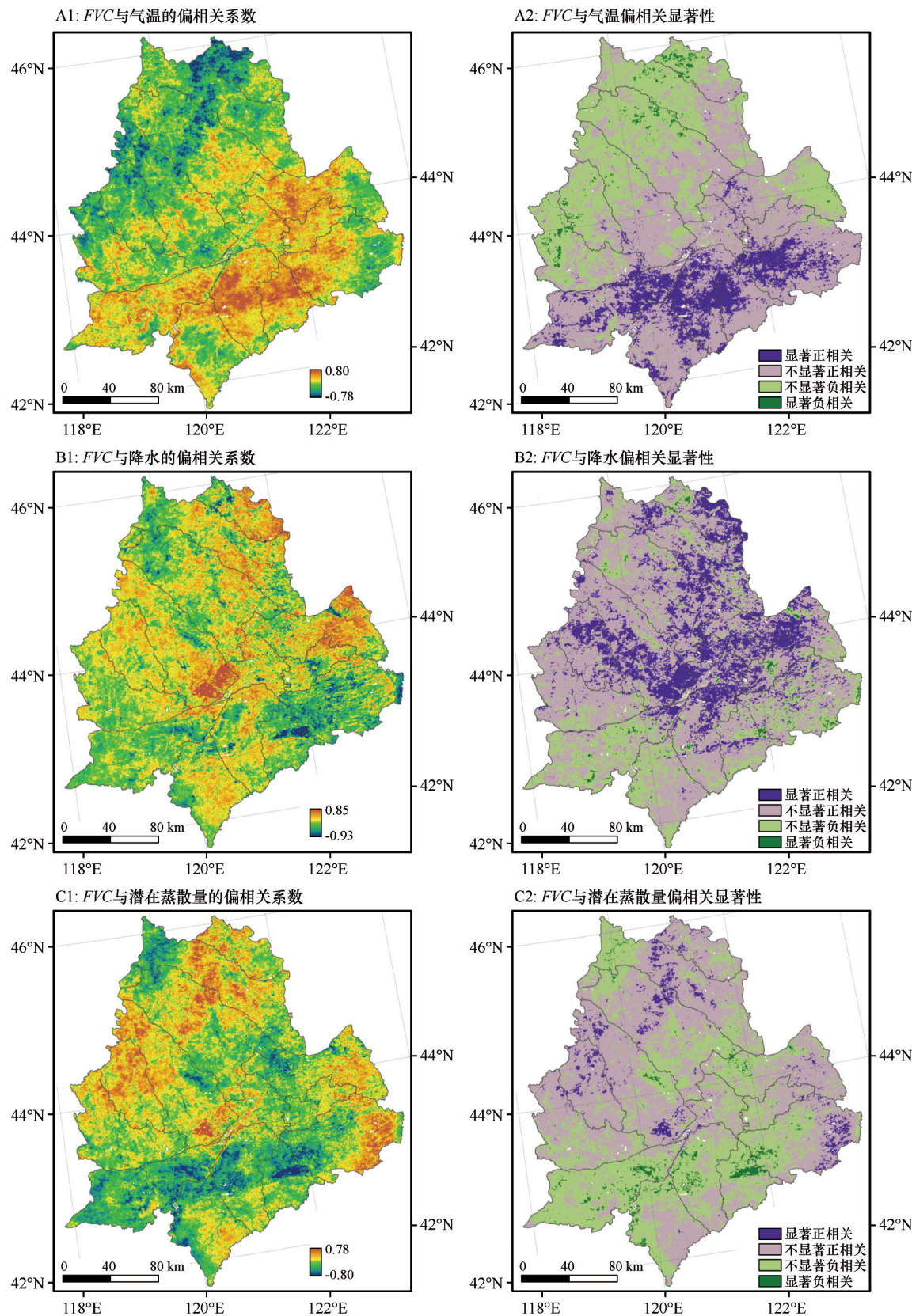
气温升高可能加剧蒸散耗水,加重水分胁迫,导致气温与 FVC 呈负相关,这种空间异质性反映了气温对植被生长作用的水热耦合特征,即在降水相对充足区域,温度升高有利于植被生长,而在水分受限区域,升温则可能抑制植被恢复^[8,46]。这表明单纯考虑温度变化而不结合水分条件是片面的。潜在蒸散与 FVC 的偏相关系数空间分异明显,正相关与负相关区域分别占 57.18% 与 42.82%(图 6C)。这种分异特征体现了水热配置关系对植被生长的综合影响,潜在蒸散反映了大气的蒸发需求和能量状况,其对植被的作用主要受水分供给影响^[48],具体表现为:从空间格局看,在水分相对充足的区域,较高的潜在蒸散意味着更充足的能量和太阳辐射,能够驱动更旺盛的植被光合作用与生长过程,因此两者呈现正相关。反之,在水分亏缺区域,较高的潜在蒸散主要加剧了大气对土壤水分的需求与蒸散耗水,从而加剧干旱胁迫,抑制植被生长,导致二者呈负相关^[5]。本研究识别出潜在蒸散显著正相关区与降水正相关区高度重叠,进一步说明了水分有效性是决定潜在蒸散作用方向的关键,即只有在水分不构成主要限制时,高潜在蒸散量所表征的高能量环境,才能转化为促进植被生长的正向作用^[49]。从季节性动态看,水热耦合机制同样显著。研究区生长季(4—9 月)内,前期(4—6 月)降水较少、气温回升快,潜在蒸散处于中高水平,此时土壤水分常为限制因子,其升高对植被返青和生长以抑制作用为

主;而中后期(7—8 月)进入降水集中期,土壤水分得到有效补充,此时较高的温度与潜在蒸散,恰好与充足的水分形成协同效应,共同推动植被快速生长,因此该时段 FVC 与潜在蒸散的正相关关系尤为显著。这种时空一致的规律性表明,潜在蒸散增加对植被的影响必须结合降水的时空变化协同评估,单一指标难以准确反映植被动态。

综上,尽管降水表现出最强的独立影响,但偏相关分析结果也显示,在控制其他因子后,气温与潜在蒸散仍对 FVC 具有显著解释力。这说明科尔沁沙地植被生长并非受单一气象因子控制,而是水、热、蒸散等多因子协同作用的结果。

3.2 人类活动的影响

人类活动通过土地利用转移直接作用于植被覆盖度变化,其双向驱动效应在时间上呈现阶段性波动,且在空间上分异明显。土地利用转移分析表明,裸地→草地与裸地→林地是植被覆盖度改善的核心路径,两者累计正向生态贡献占总正向贡献的 82.9%(表 6)。值得注意的是,本研究结果表明科尔沁沙地生态修复的阶段性特征(表 4):2000—2005 年以裸地→草地为主,转移面积 1 817 km²,反映早期修复以自然恢复或草地修复为主;而 2020—2023 年裸地→林地转移面积升至 126 km²,体现“三北”防护林等重点工程推动下,生态修复向林地建设增强演进^[50]。研究期内,耕地→建设用地转移累计导致



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作，底图边界无修改

图6 科尔沁沙地FVC与气温、降水、潜在蒸散的偏相关系数及其显著性

Fig.6 Partial correlation coefficients and their significance between temperature, precipitation, potential evapotranspiration and FVC

植被覆盖度退化占总负向贡献的74.6%,统计数据表明至2010年内蒙古城镇化率提高至55.5%,表明转移峰值期恰好处于城镇化加速期,存在建设用地侵占耕地的可能,且新建地表往往伴随极低的植被覆盖度,进而对局部FVC退化产生影响,这一发现与刘纪远等^[51]关于耕地减少与城乡建设用地侵占耕地资源的研究结论相符。值得关注的是,2015年后耕地→建设用地转移的负向贡献下降,这与耕地保护红线政策实施时序高度吻合,说明政策干预一定程度上能缓解城市化对植被覆盖度的冲击^[52]。这说明人类活动对FVC的影响并非单一影响,而是受政策调控与工程实施阶段性影响的复合结果,因此,科学调控人类活动类型与强度,促进生态修复与城市化协同,是提升区域植被覆盖度稳定性的关键路径。

3.3 气象因素与人类活动的综合作用

冗余分析(RDA)结果明确揭示了以土地利用

为核心的人类活动在科尔沁沙地植被覆盖度(FVC)空间格局形成中的主导性驱动作用(图7)。这与杨柳等^[19]认为影响科尔沁沙地植被覆盖度时空变化的主要驱动因子为土地利用类型相印证。其对第一显著约束轴(RDA1)的累计解释贡献度高达67.44%,远超气温、降水及潜在蒸散等气象因子贡献。其中,林地/草地的增加表现出最强的正向驱动效应(RDA1得分0.63,贡献度36.84%),而建设用地的扩张则是最主要的负向驱动因子(RDA1得分-0.58,贡献度30.6%)。这一结果与前文分析中裸地→林地/草地转移的正向贡献,以及耕地→建设用地转移的负向贡献高度一致。杜会石等^[53]研究也指出,科尔沁沙地景观格局演变过程中人类活动正负效应叠加的特征显著,干扰效应较为突出。在气象因子中,降水的独立贡献最为显著(RDA1得分0.36,贡献度11.86%),凸显水分是半干旱区植被生长的首要气象限制因子这一关键结论^[13]。

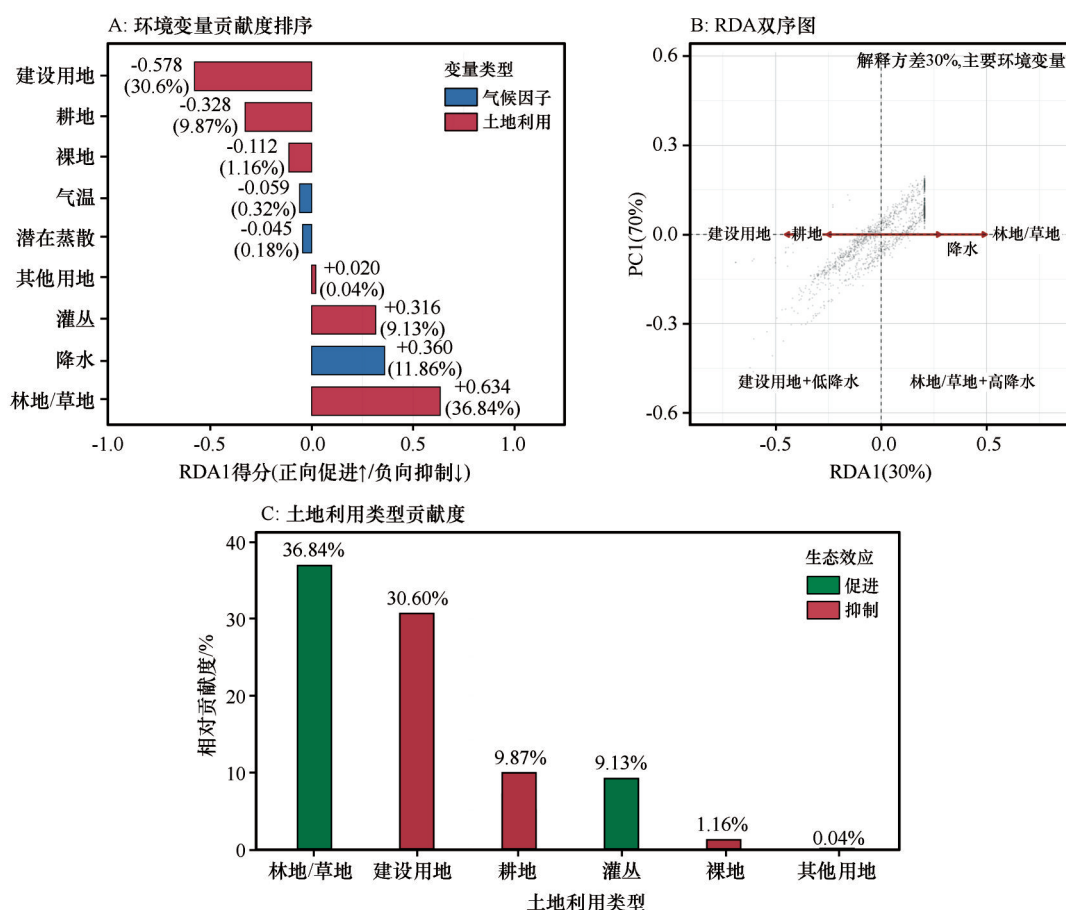


图7 科尔沁沙地植被覆盖度驱动因子冗余分析

Fig.7 Analysis results of redundancy of vegetation coverage drivers in Horqin Sandy Land

值得注意的是,RDA分析仅提取出一个显著约束轴(RDA1),这表明在科尔沁沙地,自然因子与人类活动并非独立作用于植被,而是共同嵌入一个自然-人工综合作用梯度中,协同影响植被覆盖度。在该类区域,气候变化与人类活动往往相互交织,其生态效应在统计上难以剥离,类似的研究在黄土高原其他生态脆弱区也观察到,气候与人为因子往往贡献于同一主导梯度^[54],进一步印证了本文结论。该梯度蕴含重要的生态管理启示:梯度正端,高自然植被覆盖(林地/草地)+高水分条件区域,应以生态工程提升为主,通过退耕还林还草、封育保护等工程,积极引导裸地向林地或草地转化,优化植被类型,提升生态效益。对于梯度负端,高人工地表覆盖(建设用地)+低水分条件区域,则应采取自然恢复为主策略,以推广耐旱乡土草灌植被为主,辅以集水、节水等技术,重点提升植被稳定性。综上,RDA所揭示的自然-人工综合作用梯度,不仅从机制上解释了科尔沁沙地植被空间格局的成因,更为科学评估不同区域生态修复措施的适宜性提供了理论支撑,对该地区实现精准、高效的生态管理具有重要的实践价值。

3.4 不确定性和限制性

研究中将30 m精度的CLCD土地利用数据重采样至500 m来匹配植被覆盖度数据的分辨率,这一尺度转换会使耕地、建设用地等小斑块土地利用类型的转换被平滑,进而造成土地利用生态贡献量的计算偏差,这一尺度效应反映了小斑块土地利用变化在粗分辨率下的捕捉局限性,是区域尺度多源数据匹配中难以避免的约束。未来可尝试通过多尺度验证或采用像元分解模型细化混合像元的类型占比,以降低尺度转换带来的不确定性。此外,本研究通过冗余分析揭示了气候与人类活动对植被覆盖度空间格局的影响。然而,对人类活动的表征仍存在局限。当前分析仅以土地利用类型转换来间接反映人类活动,未能纳入生态工程投资、耕作方式等精细化指标,这可能导致对人类活动影响的估计不够全面或存在偏差。未来研究可通过融合夜间灯光数据(反映建成区强度)、社会经济统计数据(如人口密度),以及使用高分辨率遥感影像,更精确地刻画人为干预的强度与空间异质性,进而更清晰地量化人类活动的独立贡献。

4 结论

2000—2023年植被覆盖度时空演变呈现整体提升、结构优化的显著特征。生长季FVC以年均0.43%的速率持续上升,极高覆盖度占比从17.45%跃升至49.78%,中低覆盖度区域面积显著缩减。

科尔沁沙地植被覆盖度稳定性空间分异显著,未来持续向好趋势明确。不稳定区域(占44.13%)多集中于赤峰市;但Hurst指数表明63.28%的区域具有强持续性,预示植被整体改善趋势可能长期延续。

科尔沁沙地植被覆盖度变化受自然因子与人类活动协同影响。降水是主导气象因子,与FVC正相关区域占74.05%,是植被生长的核心自然条件;人类活动呈现双向驱动效应,正向驱动主要源于生态修复类土地利用转移,裸地→草地/林地累计正向生态贡献达82.9%,印证了区域生态治理成效;负向效应主要关联两类土地利用转移,其中耕地→建设用地累计负向贡献达74.6%,对局部植被覆盖存在客观削弱作用,但该影响具有局部性、阶段性特征。冗余分析(RDA)定量揭示,人类活动是塑造科尔沁沙地植被空间格局的最核心驱动力,其对格局变化的解释贡献度达67.44%。更重要的是,RDA仅提取出显著约束轴,这表明在科尔沁沙地生态脆弱区,自然条件与人类活动深度耦合,共同形成了自然-人工复合作用梯度主导植被格局的分布。

参考文献:

- [1] 姜志伟,杨智博,杨清,等.2000—2022年库布齐沙漠植被覆盖度时空变化及其驱动因子[J].中国沙漠,2025,45(5):124—133.
- [2] Hou L F, Li L, Chen R F, et al. Vegetation dynamics: modeling, mechanisms, and emergent properties[J].Physics Reports, 2025,1145:1—87.
- [3] 颜明,贺莉,王随继,等.基于NDVI的1982—2012年黄河流域多时间尺度植被覆盖变化[J].中国水土保持科学,2018,16(3):86—94.
- [4] Kumar D, Pfeiffer M, Gaillard C, et al. Misinterpretation of Asian savannas as degraded forest can mislead management and conservation policy under climate change.Biological Conservation,2020,241,108293.
- [5] 于静,高亚敏,付铭.科尔沁草原NDVI时空变化特征及其对气候的响应[J].中国草地学报,2020,42(6):82—90.
- [6] 武金洲,郑晓,高添,等.三北防护林体系建设工程对科尔沁沙地社会经济影响的定量分析[J].生态学杂志,2020,39

- (11):3567-3575.
- [7] 张慧龙,杨秀春,杨东,等.2000-2020年内蒙古草地植被覆盖度时空变化及趋势预测[J].草业学报,2023,32(8):1-13.
- [8] 白舒婷,王珊,迟文峰,等.2000-2023年科尔沁沙地植被NDVI时空动态及其对气候变化和人类活动的响应[J].干旱区资源与环境,2025,39(7):74-83.
- [9] Li M Y, Liu T X, Luo Y Y, et al. Fractional vegetation coverage downscaling inversion method based on Land Remote-Sensing Satellite (System, Landsat-8) and polarization decomposition of Radarsat-2 [J]. International Journal of Remote Sensing, 2021, 42(9):3255-3276.
- [10] Huang F, Wang P, Liu X N. Monitoring vegetation dynamics in Horqin Sandy Land from SPOT Vegetation time series imagery [C]//The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, China. 2008:915-920.
- [11] 樊雪丰,孙新龙,张迎杰.阿鲁科尔沁旗植被覆盖度时空变化及气象原因[J].草原与草业,2024,36(1):14-18.
- [12] 马龙,王静茹,刘廷玺,等.2000-2012年科尔沁沙地植被与气候因子间的响应关系[J].农业机械学报,2016,47(4):162-172.
- [13] 崔珍珍,马超,陈登魁.1982-2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J].干旱区研究,2021,38(2):536-544.
- [14] 陈效速,王恒.1982-2003年内蒙古植被带和植被覆盖度的时空变化[J].地理学报,2009,64(1):84-94.
- [15] 卜凡蕊,刘颖,邹学勇.中国东部典型沙地植被覆盖度对降水变化的响应[J].中国沙漠,2023,43(3):9-20.
- [16] 沈贝贝,魏一博,马磊超,等.内蒙古草原植被覆盖度时空格局变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2022,38(12):118-126.
- [17] 张亦然,刘廷玺,童新,等.基于多源遥感和机器学习方法的科尔沁沙地植被覆盖度反演[J].中国沙漠,2022,42(3):187-195.
- [18] 高亚敏,于静,萨日娜,等.通辽市植被生态质量变化分析[J].内蒙古气象,2022(1):7-11.
- [19] 杨柳,同峰,王艳姣.科尔沁和浑善达克沙地植被覆盖度时空变化及驱动力[J].林业科学,2025,61(11):70-79.
- [20] 于世勇,孙志超,慈雪伦,等.基于网格化的科尔沁沙地植被覆盖变化及驱动力分析[J].林草资源研究,2025(3):119-126.
- [21] 巢妍,梁丽娥,高乐凡,等.基于Google Earth Engine的黄土高原核归一化植被指数动态演变及其驱动因素[J].生态学报,2026,46(2):846-860.
- [22] 魏泽锋,官云兰,王淑婷,等.基于KNDVI的塔里木河流域植被覆盖时空变化与归因分析[J].环境科学,2025,46(12):7853-7864.
- [23] 王子昊,王冰,张秋良,等.基于KNDVI的大兴安岭生态功能区植被覆盖变化时空特征及驱动力分析[J].环境科学,2025,46(5):3021-3032.
- [24] 吴广霞,刘绥华,邓玲玲,等.基于KNDVI的贵州省植被时空变化及其驱动分析[J].水土保持研究,2025,3(3):222-230.
- [25] 魏光普,张文君,朱治衡,等.基于kNDVI的内蒙古自治区2004-2023年植被覆盖度时空变化及气候驱动因子[J].林业科学,2025,61(11):80-91.
- [26] Fan Q, Zhang L, Wu H, et al. Vegetation dynamics and driving mechanisms in the Northwest Desert zone based on long-term kNDVI data [J]. Ecological Frontiers, 2025, 45(4):836-848.
- [27] He L, Yuan Y, He Z, et al. Spatiotemporal variations of vegetation NPP based on GF-SG and KNDVI and its response to climate change and human activities: a case study of the Zoigê Plateau [J]. Forests, 2024, 16(1):32-32.
- [28] 张媛媛,曹亚楠,牛犇,等.基于kNDVI的藏北高原高寒草地植被覆盖变化及驱动力分析[J].草业科学,2025,42(11):2712-2726.
- [29] 李爱敏,颜培霞,汤洪震,等.基于多维度生态特征耦合的科尔沁沙地生态系统功能分区研究[J/OL].中国沙漠,2026,46(4):1-12 [2026-03-25]. <https://link.cnki.net/urlid/62.1070.P.20251230.0958.004>.
- [30] 李玉强,王旭洋,郑成卓,等.科尔沁沙地防沙治沙实践与生态可持续修复浅议[J].中国沙漠,2024,44(4):302-314.
- [31] 张继平,常学礼,蔡明玉,等.土地利用类型变化对沙漠化过程的影响:以科尔沁沙地为例[J].干旱区研究,2009,26(1):39-44.
- [32] 刘二燕,赵媛媛,周蝶,等.科尔沁-浑善达克沙地2000-2020年土地沙化时空变化格局[J].中国沙漠,2024,44(4):46-56.
- [33] 周得龙,王永芳,郭恩亮,等.科尔沁沙地生境质量演变与预测[J].中国沙漠,2025,45(4):211-226.
- [34] 魏丰良,刘廷玺,张圣微,等.科尔沁沙地植被覆盖变化及其与气候因子的关系研究[J].水土保持研究,2012,19(3):254-258.
- [35] Vermote E, Wolfe R. MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 1 km and 500 m SIN Grid V061[DS]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. <https://lpdaac.usgs.gov/doi,2021.doi:10.5067/MODIS/MOD09GA.061>.
- [36] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martínez Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere[J]. Science Advances, 2021, 7(9):eabc7447.
- [37] Xu M, Guo B, Zhang R. A novel approach to detecting the salinization of the Yellow River Delta using a Kernel normalized difference vegetation index and a feature space model[J]. Sustainability, 2024, 16(6):2560.
- [38] 彭守璋.中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2024)[DS].国家青藏高原科学数据中心.<http://data.tpdac.ac.cn/doi,2019,doi:10.11888/Meteoro.tpdac.270961>.
- [39] 彭守璋.中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2024)[DS].国家青藏高原科学数据中心.<http://data.tpdac.ac.cn/doi,2020,doi:10.5281/zenodo.3114194>.
- [40] 彭守璋.中国1 km逐月潜在蒸散发数据集(1901—2024)[DS].国家青藏高原科学数据中心.<http://data.tpdac.ac.cn/doi,2022,doi:10.11866/db.loess.2021.001>.

- [41] Ma Y Y, Wang W Y, Jin S K, et al. Spatiotemporal variation of LAI in different vegetation types and its response to climate change in China from 2001 to 2020 [J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111101.
- [42] 肖晶, 饶良懿. 2001–2020年乌梁素海流域植被NPP时空变化及驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4744–4755.
- [43] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover datasets and its dynamics in China from 1985 to 2025 [DS]. *Earth System Science Data*. <https://zenodo.org/doi/2025>, doi: 10.5281/zenodo.4417809.
- [44] Zhang C, Tan H, Zhou M, et al. What was the China's spatial-temporal evolution characteristics of cross-sensitivity of ecosystem service value under land use transition? A case study of the Jiangjin, Chongqing [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 1080809.
- [45] 郭立明, 刘宝军, 田娜玲, 等. 宁夏沙化土地封禁保护区生态环境变化及驱动因素分析[J]. *林草资源研究*, 2025, (3): 9–18.
- [46] Yuan W, Wu S Y, Hou S G, et al. Normalized difference vegetation index-based assessment of climate change impact on vegetation growth in the humid-arid transition zone in Northern China during 1982–2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(15): 5583–5598.
- [47] 朱远忠, 黄文达, 于海伦, 等. 科尔沁沙质草地不同水热梯度植物群落叶功能性状特征[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(2): 143–150.
- [48] Yao J Q, Liu H Y, Huang J P, et al. Accelerated dryland expansion regulates future variability in dryland gross primary production [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1665.
- [49] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019, 1(1763): 1–14.
- [50] 陈慧鑫. 通辽市全面推进防沙治沙提升科尔沁沙地治理质效[J]. *内蒙古林业*, 2024(8): 4–6.
- [51] 刘纪远, 张增祥, 徐新良, 等. 21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(12): 1411–1420.
- [52] Zhang L, Yang L, Zohner C M, et al. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world's cities [J]. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabo0095.
- [53] 杜会石, 吴兴耀, 哈斯额尔敦. 1980–2024年中国沙漠地区景观演变特征[J]. *中国沙漠*, 2026, 46(2): 203–212.
- [54] 李双双, 段生勇, 胡佳岚, 等. 黄土高原植被变化主导空间模式及其影响因素[J]. *地理学报*, 2024, 79(7): 1768–1786.

Spatiotemporal variation and causes of vegetation coverage in Horqin Sandy Land

Yu Jing¹, Wu Wenshuo¹, Fu Ming², Gao Yamin^{1,3}

(1. Tongliao Meteorological Bureau, Tongliao 028000, Inner Mongolia, China; 2. Chifeng Meteorological Bureau, Chifeng 024000, Inner Mongolia, China; 3. CMA Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction/ Gansu Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China)

Abstract: As a critical frontline in China's battle against desertification, the Horqin Sandy Land's vegetation dynamics serve as a vital indicator of the efficacy of regional ecological governance. Leveraging the Google Earth Engine (GEE) platform, this study retrieved a long-term time-series dataset of fractional vegetation cover (FVC) during the growing seasons from 2000 to 2023. By integrating Sen-MK trend analysis, the coefficient of variation, and the Hurst exponent, we systematically investigated the spatiotemporal evolution, stability, and future trajectory of FVC. Furthermore, partial correlation analysis and a land use transition matrix, complemented by redundancy analysis (RDA), were employed to quantitatively disentangle the driving forces of climate and human activities. Our key findings reveal: (1) There was a significant upward trend in growing-season FVC, with an average annual growth rate of 0.43%. The FVC structure improved substantially, as the proportion of extremely high coverage soared from 17.45% to 49.78%. Spatially, FVC presents a mosaic pattern of widespread high-coverage areas interspersed with patches of low coverage, showing no clear directional differentiation. (2) Vegetation change was stable in 47.89% of the area, while unstable changes, concentrated in patchy zones within the western region, characterized 44.13%. The Hurst exponent suggests strong persistence in future trends, with 90.13% of the region expected to maintain its current trajectory 63.28%, exhibiting extremely strong persistence ($H > 0.7$), indicating that the ongoing improvement is likely sustainable. (3) Precipitation emerged as the dominant climatic factor, positively correlating with FVC in 74.05% of the study area (12.46% showing significant positive correlation, $P < 0.05$). Human activities exerted bidirectional impacts: land conversions from bare land to grassland/forest land yielded substantial ecological benefits, while transitions from farmland to construction land and grassland to bare land negatively affected local vegetation. Notably, RDA quantitatively identified human activities as the core driver shaping the spatial pattern of vegetation, accounting for 67.44% of the observed changes. This study provides crucial scientific evidence and a methodological framework for guiding ecological governance in the Horqin Sandy Land and for monitoring vegetation dynamics in arid and semi-arid regions globally.

Key words: Horqin Sandy Land; vegetation coverage; temporal and spatial variation; drivers