

渭河流域植被时空动态归因：线性与非线性方法的对比研究

张嘉珊¹ 张翀^{1,2}

1 宝鸡文理学院地理与环境学院

2 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室

DOI:10.32629/eep.v9i5.3203

[摘要] 以渭河流域甘陕段2001—2020年MOD13A2 NDVI数据为基础,运用经验正交函数(EOF)分解识别植被变化主导空间模态,结合GLC30三期土地利用数据划分强、弱人类活动干扰区,构建统一归因空间框架。在该框架下并行运行线性残差归因(RESTREND)和3D-UNet深度学习非线性归因两条路径,定量评估气候变化与人类活动的相对贡献,系统对比两种方法的归因差异。结果表明:(1)研究时段内流域NDVI累计增幅36.26%,十年倾向率12.57%/10a,渭北—陇东黄土丘陵区改善最为集中,关中城市带局部退化;(2)EOF第一模态方差贡献率86.3%,正异常区与退耕还林还草工程重点区高度吻合;(3)线性归因显示强、弱干扰区人类活动贡献率分别为86.18%和86.71%,差距不足1%;(4)非线性归因结果分别为93.77%和96.60%,较线性结果系统偏高7—10%,揭示非线性模型能更充分捕捉气候因子与植被的复杂响应关系。

[关键词] 渭河流域; NDVI; EOF分析; 线性残差归因; 3D-UNet; 植被恢复

中图分类号: TV212.4 文献标识码: A

Spatio-temporal Dynamics and Driving Factors of Vegetation in the Weihe River Basin: A Comparative Study of Linear and Nonlinear Methods

Jiashan Zhang¹ Chong Zhang^{1,2}

1 School of Geography and Environment, Baoji University of Arts and Sciences

2 Shaanxi Provincial Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation

[Abstract] Based on the MOD13A2 NDVI datasets of the Gansu-Shaanxi section of the Weihe River Basin from 2001 to 2020, this study adopted Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition to identify the dominant spatial patterns of vegetation changes. Combined with three-phase GLC30 land use data, areas under strong and weak human activity disturbances were classified, and a unified spatial framework for attribution analysis was established. Within this framework, two analytical approaches were applied in parallel: the linear residual trend attribution method (RESTREND) and the 3D-UNet deep learning-based nonlinear attribution method. The relative contributions of climate change and human activities were quantitatively assessed, and the attribution differences between the two methods were systematically compared. The results show that: (1) The cumulative NDVI increase in the basin reached 36.26% during the study period, with a decadal trend rate of 12.57% per decade. Vegetation improvement was most prominent in the Weibei-Eastern Longdong loess hilly region, while local vegetation degradation occurred in the Guanzhong urban agglomeration; (2) The first EOF mode contributed 86.3% to the total variance, and its positive anomaly areas were highly consistent with key zones of the Grain for Green Project; (3) Linear attribution results indicated that the contribution rates of human activities were 86.18% and 86.71% in strong and weak disturbance areas respectively, with a difference of less than 1%; (4) The corresponding nonlinear attribution values were 93.77% and 96.60%, which were 7% to 10% higher than linear results on average. It proves that nonlinear models can better capture the complex response relationships between climatic factors and vegetation dynamics.

[Key words] Weihe River Basin; NDVI; EOF analysis; linear residual trend attribution; 3D-UNet; vegetation restoration

引言

归一化植被指数 (NDVI) 是量化植被覆盖状况的核心遥感参量, 在全球变化研究中发挥着不可替代的作用^[1]。Zhu等^[2]研究表明, 1982—2015年全球约25%—50%的植被覆盖区域呈现显著“变绿”趋势, CO₂施肥效应、气候变化与土地管理活动共同驱动了这一进程。中国近年来已成为全球新增植被面积最多的国家^[3], 其中退耕还林还草工程 (自1999年实施, 累计造林逾5亿亩) 发挥了关键作用。

厘清气候变化与人类活动的相对贡献是制定科学生态政策的前提。残差趋势分析法 (RESTREND) 以气候—植被线性关系为假设, 将气候无法解释的残差归为人类活动影响^[4], 在全球和区域尺度得到广泛验证, 但其线性假设难以刻画植被响应气候的滞后效应与多因子协同作用。近年来, 深度学习被逐步引入植被归因领域: Liang等^[5]以ConvLSTM模型对黄河水源涵养区进行归因, R²达0.99, 精度显著优于随机森林; 李双双等^[6]提出EOF模态识别与残差趋势分析相结合的2018先分区、后归因2019框架, 但仍停留于线性层面。

渭河流域是黄河最大支流流域, 退耕还林还草工程与关中平原城镇化并行推进, 植被变化驱动机制具有极强空间异质性^[7]。已有研究对流域植被趋势与驱动因素进行了探讨^[8], 但在同一流域内将线性与非线性归因系统并行对比的研究尚属空白, 且蒸散发作为综合水热平衡指标尚未充分纳入。本研究以渭河流域甘陕段2001—2020年为时段, 在统一空间框架下并行运行两条归因路径, 引入月蒸散发作为第三气候驱动变量, 定量对比两种方法的归因差异, 为流域精细化生态治理提供科学依据。

1 研究区与数据

渭河流域地处黄河中游 (约33° 30′ —37° 30′ N, 103° 30′ —110° 30′ E), 干流全长818 km, 流域总面积约13.48万km²。研究区整体西高东低, 由北部黄土高原沟壑区、中部关中冲积平原与南部秦岭山地三大地貌单元组成, 划分为甘南高原草甸—林区 (I区)、关中城市人居保障区 (II区)、关中平原农产品供给区 (III区)、秦岭—六盘山水源涵养区 (IV区) 和渭北—陇东黄土丘陵土壤保持区 (V区) 5个生态功能区。

植被数据采用MOD13A2产品 (MODIS/Terra NDVI, 16天合成, 1 km分辨率, 2001—2020年)^[9], 以最大值合成法提取年均NDVI。气象数据 (逐月均温、降水量、潜在蒸散发) 来自国家青藏高原数据中心, 空间分辨率约1 km^[10]。土地利用数据选用GLC30系列 (2000、2010、2020年三期, 30 m分辨率), 用于构建人类活动强弱分区。

2 研究方法

2.1 趋势分析

像元尺度采用Theil-Sen中位数斜率估计变化速率, Mann-Kendall非参数检验判定显著性 ($\alpha=0.05$, $|Z|>1.96$); 分区尺度采用一元线性回归, 两种方法结合同时反映趋势强弱与统计可靠性。

2.2 EOF分解与分区

对NDVI距平场进行经验正交分解, 提取植被变化主导空间模态, 采用North误差估计法对特征值进行显著性检验。在EOF第一模态正异常区内叠加GLC30三期数据: 两期间存在地类转换或2020年仍属耕地/建成区的像元归入强干扰区, 三期地类稳定的像元归入弱干扰区。

2.3 线性残差归因 (RESTREND)

以气温和降水为自变量建立多元回归, 将气候无法解释的残差作为人类活动贡献, 分别计算气候变化与人类活动对NDVI变化趋势的相对贡献率 (C_{CC}和C_{HA})。

2.4 3D-UNet非线性归因

以逐月气温、降水量和蒸散发为输入, 以NDVI逐月数据为输出, 构建3D-UNet深度学习模型, 三维卷积核同时作用于空间和时间维度, 隐式捕捉气候因子与植被间的非线性协变关系。采用AdamW+Lookahead优化策略与余弦退火学习率, 经两阶段700轮训练 (损失从0.18收敛至7.33×10⁻⁴)。将训练后模型代入实际气候数据, 生成气候驱动NDVI序列, 以与实测NDVI的残差量化人类活动贡献; 贡献率计算框架与线性路径保持一致, 保证结果可直接对比。

3 结果分析

3.1 NDVI时空变化特征

2001—2020年渭河流域NDVI由0.34增至0.46, 累计增幅36.26%, 十年倾向率12.57%/10a (OLS斜率0.0050/a, R²=0.940, p<0.001)。2001—2010年为快速恢复期, 2011—2020年转入稳定增长期, 2010年为关键转折节点。各生态区增速差异显著 (表1): 渭北—陇东黄土丘陵土壤保持区 (V区) 增速最快 (14.95%/10a), 是生态工程成效最突出的区域; 关中城市区 (II区) 仅1.72%/10a, 城镇扩张是植被受限的主因。空间上, 显著改善区沿渭河干流延伸并向庆阳、平凉黄土丘陵集聚, 与退耕还林还草工程重点实施范围高度吻合; 显著退化区集中于西安—咸阳—渭南—宝鸡城市带, 形成“北部修复、中部扩张”的鲜明格局。

表1 渭河流域各生态功能区植被NDVI演变趋势

指标	渭北—陇东 区 (V)	秦岭—六盘 山 (IV)	关中平原 (III)	关中城市 (II)	甘南高 原 (I)	全流域
2001 年均值	0.31	0.43	0.37	0.33	0.35	0.34
2020 年均值	0.44	0.55	0.49	0.37	0.44	0.46
趋势 (%/10a)	14.95	9.66	8.63	1.72	10.34	12.57

3.2 EOF模态与人类活动分区

EOF第一模态方差贡献率为86.3%, 通过North显著性检验 (p<0.01), 时间系数在研究时段内持续上升, 揭示流域植被以线性增长为主导。正异常区与退耕还林还草工程重点区空间重叠率达62.69%。在正异常区内叠加GLC30完成分区: 强干扰区面积约2.74万km² (占62.9%), 沿泾河中上游河谷及城市周边集聚; 弱

干扰区约1.62万km² (占37.1%),以黄土丘陵沟壑区和山地边缘为主。

3. 3线性与非线性归因对比

线性残差分析表明(表2),强干扰区人类活动贡献率为86.18%,弱干扰区为86.71%,两类分区差值不足0.6个百分点,归因结构高度一致。气候变化贡献率在大部分区域仅为0%—20%,仅天水盆地周围及宝鸡西部山地出现相对高值,对应半湿润—半干旱气候过渡带。3D-UNet模型经700轮训练后,生长季NSE稳定于0.71—0.78,全年SMAPE均值约83.7%,满足归因任务的可靠性要求。非线性归因结果显示,强干扰区人类活动贡献率升至93.77%,弱干扰区升至96.60%,较线性结果系统偏高7—10个百分点;气候驱动NDVI总体呈下降趋势(−2.10%/10a),而人类活动驱动NDVI呈极显著上升(MK检验 $Z=3.02$, $p<0.01$),两类驱动力方向相反,共同支撑了实测NDVI的持续改善。

两种方法均揭示,无论土地利用类型是否发生转变,整个正异常区内人类活动均占绝对主导地位,退耕还林工程的植被恢复效应已超越可识别的土地覆被变化边界。非线性方法通过纳入蒸散发变量并捕捉气候—植被的复杂非线性关系,能更充分归因人类活动贡献,但也可能将部分气候—植被协同非线性效应纳入‘人类活动’项,需结合机理分析审慎解读。

表2 线性与非线性归因结果对比

方法	强干扰区人类活动贡献率(%)	弱干扰区人类活动贡献率(%)	两区差值(%)
线性残差归因	86.18	86.71	0.53
非线性归因	93.77	96.60	2.83
差异(非线性-线性)	+7.59	+9.89	—

4 结论

(1)2001—2020年渭河流域NDVI累计增幅36.26%(12.57%/10a),呈‘先快后稳’阶段特征。渭北—陇东黄土丘陵区改善最强(14.95%/10a),与退耕还林工程重点区高度对应;关中城市带局部退化,形成‘北部修复、中部扩张’空间格局。

(2)EOF第一模态方差贡献率86.3%,正异常区与退耕还林还草工程实施范围高度重叠,为归因分析边界划定提供客观依据。结合GLC30将正异常区细分为强干扰区(2.74万km²,62.9%)和弱干扰区(1.62万km²,37.1%)。

(3)线性归因表明强、弱干扰区人类活动贡献率分别为86.18%和86.71%,差距不足1%;非线性归因分别升至93.77%和

96.60%,较线性结果系统偏高7—10个百分点。两种方法均证实人类活动是渭河流域植被改善的主导驱动力,非线性路径对人类活动贡献的量化更为充分。退耕还林工程的生态效应已超越可识别的土地覆被变化边界,建议在类似干旱半干旱流域的归因研究中优先采用非线性方法并纳入蒸散发指标。

[参考文献]

[1]IPCC.Climate Change 2021:The Physical Science Basis[R].Cambridge:Cambridge University Press,2021.

[2]Zhu Z C,Piao S L,Myneni R B,et al.Greening of the earth and its drivers[J].Nature Climate Change,2016,6(8):791—795.

[3]Chen C,Park T,Wang X H,et al.China and India lead in greening of the world through land-use management[J].Nature Sustainability,2019,2(2):122—129.

[4]Evans J,Geerken R.Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J].Journal of Arid Environments,2004,57(4):535—554.

[5]Liang Z,Sun R,Duan Q.Attribution of Vegetation Dynamics in the Yellow River Water Conservation Area Based on the Deep ConvLSTM Model[J].Remote Sensing,2024,16(20):3875.

[6]李双双,段生勇,胡佳岚,等.黄土高原植被变化主导空间模态及其影响因素[J].地理学报,2024,79(7):1768—1786.

[7]Lv W,Liu F,Cai K,et al.Distinguishing the Impacts and Gradient Effects of Climate Change and Human Activities on Vegetation Cover in the Weihe River Basin,China[J].Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2024,129(10):e2024JG008297.

[8]黄云博,张翀,王玉丹.渭河流域植被覆盖变化趋势及其对土壤干湿状况的响应[J].干旱区地理,2024,47(5):841—849.

[9]Didan K.MOD13A2 MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km SIN Grid V006[DB].NASA EOSDIS Land Processes DAAC,2015.

[10]彭守璋.中国1km分辨率逐月气象数据集(1901—2023)[DB].国家青藏高原数据中心,2019—2020.

作者简介:

张嘉珊(2000—),女,汉族,陕西西安人,硕士研究生,主要从事植被遥感研究。