



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目： 基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应
作者： 贺鹏，毕如田，徐立帅，王婧姝，曹晨斌
DOI： 10.13287/j.1001-9332.202202.012
收稿日期： 2021-07-02
网络首发日期： 2021-11-15
引用格式： 贺鹏，毕如田，徐立帅，王婧姝，曹晨斌. 基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应[J/OL]. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202202.012>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于地理探测的黄土高原植被生长对气候的响应

贺鹏¹ 毕如田¹✉ 徐立帅^{1,2} 王婧姝¹ 曹晨斌¹

(¹山西农业大学资源环境学院, 山西晋中 030801; ²中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002)

*通信作者 毕如田, E-mail: brt@sxau.edu.cn

摘要 为探讨黄土高原不同植被类型对气候变化的响应机制, 以 2002—2019 年黄土高原归一化植被指数 (NDVI) 数据为基础, 利用趋势分析、Hurst 指数、地理探测器等方法分析不同植被类型 NDVI 变化趋势及其与气候因子的关系。结果表明: 2002—2019 年, 黄土高原不同植被类型 NDVI 以增长趋势和同向中持续性为主, 仅栽培植被在建成区及周边 NDVI 呈显著和极显著下降趋势。植被主要生长期 (4—10 月), 除受混合像元影响较大的草丛和草甸外, 其余植被类型 NDVI 空间差异性显著, NDVI 均值由大到小依次为针叶林>阔叶林>灌丛>草甸>草丛>栽培作物>草原>荒漠。黄土高原气候因子交互作用表现为相互增强和非线性增强, 不存在独立或减弱关系。在生境脆弱的草原和荒漠, 气象因子的交互作用更加突出。降水与气温协同作用对不同植被类型均有较大影响。水汽压、相对湿度、日照、气压和风速则通过间接影响水热条件, 对 NDVI 产生不同解释力。

关键词 黄土高原; 归一化植被指数; 植被类型; 气候因子; 地理探测器

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202202.012

Vegetation growth responses to climate change using geographical detection in the Loess Plateau, China

HE Peng¹, BI Ru-tian¹✉, XU Li-shuai^{1,2}, WANG Jing-shu¹, CAO Chen-bin¹

(¹College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, Shanxi, China; ²Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

Abstract In order to explore the response of different vegetation types to climatic change in the Chinese Loess Plateau (CLP), the trends of different vegetation types and their relationships with climatic factors were analyzed using trend analysis, Hurst index, and geographical detector model based on normalized difference vegetation index (NDVI). The results indicated that the NDVI from 2002 to 2019 under different vegetation types was in growth trend and codirectional moderate persistence. The NDVI of crops in the built-up and adjacent areas decreased significantly. Except for the area under grassland or meadow affected by mixed pixels, the spatial difference of NDVI was significant in the growing season (from April to October). The mean NDVI ranked as: coniferous forest>broadleaved forest>scrub>meadow>grassland> crop>steppe>desert. The interaction of climatic factors was interactive and non-linear enhancement in the CLP. Moreover, the interaction was more prominent under land type of steppe and desert where the habitat is fragile. The synergistic effect of precipitation and temperature had a great influence on different vegetation types. Water vapor, relative humidity, sunshine duration, atmospheric pressure, and wind speed had different explanatory powers on NDVI through indirectly effects of hydrothermal conditions.

Key words Loess Plateau; normalized difference vegetation index (NDVI); vegetation type; climatic factor; geographical detector model.

收稿日期: 2021-07-02

基金项目: 本文由中国沙漠气象科学研究基金项目(Sqj2020011)、山西农业大学科技创新基金项目(2017022、2016YJ16)、山西省社科联重点课题研究项目(SSKLZDKT2021039)资助

作者简介: 贺鹏, 男, 1989 年生, 博士研究生。主要从事生态环境遥感及陆气相互作用研究。E-mail: hepeng7777@126.com

Fund: This work was supported by the Desert Meteorological Science Research Foundation of China (Sqj2020011), the Science and Technology Innovation Foundation of Shanxi Agricultural University (2016YJ16 and 2017022), and the Key Research Project of Shanxi Federation of Social Science Associations (SSKLZDKT2021039).

网络首发时间: 2021-11-15 14:23:40 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20211112.2040.001.html>

黄河流域是我国重要的粮食、能源和化工聚集地，但自古以来黄河水旱灾害频发、水少沙多以及治理困难等问题始终存在^[1]。因此，黄河流域生态保护和高质量发展已经成为重大国家战略。地处黄河中游的黄土高原地区是我国生态文明建设和水土保持的重点区域^[2]。为解决黄土高原的生态问题，我国先后开展了坡面治理^[3]、沟坡联合治理^[4]、小流域综合治理^[5]和退耕还林草工程^[6]，治理效果显著，其中，在退耕还林草工程实施之后，黄土高原植被持续改善的面积占整个区域的 67.1%^[7]，在不同坡度和气候区植被覆盖明显改善的面积占比均超过 50.0%^[8]。然而有研究表明，全球气候变暖引起极端天气频发，导致黄土高原地区的水热条件波动较大^[9]，植被是否能保持现有生长状态仍存在较大争议^[10]。因此，研究该区域植被变化趋势及其与气候因子的关系，有助于揭示植被对气候变化的响应规律，可为黄土高原生态文明建设和水土保持工程提供理论支持^[11]。

归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 能够准确反映植被的代谢强度和月、季、年尺度的变化特征，表征地表植被活动的强弱，被广泛用于监测植被的变化及其与气候因子的关系^[12]。目前，在植被 NDVI 与气候因子关系的研究中，多以全区 NDVI 为研究对象，利用相关关系分析降水和气温对 NDVI 的影响，但由于空间尺度的差异导致降水和气温对 NDVI 的驱动方式及影响程度存在较大争议^[13-14]。黄土高原植被 NDVI 受到数据精度、时间尺度、植被类型特征差异及景观环境异质性的影响^[15]，对气候的响应更为复杂^[11,16]。许多学者通过增加气候因子类型 (如日照、相对湿度)，计算不同时间尺度气候因子与 NDVI 的相关性用以研究黄土高原气候因子与植被间的关系^[10,17]，有研究发现，全区 NDVI 与气候因子之间没有显著的相关性，但以乔木为主的植被类型受相对湿度和日照影响的负效应显著，草本为主的植被类型则受到降水量的显著正效应影响^[10]，说明不同植被类型 NDVI 与气候因子间的关系差异显著。同时，已有研究较少考虑气候因子间的协同影响作用，这种影响作用是一个复杂的响应过程，并不存在严格统计标准的线性关系，仅通过偏相关和复相关分析难以定量表达，交互探测作用能保证其对多变量共线性的免疫，可以用于判断和说明气候因子共同作用和相互独立作用对植被 NDVI 的解释力^[18]，在分析不同植被类型 NDVI 与气候因子关系中具有较为广泛的应用前景^[19]。

本研究基于黄土高原 2002—2019 年 NDVI 数据，利用变异系数、趋势分析、Hurst 指数以及地理探测器等方法，探讨不同植被类型主要生长期 NDVI 变化趋势及其与日照、风速、气压、水汽压、相对湿度、降水和气温的关系，并通过交互探测研究气候因子间的协同效应对生长期植被 NDVI 的影响。以期预测未来黄土高原植被演变提供理论基础，同时为黄土高原区生态环境改善、植被恢复及未来生态环境建设提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河流域中部 (33°41′—41°16′ N, 100°52′—114°33′ E)，日月山脉以东，太行山脉以西，北至阴山，南达秦岭，东西长约 1000 km，南北长约 750 km，总面积约为 64.87 万 km² (图 1)。该区地处内陆干旱气候向暖温带湿润季风气候过渡地带，气候波动性较大，年均气温为 9~12 °C，年降水量 (100~800 mm) 空间差异显著^[20]。辖区内地貌类型多样，包括吕梁山脉、子午岭山脉、六盘山山脉、陇中黄土高原、鄂尔多斯高原、关中平原、宁夏平原、河套平原、太原盆地、洛阳盆地等，主要植被类型为栽培植被、草原、灌丛、阔叶林、荒漠、草甸、草丛和针叶林。

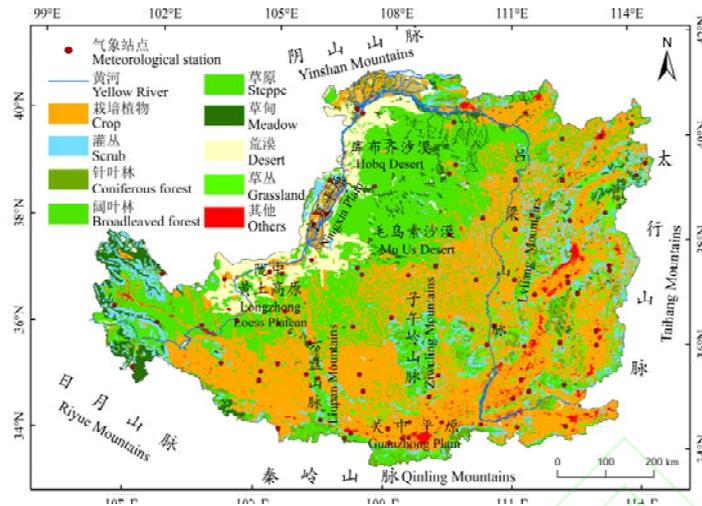


图1 黄土高原地理位置、气象站点及主要植被类型的空间分布
Fig.1 Location of Loess Plateau, spatial distribution of meteorological stations and main vegetation types.

1.2 数据来源

MODIS 地表反射率数据 MOD09A1 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 采用正弦投影, 其投影编号 H26V05、H27V05、H27V06 和 H28V06 可覆盖黄土高原全区。本研究将 MOD09A1 数据进行影像拼接并转换为 UTM 投影基础上, 利用红光波段 (R) 和近红外波段 (NRI) 计算 2002—2019 年 8 d 尺度的 NDVI。为了进一步减少大气和气溶胶散射的影响, 利用最大值合成法 (maximum value composite, MVC) 计算黄土高原月、主要生长期 (4—10 月)、年尺度的 NDVI。

黄土高原植被类型数据来源于资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 提供的《1: 100 万中国植被图集》^[21], 其中, 黄土高原植被类型被分为栽培植被、草原、灌丛、阔叶林、荒漠、草甸、草丛、针叶林和其他 (0.5%) 9 类。

日照、风速、气压、水汽压、相对湿度、降水和气温月尺度观测数据来自中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>)。选取 2002—2019 年黄土高原区 84 个气象站点, 通过反距离权重 (降水) 和克里金插值法 (日照、风速、气压、水汽压、相对湿度、气温) 获得整个黄土高原区月尺度栅格气象数据, 像元大小采用与 NDVI 相同的空间分辨率。

1.3 分析方法

1.3.1 稳定性分析

变异系数 (coefficient of variation, CV) 可以用来描述地理数据的相对波动^[22]。本研究采用 CV 来反映 NDVI 变化的稳定性。计算公式如下:

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

式中: n 代表总年份数; i 是时间序列; x_i 是第 i 时刻的 NDVI 值; \bar{x} 为 NDVI 平均值。CV 值越高, 表示 NDVI 时间序列波动越大; CV 值越低, 表示波动越小。

1.3.2 趋势分析

Slope 趋势分析的本质是利用一元线性回归模型模拟每个栅格的 NDVI 随时间的变化趋势^[23]。计算公式如下:

$$Slope = \frac{n \times \left(\sum_{i=1}^n i \times NDVI_i \right) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (2)$$

式中：Slope 表示斜率； n 代表总年份数； i 是时间序列； $NDVI_i$ 为第 i 年的 NDVI 值。Slope>0 表示 NDVI 随时间呈增加趋势，Slope<0 表示 NDVI 呈降低趋势。利用 F 检验来评价线性回归模型的显著性。

1.3.3 Hurst 指数分析

Hurst 指数能定量描述变量在时间序列上的依赖性，判断时间走向^[24]，计算公式如下：

$$R(T)/S(T) = (mT)^H \quad (3)$$

$$R(T) = \max_{1 \leq t \leq T} X(t, T) - \min_{1 \leq t \leq T} X(t, T) \quad (4)$$

$$S(T) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (NDVI_t - \overline{NDVI}_T)^2} \quad (5)$$

$$X(t, T) = \sum_{i=1}^T (NDVI_i - \overline{NDVI}_T) \quad (6)$$

$$\overline{NDVI}_T = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T NDVI_i \quad (7)$$

式中： H 为 Hurst 指数； $R(T)$ 为极差序列； $S(T)$ 为标准差序列； m 为常数，其值为 1； $X(t, T)$ 为累计离差； $NDVI_t$ ($t=1, 2, \dots, n$) 为 NDVI 时间序列； \overline{NDVI}_T ($T=t, t+1, \dots, n$) 为 $NDVI_t$ 均值序列。

Hurst 指数（简记为 H ）值域为 0~1。其中， $0.5 < H < 1$ ，表明植被 NDVI 未来变化趋势与过去相同，且 H 值越趋向于 1，持续性越强，本研究将 H 分为弱（0.5~0.7）、中（0.7~0.9）、强（0.9~1）同向持续^[25]； $H=0.5$ ，表明植被 NDVI 未来的变化趋势与过去无关； $0 < H < 0.5$ ，表明植被 NDVI 未来变化趋势与过去相反，且 H 值越趋向于 0，反持续性越强。

1.3.4 地理探测器

基于因子、生态、风险和交互探测的地理探测器是一种用于探测空间分异及解释背后驱动力的空间统计学方法^[18]，计算公式如下：

$$PD = 1 - \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 / N \sigma^2 \quad (8)$$

式中：PD 为气候因子对植被 NDVI 的解释力，值域为 0~1，值越大表示气候因子对植被 NDVI 解释力越强； h (1, 2, ..., L) 为变量分类或分区； N_h 和 N 分别为层 h 和区域单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是 h 层和区域内 Y 值的方差。在计算单个气候因子 PD 值基础上，计算 $PD(x_1)$ 、 $PD(x_2)$ 、 $PD(x_1 \cap x_2)$ 用于判断和说明气候因子共同作用（增加或减弱）和相互独立作用对植被 NDVI 的解释力。

$$F = \frac{N_{x_1} \times (N_{x_2} - 1) \times \sum_{h=1}^{L_1} N_h \sigma_h^2}{N_{x_2} \times (N_{x_1} - 1) \times \sum_{h=1}^{L_2} N_h \sigma_h^2} \quad (9)$$

式中： F 表示 F 统计量，用于比较两气候因子 x_1 和 x_2 对植被 NDVI 空间分布的影响是否有显著差异。 N_{x_1} 和 N_{x_2} 分别表示两个气候因子的样本量； L_1 和 L_2 分别表示 x_1 和 x_2 的分级数目。

$$t = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(Y_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(Y_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (10)$$

式中： t 为风险探测统计量，用于判断两个植被类型子区域间的 NDVI 均值是否有显著差别。 \bar{Y}_h 为子区域 h 内植被 NDVI 均值； n_h 为子区域 h 内样本数量； $\text{Var}(Y_h)$ 表示子区域 h 内植被 NDVI 方差。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型 NDVI 时空变化特征

由图 2 可以看出，2002—2019 年，黄土高原年均 NDVI 总体呈从西北向东南阶梯式递减的格局。第一阶梯位于高原西北部，NDVI 基本在 0.39 以下，主要植被类型是草原和荒漠。其中，鄂尔多斯高原、毛乌素沙地、宁夏北部地区、甘肃省靠近腾格里沙漠地区以草原和荒漠混合覆盖为主，NDVI 在 0.15~0.39；北部库布齐沙漠、乌兰布和沙漠以荒漠覆盖为主的地区，NDVI 小于 0.15。第二阶梯围绕在第一阶梯的东侧呈条带状分布，从山西西北部延伸到甘肃定西地区，NDVI 值为 0.39~0.57，植被覆盖类型以草原、草甸和栽培作物为主；进一步往东南方向，由温带向暖温带过渡，其植被类型以栽培作物、灌丛和草丛为主，NDVI 增大到 0.57 以上。第三阶梯位于黄土高原东部和南部，该区分布诸多山脉，如吕梁山、太行山、子午岭、秦岭、六盘山等是重要的自然保护区，植被类型以阔叶林和针叶林为主，NDVI 保持在 0.73 以上。

NDVI 的变异系数显示，黄土高原 NDVI 稳定程度较好，以轻度变异（0~0.1）和中度变异（0.1~1）为主。轻度变异地区植被区划以暖温带落叶阔叶林为主，植被类型主要为针叶林、阔叶林、灌丛和草丛；中度变异地区则以温带草原区域为主，植被覆盖类型为草原和荒漠。轻度变异和中度变异基本对应 NDVI<0.57 和>0.73 的地区。

根据 Slope 趋势分析结果将黄土高原植被动态变化分为 5 类：极显著减小、显著减小、极显著增大、显著增大、不显著变化。研究期间，黄土高原 NDVI 整体呈增加趋势，其中，草丛、落叶林和针叶林 NDVI 极显著增加和显著增加占比之和超过 70%；有 32.7% 区域的 NDVI 变化趋势不显著，主要植被类型为荒漠、草原和草甸；NDVI 极显著和显著降低趋势主要集中在人类密集居住的建成区，由于受到城市辐射效应的影响^[26]，栽培作物中 NDVI 显著降低和极显著降低趋势比例分别占 2.0% 和 1.2%，其余植被类型 NDVI 降低趋势比例均未超过 1%。

Hurst 指数表明，黄土高原 NDVI 时间序列以同向持续变化为主，所有植被类型 NDVI 同向持续变化占比均超过 90%，其中，草丛、阔叶林和针叶林 NDVI 的中、强同向持续变化占比之和超过 80%。NDVI 反向特征强于同向特征的地区主要集中在鄂尔多斯高原和主要城市周边地区，植被类型以草原、草甸和荒漠为主，NDVI 反向持续变化均超过 1.5%，表明植被可能出现退化现象。NDVI 呈反向变化特征的区域主要对应变化趋势不显著区域，进一步验证了黄土高原 NDVI 变化趋势。

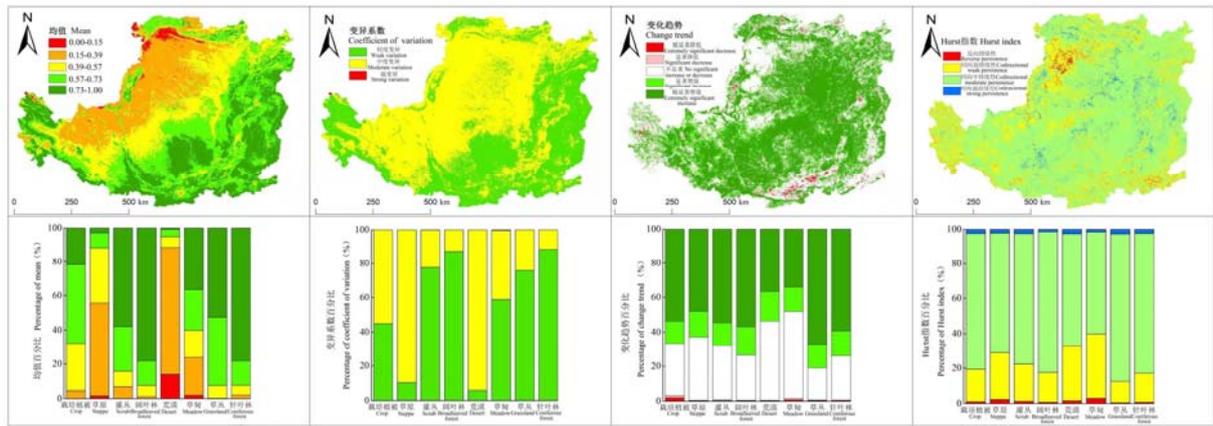


图 2 2002—2019 年黄土高原 NDVI 均值、变异系数、变化趋势及 Hurst 指数的空间分布特征及不同植被类型所占比例
 Fig.2 Spatial distribution characteristics of mean value, coefficient of variation (CV), change trend, Hurst index of normalized difference vegetation index (NDVI) and their percentage of different vegetation types in the Loess Plateau from 2002 to 2019.

CV: 栽培作物 Crop; ST: 草原 Steppe; SC: 灌丛 Scrub; BF: 阔叶林 Broadleaved forest; DE: 荒漠 Desert; ME: 草甸 Meadow; GL: 草丛 Grassland; CF: 针叶林 Coniferous forest.

2.2 不同植被类型对气候因子的响应

2.2.1 探测因子影响力

黄土高原全年不同气候因子及植被类型对 NDVI 的解释力 (PD 值) 排序为: 水汽压>降水量>气温>相对湿度>植被类型>气压>风速>日照, 且均通过显著性检验。其中, 水汽压因子解释力达到 0.46 以上, 降水量、气温、相对湿度和植被类型因子解释力均超过 0.20, 气压、日照和风速因子解释力较小, 均在 0.10 以下。植被主要生长期 PD 值与全年 PD 值差异显著。植被类型代替水汽压成为解释力最强的因子, PD 值为 0.34; 水汽压、降水、气温因子 PD 值均有不同程度降低, 其中, 水汽压因子 PD 值降幅 (31.9%) 最大; 相对湿度, 气压, 风速和日照因子 PD 值均呈上升趋势, 日照因子增幅最显著。说明气候因子对 NDVI 的影响随时间尺度的不同具有显著差异, 同时不同植被类型 NDVI 的差异性主要体现在植被生长期。

表1 黄土高原全年和生长期不同气象因子、植被类型的PD值

Table 1 PD values of meteorological factors and vegetation types through the whole year, and that in the growing season in the Loess Plateau

气候因子 Climatic factor	全年 Whole year	生长期 Growing season
X1	0.03**	0.17**
X2	0.04**	0.11**
X3	0.09**	0.15**
X4	0.47**	0.32**
X5	0.23**	0.25**
X6	0.37**	0.27**
X7	0.34**	0.27**
X8	0.20**	0.34**

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. X1: 日照时长 Sunshine duration; X2: 风速 Wind speed; X3: 气压 Atmospheric pressure; X4: 水汽压 Water vapor; X5: 相对湿度 Relative humidity; X6: 降水量 Precipitation; X7: 气温 Air temperature; X8: 植被类型 Vegetation type. 下同 The same below.

2.2.2 不同植被类型生长期气候因子影响力差异

不同植被类型主要生长期气候因子 PD 值差异显著 (表 2)。对于栽培作物, 水汽压的解释力最强, 为 0.40, 日照、风速和气压的解释力相对较小, 其中, 风速的解释力为所有植被类型中风速解释力的最小值。草原和荒漠的气候因子解释力变化趋势相近, 其差异主要体现在气压, 后者气压 PD 值比前者大 0.24。对于灌丛, 水汽压的解释力最强, 气压的解释力最弱。阔叶林和针叶林气候因子解释力变化趋势保持一致, 仅在气温的解释力上差异显著, 针叶林的气温 PD 值比阔叶林大 0.08。对于草

甸，水汽压和气温的解释力均超过 0.70，为该植被类型的主要影响因子。草丛中气压、水汽压和气温的解释力较强。

表2 不同植被类型主要生长期气象因子的PD值

Table 2 PD values of meteorological factors of different vegetations in the growing season

植被类型 Vegetation type	气象因子 Meteorological factor						
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7
栽培作物 Crop	0.10**	0.07**	0.13**	0.39**	0.23**	0.24**	0.22**
草原 Steppe	0.14**	0.13**	0.04**	0.26**	0.29**	0.22**	0.29**
灌丛 Shrub	0.16**	0.11**	0.06**	0.28**	0.25**	0.26**	0.11**
阔叶林 Broadleaved forest	0.20**	0.13**	0.16**	0.62**	0.16**	0.15**	0.62**
荒漠 Desert	0.12	0.11**	0.28**	0.33**	0.34**	0.32**	0.29**
草甸 Meadow	0.11**	0.14**	0.18**	0.75**	0.17**	0.19**	0.70**
草丛 Grassland	0.02	0.10	0.46**	0.34	0.07**	0.20*	0.44**
针叶林 Coniferous forest	0.23	0.13	0.13*	0.60**	0.20**	0.18	0.71**

2.2.3 生长期气候因子交互探测结果

由图 3 可以看出，气象因子交互 PD 值均大于任何单个因子的 PD 值，说明因子交互作用表现为相互增强和非线性增强，不存在独立或减弱关系。其中，栽培作物、草原、荒漠、草甸中降水与气温呈非线性增强，而其余植被类型中降水与气温交互作用的 PD 值较其他气象因子交互作用 PD 值增幅显著，表明降水与气温交互协同作用对 NDVI 影响较大，进一步说明降水和气温是相互作用而非独立影响 NDVI 空间分布。草原和荒漠由于降水与水汽压的显著相关关系，造成水汽压与气温交互作用呈非线性增强，但 PD 值增幅较降水与气温小。荒漠和草原气候因子交互作用 PD 值较单一气象因子 PD 值呈显著增大趋势，其余类型交互作用 PD 值增大趋势不显著，表明草原和荒漠植被覆盖类型容易受到外界环境条件的影响，抗干扰能力较差。荒漠气压与降水、气压与气温均呈非线性增强趋势，表明气压与降水、气温的交互作用对荒漠 NDVI 变化有较大影响。针叶林中日照与气温呈非线性增强，进一步说明日照与气温交互是影响针叶林 NDVI 变化的主要因素。

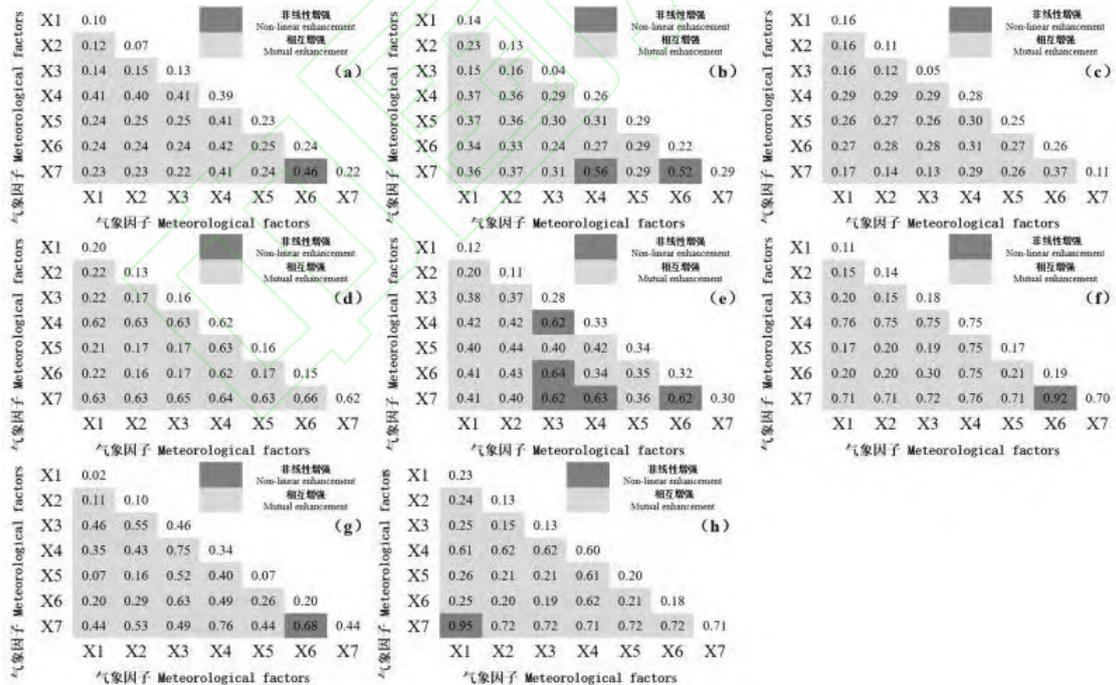


图3 栽培作物 (a)、草原 (b)、灌丛 (c)、阔叶林 (d)、荒漠 (e)、草甸 (f)、草丛 (g)、针叶林 (h) 各气象因子交互探测
Fig. 3 Interaction detector of meteorological factors in crop (a), steppe (b), shrub (c), broadleaved forest (d), desert (e), meadow (f), grassland (g), and coniferous forest (h).

NE: 非线性增强 Non-linear enhancement; LE: 线性增强 Linear enhancement.

2.2.4 生长期气候因子生态探测结果

由图 4 可以看出,除草原和荒漠外,水汽压、相对湿度、降水和气温对植被 NDVI 空间分布的影响均不具有显著差异,说明气候因子之间是相互作用而非独立影响 NDVI 空间分布。草原和荒漠气温与降水、气温与相对湿度对 NDVI 空间分布影响差异性较大,说明三者协同作用是影响草原和荒漠 NDVI 的主要因子。荒漠的气压与其余气象因子均显著影响 NDVI 空间分布,而草原的气压仅与水汽压、降水显著影响 NDVI 空间分布。阔叶林和针叶林的日照与其余气象因子(除阔叶林日照与气温)均显著影响 NDVI 空间分布,阔叶林与针叶林中气温的差异性显著,前者气温仅与风速显著影响 NDVI 空间分布,后者气温与日照、风速、气压均显著影响 NDVI。栽培作物区,气象因子对 NDVI 空间分布的影响均不具有显著性;日照、风速和气压分别对灌丛、草甸和草丛 NDVI 空间分布影响较大,与其余气象因子具有显著差异。

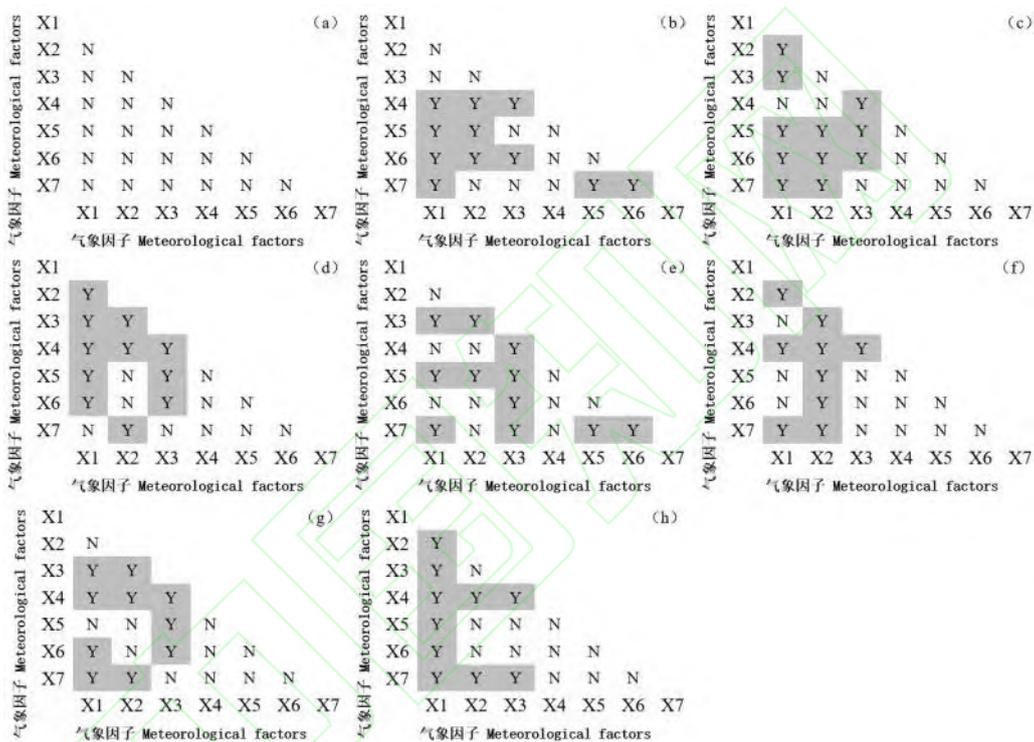


图 4 栽培作物 (a)、草原 (b)、灌丛 (c)、阔叶林 (d)、荒漠 (e)、草甸 (f)、草丛 (g)、针叶林 (h) 气象因子的生态探测结果
Fig.4 Ecological detector of meteorological factors in crop (a), steppe (b), shrub (c), broadleaved forest (d), desert (e), meadow (f), grassland (g), and coniferous forest (h).

Y: 有显著差异 Significant difference; N: 无显著差异 No significant difference.

3 讨 论

根据风险探测器探测结果可知,研究区不同植被覆盖类型 NDVI 均值由大到小依次为:针叶林、阔叶林、灌丛、草甸、草丛、栽培作物、草原和荒漠,其中,受到混合像元影响,栽培作物与草丛、灌丛与草甸的 NDVI 在空间分布上差异不显著,其余植被覆盖类型的 NDVI 空间分布差异显著(表 3)。可见植被覆盖类型对 NDVI 有直接影响。草原和荒漠主要分布在黄土高原西北部,该地区雨量少、蒸发量大、多风沙、气候条件较差,NDVI 值较小,其中,草原植被无论在数量还是覆盖程度上都显著高于荒漠^[27]。因此,草原植被的 NDVI 大于荒漠植被。草原和荒漠生态系统稳定性较差,植被容易受到外界环境影响而发生^[28], NDVI 变异系数较大、变化趋势不显著。

表3 不同植被类型风险探测结果
Table 3 Risk detector of different vegetations

植被类型 Vegetation type	栽培作物 Crop	草原 Steppe	灌丛 Shrub	阔叶林 Broadleaved forest	荒漠 Desert	草甸 Meadow	草丛 Grassland	针叶林 Coniferous forest
草原 Steppe	Y							
灌丛 Shrub	Y	Y						
阔叶林 Broadleaved forest	Y	Y	Y					
荒漠 Desert	Y	Y	Y	Y				
草甸 Meadow	Y	Y	N	Y	Y			
草丛 Grassland	N	Y	Y	Y	Y	Y		
针叶林 Coniferous forest	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	
NDVI 均值 NDVI mean	0.46	0.31	0.54	0.72	0.22	0.53	0.46	0.77

Y: 有显著差异 Significant difference; N: 无显著差异 No significant difference.

灌丛和栽培作物主要分布在温带草原和暖温带落叶区，气候条件相近。灌丛生境受人类活动干扰较小，能够维持较高的生物多样性、丰富度和生物量^[29]，其 NDVI 值高于栽培作物。灌丛和栽培作物占黄土高原总面积的 52.6%，地处两者过渡地带的草甸受到混合像元的影响，NDVI 变化趋势不显著。草丛主要分布在远离建成区的栽培作物附近且占比仅有 4.2%，同样受到混合像元影响，其 NDVI 变化趋势与栽培作物一致，两种植被覆盖类型 NDVI 空间差异不显著。针叶林和阔叶林主要分布在吕梁山、太行山、子午岭、秦岭、六盘山等重要的自然保护区，该区域生态系统稳定性较好^[30]，自我修复能力较强，加之降水量丰富，NDVI 值较大，针叶林植被在非生长期衰败尺度低于阔叶林植被^[31]，造成生长期针叶林植被 NDVI 大于阔叶林植被。受到城市辐射效应对 NDVI 负反馈的影响^[26]，在建成区及周边地区的 NDVI 呈显著和极显著下降趋势。由表 4 可以看出，不同植被类型主要生长期 NDVI 均值随时间均呈显著增长趋势，NDVI 增长率最大值（年均 0.07）出现在阔叶林，针叶林、灌丛、草甸、草丛、栽培作物和草原分别为年均 0.062、0.058、0.051、0.046、0.041 和 0.035，荒漠 NDVI 增长率最低，年均 0.022。由此可知，建成区及周边地区 NDVI 下降仅发生在局部范围内，黄土高原不同植被类型整体仍以增长趋势为主。

表4 不同植被类型时间序列和主要生育期NDVI均值的线性回归

Table 4 Linear regression between time series and the mean of NDVI for different vegetations in the growing season

植被类型 Vegetation type	面积占比 Area percentage (%)	回归方程 Equation of regression	R ²	P
栽培作物 Crop	45.0	y=0.0041x-10.193	0.83	0.01
草原 Steppe	24.4	y=0.0035x-9.125	0.61	0.01
灌丛 Shrub	7.6	y=0.0058x-8.241	0.88	0.01
阔叶林 Broadleaved forest	5.7	y=0.007x-6.453	0.91	0.01
荒漠 Desert	5.2	y=0.0022x-8.517	0.58	0.01
草甸 Meadow	4.4	y=0.0051x-6.017	0.50	0.01
草丛 Grassland	4.2	y=0.0046x-5.917	0.76	0.01
针叶林 Coniferous forest	3.2	y=0.0062x-2.342	0.75	0.01

x: 年 Year ;y: NDVI.

降水是植被生长的主要限制因子，对于植被的空间分布具有决定意义^[17,32]；气温的升高会加速地表蒸散发过程，间接导致了土壤水分的缺失，造成土壤干层的发育，对植被生长产生明显的抑制作用^[16]。多数研究认为，降水和气温是影响黄土高原植被 NDVI 的主要因素。但却忽略了两对植被的共同影响作用，这种影响作用是一个复杂的响应过程，并不存在严格统计标准的线性关系^[18]。黄土高原地区实际水汽压与降水量存在二次多项关系^[33]，在降水量大的地区和季节，水汽压较大，减缓地表蒸散发^[34]，通过这种间接影响降水和气温的方式，水汽压成为对 NDVI 解释力最大的气象因子。相对湿度是降水量与气温交互作用的产物，能间接反映该地区水分条件，解释力较大。在阔叶林和针叶林等气候特征以高湿、日照时间短为主的地区，相对湿度解释力较差，日照的解释力较好，同时受地形影响，海拔较高地区的气温限制作用更加显著^[35]，造成针叶林气温 PD 值大于阔叶林气温 PD 值。黄土高原区草丛位于太原盆地、临汾盆地、运城盆地、洛阳盆地及关中平原四周海拔较高处，受地形起伏影响，较大的高差造成气压偏低，成为草丛植被生长的限制性因素，地处西北干旱区的荒漠受海拔

影响, 气压较草原低, 比热较小, 水汽蒸发量大, 影响植被生长^[36]。分布在黄土高原中北部的灌丛主要包括农地退耕后期存在的天然植物群落细裂叶莲蒿 (*Artemisia gmelinii*) 和人工群落柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*), 其花期受日照影响较大^[37]; 黄土高原北部平均风速大于 $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 局部地区超过 $3.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 较大的风速导致强烈的蒸散, 土壤含水量下降产生水分胁迫, 不利于草甸地上净初级生产力 (aboveground net primary production, ANPP) 的积累, 影响草甸 NDVI^[38]。

4 结 论

2002—2019 年, 黄土高原不同植被类型 NDVI 以增长趋势和同向持续性为主, 同向持续性占比均超过 95%, 植被主要生长期 NDVI 增长趋势从大到小依次为: 阔叶林>针叶林>灌丛>草甸>草丛>栽培作物>草原>荒漠, 其中, 阔叶林增幅最大, 年均 0.07, 荒漠增幅最小, 年均 0.02。受到城市辐射效应对 NDVI 的负反馈影响, 仅在建成区及周边 NDVI 呈显著和极显著下降趋势。草原、草甸和荒漠反向持续性占比超过 1.5%, 可能出现退化现象

相比全年, 植被类型在主要生长期 (4—10 月) 对 NDVI 的影响作用较大。在植被主要生长期, 除受混合像元影响较大的草丛和草甸外, 其余植被类型 NDVI 空间差异性显著, NDVI 均值由大到小依次为针叶林>阔叶林>灌丛>草甸>草丛>栽培作物>草原>荒漠。因此, 选择不同植被主要生长期时间尺度更有利于揭示气候对植被的作用机制。

黄土高原全区 NDVI 主要生长期气候因子解释力依次为水汽压、降水、气温、相对湿度、日照、气压和风速且气候因子交互作用显著, 为相互增强和非线性增强, 不存在独立或减弱关系。在生境脆弱的草原和荒漠, 气象因子的交互作用更加突出。降水与气温协同作用对不同植被类型均有较大影响。水汽压、相对湿度、日照、气压和风速则通过间接影响水热条件, 对 NDVI 产生不同解释力。

责任编辑 杨 弘

参考文献

- [1] 郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别. 地理学报, 2021, 76 (3): 726-739 [Guo F-Y, Tong L-J, Qiu F-D, et al. Spatio-temporal differentiation characteristics and influencing factors of green development in the eco-economic corridor of the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76 (3): 726-739]
- [2] Xiu LN, Yao XJ, Chen MD, et al. Effect of ecological construction engineering on vegetation restoration: A case study of the Loess Plateau. *Remote Sensing*, 2021, 13: 1407-1433
- [3] 牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响. 农业工程学报, 2019, 35 (2): 134-143 [Niu Y-B, Gao Z-L, Qi X-Y, et al. Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35 (2): 134-143]
- [4] 江忠善, 王志强, 刘志. 黄土丘陵区小流域土壤侵蚀空间变化定量研究. 水土保持学报, 1996, 2 (1): 1-9 [Jiang S-Z, Wang Z-Q, Liu Z. Quantitative study on spatial variation of soil erosion in a small watershed in the Loess Hilly Region. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1996, 2 (1): 1-9]
- [5] Zhang XP, Lin PF, Chen H, et al. Understanding land use and cover change impacts on run-off and sediment load at flood events on the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, 2018, 32: 576-589
- [6] Zhu X, He H, Zhang SX, et al. Interactive effects of climatic factors on seasonal vegetation dynamics in the central Loess Plateau, China. *Forests*, 2019, 10: 1071-1094
- [7] 高海东, 庞国伟, 李占斌, 等. 黄土高原植被恢复潜力研究. 地理学报, 2017, 72 (5): 863-874 [Gao H-D, Pang G-W, Li Z-B, et al. Evaluating the potential of vegetation restoration in the Loess Plateau. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (5): 863-874]
- [8] Zhou ZC, Shanguan ZP, Zhao D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China. *Ecological Modelling*, 2006, 198: 263-268
- [9] Wang QX, Fan XH, Qin ZD, et al. Change trends of temperature and precipitation in the Loess Plateau Region of China, 1961-2010. *Global and Planetary Change*, 2012, 92-93: 138-147
- [10] 刘静, 温仲明, 刚成诚. 黄土高原不同植被覆盖类型 NDVI 对气候变化的响应. 生态学报, 2020, 40 (2): 678-691 [Liu J, Wen Z-M, Gang C-C. Normalized difference vegetation index of different vegetation cover types and its responses to climate change in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (2): 678-691]
- [11] 张翀, 任志远, 李小燕. 黄土高原植被对气温和降水的响应. 中国农业科学, 2012, 45 (20): 4205-4215 [Zhang C, Ren Z-Y, Li X-Y. Research on vegetation response to temperature and precipitation in Loess Plateau. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (20): 4205-4215]
- [12] Lamchin MH, Lee WK, Jeon SW, et al. Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1089-1095
- [13] 李茂华, 都金康, 李皖彤, 等. 1982—2015 年全球植被变化及其与温度和降水的关系. 地理科学, 2020, 40 (5): 823-832 [Li M-H, Du J-K, Li W-T, et al. Global vegetation change and its relationship with precipitation and temperature based on

- GLASS-LAI in 1982-2015. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40 (5): 823-832]
- [14] 赵倩倩, 张京朋, 赵天保, 等. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应. 高原气象, 2021, 40 (2): 292-301 [Zhao Q-Q, Zhang J-P, Zhao T-B, et al. Vegetation changes and its response to climate change in China since 2000. *Plateau Meteorology*, 2021, 40 (2): 292-301]
- [15] Sun WY, Song XY, Mu XM, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209-210: 87-99
- [16] 张含玉, 方怒放, 史志华. 黄土高原植被覆盖时空变化及其对气候因子的响应. 生态学报, 2016, 36 (13): 3960-3968 [Zhang H-Y, Fang N-F, Shi Z-H. Spatio-temporal patterns for the NDVI and its responses to climatic factors in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36 (13): 3960-3968]
- [17] 信忠保, 许炳心, 马元旭. 近 50 年黄土高原侵蚀性降水的时空变化特征. 地理科学, 2009, 29 (1): 98-104 [Xin Z-B, Xu J-X, Ma Y-X. Spatio-temporal variation of erosive precipitation in Loess Plateau during past 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29 (1): 98-104]
- [18] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116-134]
- [19] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. 地理学报, 2019, 74 (9): 1758-1776 [Peng W-F, Zhang D-M, Luo Y-M, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74 (9): 1758-1776]
- [20] Li Z, Zheng FL, Liu WZ, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007. *Quaternary International*, 2010, 226: 92-100
- [21] 侯学煜. 1: 1, 000, 000 中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001 [Hou X-Y. 1: 1 Million Vegetation Map of China. Beijing: Science Press, 2001]
- [22] 王建邦, 赵军, 李传华, 等. 2001—2015 年中国植被覆盖人为影响的时空格局. 地理学报, 2019, 74 (3): 504-519 [Wang J-B, Zhao J, Li C-H, et al. The spatial-temporal patterns of the impact of human activities on vegetation coverage in China from 2001 to 2015. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74 (3): 504-519]
- [23] Koju UA, Zhang JH, Maharjan S, et al. Analysis of spatiotemporal dynamics of forest net primary productivity of Nepal during 2000-2015. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41: 4336-4364
- [24] 张志强, 刘欢, 左其亭, 等. 2000—2019 年黄河流域植被覆盖度时空变化. 资源科学, 2021, 43 (4): 849-858 [Zhang Z-Q, Liu H, Zuo Q-T, et al. Spatiotemporal change of fractional vegetation cover in the Yellow River Basin during 2000-2019. *Resources Science*, 2021, 43 (4): 849-858]
- [25] Chen JH, Yan F, Lu Q, et al. Spatiotemporal variation of vegetation on the Qinghai-Tibet Plateau and the influence of climatic factors and human activities on vegetation trend (2000-2019). *Remote Sensing*, 2020, 12: 3150-3172
- [26] He P, Xu LS, Liu ZC, et al. Regional sustainability dynamics of NDVI and its influencing factors in the Chinese Loess Plateau during 2002-2018. *Regional Sustainability*, 2021, 2: 36-46
- [27] Shi P, Qin YL, Zhu TT, et al. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 507-553
- [28] Fan XG, Ma ZG, Yang Q, et al. Land use/land cover changes and regional climate over the Loess Plateau during 2001-2009. Part I: Observational evidence. *Climatic Change*, 2015, 129: 427-440
- [29] 胡健, 胡金娇, 吕一河. 基于黄土高原关键带类型的土地利用和年径流产沙关系空间分异研究. 生态学报, 2021, 41 (16): 6417-6429 [Hu J, Hu J-J, Lyu Y-H. Spatial variation of the relationship between annual runoff and sediment yield and land uses based on the regional critical zone differentiation in the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41 (16): 6417-6429]
- [30] Timilsena J, Piechota T, Tootle G, et al. Associations of interdecadal/interannual climate variability and long-term Colorado river basin streamflow. *Journal of Hydrology*, 2009, 365: 289-301
- [31] 董镫, 尹冬勤, 李渊, 等. 黄土高原植被的时空变化及其驱动力分析研究. 中国农业大学学报, 2020, 25 (8): 120-131 [Dong Y, Yin D-Q, Li Y, et al. Spatio-temporal patterns of vegetation change and driving forces in the Loess Plateau. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25 (8): 120-131]
- [32] 李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. 生态学报, 2003, 23 (1): 82-89 [Li B, Zhang J-T. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23 (1): 82-89]
- [33] 王研峰, 尹宪志, 黄武斌, 等. 黄土高原半干旱地区大气可降水量研究. 冰川冻土, 2015, 37 (3): 643-649 [Wang Y-F, Yin X-Z, Huang W-B, et al. Study of the precipitable water over the semi-arid regions of the Loess Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37 (3): 643-649]
- [34] 张鹏飞, 赵光举, 穆兴民, 等. 渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素. 干旱区研究, 2019, 36 (4): 973-979 [Zhang P-F, Zhao G-J, Mu X-M, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of pan evaporation in the Weihe River Basin. *Arid Zone Research*, 2019, 36 (4): 973-979]
- [35] 覃巧婷, 陈建军, 杨艳萍, 等. 黄河源区植被时空变化及其对地形和气候的响应. 中国环境科学, 2021, 41 (8): 3832-3841 [Qin Q-T, Chen J-J, Yang Y-P, et al. Spatial and temporal variations of vegetation and its response to topography and climate in the source region of the Yellow River. *China Environmental Science*, 2021, 41 (8): 3832-3841]
- [36] Li P, Wang J, Liu MM, et al. Spatio-temporal variation characteristics of NDVI and its response to climate on the Loess Plateau from 1985 to 2015. *Catena*, 2021, 203: 331-342
- [37] Jiang HL, Xu X, Guan MX, et al. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastoral transitional zone of northern China from 2000 to 2015. *Science of The Total Environment*, 2020, 718: 871-908
- [38] Gardiner B, Berry P, Moulia B. Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Sciences*, 2016, 245: 94-118