

DOI: 10.5846/stxb202012013070

陈玉兰, 焦菊英, 田红卫, 徐倩, 冯兰茜, 王楠, 白雷超, 杨雪. 黄土高原归一化植被指数与自然环因子的空间关联性——基于地理探测器. 生态学报, 2022, 42(9): 3569-3580.

Chen Y L, Jiao J Y, Tian H W, Xu Q, Feng L Q, Wang N, Bai L C, Yang X. Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3569-3580.

# 黄土高原归一化植被指数与自然环因子的空间关联性

——基于地理探测器

陈玉兰<sup>1, 2</sup>, 焦菊英<sup>1, 4, \*</sup>, 田红卫<sup>3</sup>, 徐倩<sup>4</sup>, 冯兰茜<sup>2</sup>, 王楠<sup>1, 2</sup>, 白雷超<sup>4</sup>, 杨雪<sup>1, 3</sup>

1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 榆林市气象局, 榆林 719000

4 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 植被对改善黄土高原脆弱的生态环境有着关键作用, 系统研究黄土高原归一化植被指数(NDVI)空间分布和环境因子的空间关联性, 可为新时代黄土高原植被高质量发展提供科学依据。以黄土高原 2000—2017 年年均植被 NDVI 为研究对象, 选取气候要素、地形因素、土壤类型和植被类型等自然环境因子, 运用 GIS 和地理探测器技术手段, 在剔除土地利用类型发生变化栅格的基础上, 研究黄土高原年均 NDVI 与环境因子的空间关联性, 结果表明: 2000—2017 年黄土高原年均 NDVI 值在 0.016—0.72 之间, 呈地带性分布, 由西北部向东南部逐渐升高, 大于 0.3 的区域占 50.23%; 2000—2017 年黄土高原年均植被 NDVI 分布具有空间异质性, 且在不同植被区、地貌区、土壤区和气候区中, NDVI 空间分布的主要环境驱动因子具有差异性。年均降雨量对 NDVI 空间分布具有强解释力, 是黄土高原 85.20% 的区域植被生长的主要制约因子; 约 12.01% 的区域主要受土壤类型影响, 为中等解释力, 其余区域的植被生长主要受年均气温、日照时数或海拔影响。建议综合考虑不同环境条件下植被 NDVI 的空间分布与环境影响因子的空间关联性, 明确不同区域中植被 NDVI 的环境制约因子, 以制约因子定植, 在防止土壤干燥化、贫瘠化的前提下, 提高植被覆盖率和生物多样性, 以期促进黄土高原植被建设高质量发展。

**关键词:** 黄土高原; 地理探测器; 归一化植被指数; 自然环境因子; 空间关联性

## Spatial correlation analysis between vegetation NDVI and natural environmental factors based on geographical detector on the Loess Plateau

CHEN Yulan<sup>1, 2</sup>, JIAO Juying<sup>1, 4, \*</sup>, TIAN Hongwei<sup>3</sup>, XU Qian<sup>4</sup>, FENG Lanqian<sup>2</sup>, WANG Nan<sup>1, 2</sup>, BAI Leichao<sup>4</sup>, YANG Xue<sup>1, 3</sup>

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Yulin Meteorological Bureau in Shanxi, Yulin 719000, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Vegetation plays a key role in improving the fragile ecological environment of the Loess Plateau. The spatial correlation between normalized difference vegetation index (NDVI) spatial distribution and environmental factors can

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (41771319); 国家重点研发计划项目 (2016YFC0501604)

**收稿日期:** 2020-12-01; **采用日期:** 2021-09-28

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jyjiao@ms.iswc.ac.cn

provide a scientific basis for the high-quality construction of vegetation on the Loess Plateau in the new era. In this study, the spatial correlation between natural environmental factors (climate, topography, soil types and vegetation types) and NDVI from 2000 to 2017 on the Loess Plateau was analyzed by GIS and geographical detector on the premise of eliminating the grid with changes in land use types. The results indicated: (1) from 2000 to 2017, the average annual NDVI on the Loess Plateau ranged from 0.016 to 0.72, which showed a gradually increasing zonal distribution from northwest to southeast, with 50.23% of the areas greater than 0.3. (2) The annual average vegetation NDVI distribution showed spatial heterogeneity, and climate factor and vegetation type had strong explanatory power on the spatial distribution of NDVI, followed by soil type, while topographic factor had weak explanation. (3) In the vegetation zones, different soil zones, geomorphic zones and climate zones, the main environmental driving factors of NDVI spatial distribution were different. The average annual rainfall was the main environmental driving factors of NDVI spatial distribution with different explanatory power in aridisols zones, desert soil zones, entisols zones and each geomorphic zones. In the rest of zones, the main environmental driving factors of NDVI spatial distribution were soil type, vegetation type, sunshine duration or relative humidity. (4) The average annual rainfall had a strong explanatory power in the spatial distribution of NDVI and was the main environmental restricted factor for 85.20% of regional vegetation growth on the Loess Plateau, with 12.01% mainly influenced by soil factors, and the rest of region was affected by annual average temperature, sunshine duration or elevation. In conclusion, there was a strong spatial correlation between environmental factors and vegetation NDVI distribution on the Loess Plateau. However, due to the complexity of the geographical process of the Loess Plateau, the spatial correlation between environmental factors and vegetation NDVI had significant differences under different environmental conditions. Therefore, it is necessary to determine plant types in vegetation construction according to the environmental restricted factors of NDVI spatial distribution. It will improve the vegetation coverage and biodiversity on the premise of preventing soil desiccation and impoverishment, and promote the high-quality development of vegetation construction and ecological environmental protection on the Loess Plateau.

**Key Words:** the Loess Plateau; geographical detector; NDVI; natural environmental factors; spatial correlation

黄土高原作为丝绸之路的起点区域,在我国社会经济发展和生态环境中有着重要的战略地位,然而黄土高原植被覆盖稀疏、人类活动频繁、水土流失严重,导致其生态环境十分脆弱。植被对改善该区生态环境有着关键作用<sup>[1]</sup>。植被是一个地区承接水文、连接土壤、沟通大气的重要“纽带”,植被生长的状态往往直接关乎地表生态系统的健康与否<sup>[2]</sup>,归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可以有效地反映植物生长的状态<sup>[3]</sup>,是评价一个地区生态环境健康的重要指标之一<sup>[4]</sup>。因此,探究黄土高原植被 NDVI 与环境因子的空间关联性,可为新时代黄土高原进行因地制宜地植被建设规划及生态文明建设提供重要的科学指导。

已有学者对黄土高原植被与环境因子的空间关联性进行探索和研究,并取得了一定的进展。例如,张文<sup>[5]</sup>指出西秦岭植被分布与地形要素、气候要素和土壤类型有较好的梯度关系;张翀等<sup>[6]</sup>研究发现,降雨量是黄土高原植被覆盖的直接影响因素,植被类型和地貌是黄土高原气温对植被覆盖影响的主要限制性因素;然而,由于黄土高原地理过程的复杂性,不同类型区植被覆盖变化对各环境因子的响应会存在差异。目前,已有学者探讨了不同气候区和植被类型区中,植被变化和气候变化的空间关联性,并发现黄土高原植被覆盖变化受气候驱动,驱动程度随气候分区和植被类型等的变化有所不同<sup>[7-9]</sup>。但是很少有学者对不同地貌类型区和土壤类型区中植被变化和气候变化的空间关联性进行研究。事实上,不同地貌对水热条件的分配作用存在较大的差异<sup>[10]</sup>,且不同土壤类型的理化性质不同,对环境变化的响应也有所不同<sup>[11]</sup>,导致不同地貌类型和土壤类型区中,环境因子对植被 NDVI 的影响存在差异。因此,对黄土高原不同环境条件下植被变化及其环境驱动因子的定量关系还需进一步研究。

相关研究分析植被 NDVI 与环境因子之间的空间关联性时,多数是通过回归、趋势和相关性分析进行的<sup>[5-9]</sup>,这些方法均是假设植被 NDVI 与环境因子存在显著的线性关系<sup>[12]</sup>;然而事实上,在植被生长对环境变化的复杂反应过程中,可能不存在严格的线性关系<sup>[13]</sup>。同时,环境因子间可能存在精确相关关系或高度相关关系而使模型估计失真或难以估计准确。地理探测器是揭示地理要素的空间分异性及其背后驱动因子的一种新的空间分析模型,不仅能够定量的分析各个因子所占的权重,还能分析多因子之间的交互作用<sup>[14]</sup>。此方法无线性假设,属于方差分析范畴,可以避免多重共线性问题,在计算驱动因子的贡献率时,其结果较为准确,且该模型既可以探测数值型数据,也可以探测定性数据<sup>[14]</sup>,因此地理探测器已在植被空间分异研究中广泛应用<sup>[12, 15]</sup>。

鉴于此,本文以 2000—2017 年黄土高原年均 NDVI 为研究对象,并基于前人相关研究及数据可获取性,选取气候要素、地形因素、土壤类型和植被类型等环境因子,运用 GIS 和地理探测器技术手段,在剔除土地利用类型发生变化栅格的基础上,研究黄土高原植被 NDVI 与各环境因子的空间关联性,以期为新时期黄土高原生态环境保护和植被建设高质量发展及后续相关政策的制定提供一定的启示。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

黄土高原(100°52′—114°33′E, 33°41′—41°16′N)位于我国西北地区,海拔在 850—5210 m 之间,东西绵延约 1000 km,南北跨度 750 km 左右,面积约 64 万 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。该区是世界上最大的黄土沉积区,发育了世界上最典型的黄土层<sup>[16]</sup>,除了极少部分高山裸岩外,基本为细腻黄土、黏土颗粒,土质较疏松,抗冲抗蚀能力差,极易被分散和搬运;同时该区地形破碎,沟壑纵横,坡陡沟深,使得黄土高原水土流失非常严重<sup>[17]</sup>。该区气候类型属温带大陆性气候,气候四季分明,冬季和春季寒冷、干燥且多西北风<sup>[18]</sup>,夏季和秋季气候炎热且多极端降雨,多年平均降雨量为 200—800 mm,多年平均温度为 3.6—14.3℃,气温和降雨均呈现从东南向西北递减趋势<sup>[9]</sup>;植被分布受地形和气候的影响具有明显的地带性规律,呈现出由东南向西北,由森林到草原的水平地带性分布<sup>[6]</sup>。

### 1.2 数据来源

本研究所采用的数据主要包括 NDVI,地形、植被和土壤等数据,其中 2000—2017 年黄土高原月度植被 NDVI 空间分布数据集、土壤类型、植被类型和土地利用类型(2000、2018 年)等数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),分辨率均为 1 km;2000—2017 年气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>);从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获取 90 m 分辨率的黄土高原数字高程模型(DEM);黄土高原植被类型分区数据来源于黄土高原科学数据中心(<http://www.iswc.ac.cn/>)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 环境因子选取与分级

黄土高原自然环境复杂,植被的生长和分布受多种因素影响<sup>[1]</sup>。本文依据典型性、动态性、科学性、可量化性和可得性的原则选择指标体系,共选取了年平均降雨量、年均气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速、坡度、海拔、坡向、土壤类型和植被类型十个自然环境因子来探测环境对黄土高原植被 NDVI 的影响(表 1)。并基于 GIS 平台,利用自然断点法<sup>[19]</sup>将数值型的环境因子分成八个等级,进而将分级后的数据重采样到 1 km 的空间分辨率。同时,在黄土高原上使用 GIS 的渔网工具,生成 6186 个随机采样点。由于实施大规模的退耕还林(草)工程,黄土高原 2001—2016 年里耕地减少了 10939 km<sup>2</sup>,变化率为 -5.07%,林地总的增加面积为 14444 km<sup>2</sup>,变化率为 18.04%<sup>[8]</sup>。可见,退耕还林(草)工程显著地增加了植被覆盖度,然而本文只研究黄土高原植被 NDVI 与环境因子的空间关联性,鉴于此,本文剔除 2000—2018 年土地利用类型发生变化的点以消除退耕退耕还林(草)工程对植被 NDVI 的影响,最终生成 3668 个采样点。在此基础上,通过 GIS 的空间分析能力,将 3668 个采样点与黄土高原 2000—2017 年的年均植被 NDVI 和环境因子进行空间叠置,得到年均植被

NDVI 和环境因子的空间关联数据。

表 1 黄土高原环境因子选择

Table 1 Environmental factor selected in the Loess Plateau

类型 Type	因子 Factor	单位 Unit	编码 Code	分辨率 Resolution	来源 Source
气候 Climate	年平均降雨量	mm	$X_1$	1 km	中国气象数据网
	年均气温	℃	$X_2$	1 km	中国气象数据网
	平均相对湿度	%	$X_3$	1 km	中国气象数据网
	日照时数	h	$X_4$	1 km	中国气象数据网
	平均风速	m/s	$X_5$	1 km	中国气象数据网
地形 Topography	坡度	°	$X_6$	90 m	地理空间数据云
	海拔	m	$X_7$	90 m	地理空间数据云
	坡向	°	$X_8$	90 m	地理空间数据云
土壤 Soil	土壤类型	—	$X_9$	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心
植被 Vegetation	植被类型	—	$X_{10}$	1 km	中国科学院资源环境科学数据中心

### 1.3.2 不同环境类型分区

为了分析不同环境条件下植被变化和环境因子的空间关联性,对气候、地貌、土壤和植被 4 种环境类型的分区划分如下:

黄土高原气候分区采用郑景云等<sup>[20]</sup>对中国气候分区方案,将黄土高原分为干旱区、半干旱区和半湿润区三个气候区。

黄土高原地貌分区采用中国 1:100 万数字地貌制图规范方案<sup>[21]</sup>,本文为了方便研究,依据地形起伏度对黄土高原地貌类型进行划分,即平原( $\leq 30$  m)、台地(30—70 m)、丘陵(70—200 m)、小起伏山地(200—500 m)、中起伏山地(500—1000 m)、大起伏山地( $>1000$  m)。

黄土高原土壤分类采用传统的“土壤发生分类”系统,根据土壤形成的水热条件、岩性及盐碱的重大差异划分出 12 个土纲<sup>[11]</sup>,从中选取面积占比较大的 6 个土纲作为土壤类型分区对象,分别为半淋溶土、钙层土、干旱土、漠土、初育土和半水成土。

植被区划数据来源于黄土高原科学数据中心,自西北向东南依次为温带草原化荒漠地带、温带荒漠草原亚地带、温带典型草原亚地带、温带森林草原亚地带、暖温带北部落叶栎林亚地带和温带南部落叶栎林亚地带 6 个植被带。本文依据赵瑞东<sup>[8]</sup>的研究,将植被带合并成为 3 个植被区,前两个地带合并为荒漠区,中间两个地带合为草原区,后面的两个地带合为森林区。

### 1.3.3 地理探测器分析

地理探测器的理论核心是通过空间异质性来探测因变量与自变量之间分布格局的一致性,据此度量因变量对自变量的解释度,地理探测器可分为因子探测器和生态探测器等<sup>[14]</sup>,其中因子探测器可以探测变量  $Y$  的空间分层异质性,以及探测某因子  $X$  在多大程度上解释变量  $Y$  的空间分异,用  $q$  值度量,公式如下:

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

式中, $h=1, \dots, L$  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 和 SST 分别为层内方差之和与全区总方差。 $q$  的值域为 $[0, 1]$ ,值越大说明  $Y$  的空间分异性越明显;极端情况下, $q$  值为 1 表明因子  $X$  完全控制了  $Y$  的空间分布, $q$  值为 0 则表明因子  $X$  与  $Y$  没有任何关系。地理探测器使用  $P$  值来检验结果的显著性, $P$  值越小,表明结果越显著。本文依据 Muller<sup>[22]</sup>对相关系数的强弱划分,将解释力强弱划分为四种类型,其中当  $q$  小于 0.1,视为无解释力; $q$  值在

0.1 至 0.3 之间为弱解释力; $q$  值介于 0.3 至 0.5 之间为中等解释力; $q$  值大于 0.5 为强解释力。

生态探测器用于比较  $X_1$  和  $X_2$  对属性  $Y$  的空间分布的影响是否具有显著的差异,以  $F$  统计量来衡量:

$$F = \frac{n_{x1}(n_{x2} - 1) SSW_{x1}}{n_{x2}(n_{x1} - 1) SSW_{x2}} \quad (2)$$

式中,  $n_{x1}$  和  $n_{x2}$  分别为两个因子  $X_1$  和  $X_2$  的样本量; $SSW_{x1}$  和  $SSW_{x2}$  分别表示由  $X_1$  和  $X_2$  形成的层的层内方差之和;其中,零假设  $H_0: SSW_{x1} = SSW_{x2}$ 。如果在  $\alpha$  的显著性水平上拒绝  $H_0$ , 则表明两个因子  $X_1$  和  $X_2$  对属性  $Y$  空间分布的影响存在显著的差异<sup>[14]</sup>。

依据自然断点的结果,赋予每一个因子分类属性值,自变量为年均植被 NDVI,因变量为环境因子,将 3668 个采样点的年均植被 NDVI 和环境因子数据分别输入到地理探测器中,依次获得全区和分区中植被 NDVI 与环境因子的空间关联性结果。其中,利用因子探测器研究黄土高原全区和分区中植被 NDVI 的空间分布与环境因子的关系;利用生态探测器分析各个环境因子在黄土高原及其不同分区中对植被 NDVI 空间分布解释力的差异性。结合因子探测器和生态探测器可确定两个  $q$  值之间的是否具有显著的差异,进而确定各区植被 NDVI 的主要环境驱动因子及各因子对不同分区中植被 NDVI 空间分布的解释强弱。各区植被 NDVI 的主要环境驱动因子的解释力  $q$  值大于该区其它环境因子的解释力  $q$  值,且和该区其它环境因子对 NDVI 空间分布的影响相比,具有显著的差异性;各因子对不同分区中植被 NDVI 空间分布的解释强弱,用解释力  $q$  值的大小和差异性进行判别。例如,假设因子  $X$  在  $Z1$  和  $Z2$  两个分区中对 NDVI 空间分布的解释力分别为  $q_{zx1}$  和  $q_{zx2}$ ,若因子  $X$  在  $Z1$  和  $Z2$  区中对 NDVI 空间分布的影响不存在显著的差异性,则表明因子  $X$  在  $Z1$  和  $Z2$  区中对 NDVI 空间分布的解释力较为一致;若因子  $X$  在  $Z1$  和  $Z2$  区中对 NDVI 空间分布的影响具有显著的差异性,且  $q_{zx1}$  大于  $q_{zx2}$ , 则表明因子  $X$  在分区  $Z1$  中对 NDVI 空间分布的解释力大于  $Z2$ 。

### 1.3.4 NDVI 主要环境驱动因子判别

为研究黄土高原栅格单元尺度上 NDVI 的主要环境驱动因子,本研究利用加权线性组合<sup>[23]</sup>生成各环境因子对 NDVI 值的解释力  $q$  值分布图(图 1)。具体步骤如下:(1)计算权重:利用因子探测器获得不同类型分区对 NDVI 空间分布的解释力  $q_z$  值,并依据公式 3 对其进行归一化处理,将归一化后的  $q_z$  作为权重。(2)生成各环境因子的  $q$  值分布图:基于 GIS 平台,将不同类型分区的权重与其对应的环境因子的  $q$  值通过公式 4 进行组合,进而生成各环境因子的  $q$  值分布图。(3)筛选 NDVI 主要环境驱动因子:依据栅格单元内各环境因子  $q$  值的大小筛选出不同栅格单元内  $q$  值的最大值及其对应的环境因子,最终得出影响黄土高原植被 NDVI 分布的最主要环境因子空间分布图。判别所使用的公式如下:

$$q'_z = \frac{q_z}{\sum q_z} \quad (3)$$

$$q_{x,i} = \sum q'_z \times q_{zx,i} \quad (4)$$

$$q_{\max,i} = \max \{q_{x1,i}, q_{x2,i}, q_{x3,i}, q_{x4,i}, q_{x5,i}, q_{x6,i}, q_{x7,i}, q_{x8,i}, q_{x8,i}, q_{x10,i}\} \quad (5)$$

式中, $z$  为不同类型分区; $q_z$  为不同类型分区对植被 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值; $q'_z$  为  $q_z$  的归一化  $q$  值,即为权重; $x$  为环境因子类型; $q_{x,i}$  为  $x$  因子对第  $i$  处栅格单元上的 NDVI 值的解释力  $q$  值; $q_{zx,i}$  代表将  $i$  处栅格单元归于  $z$  分区中时  $x$  因子对第  $i$  处栅格单元上的 NDVI 值的解释力  $q$  值; $q_{\max,i}$  为第  $i$  处栅格单元上植被 NDVI 主要驱动因子的  $q$  值。

## 2 结果分析

### 2.1 NDVI 的空间变化特征

对黄土高原 2000—2017 年的年均植被 NDVI 的空间变化特征进行分析可知(图 2):黄土高原 2000—2017 年的年均植被 NDVI 值在 0.016—0.72 之间,呈地带性分布,由西北部向东南部逐渐升高。NDVI 小于 0.2 的区域占黄土高原总面积 22.18%,主要位于宁夏同心县以北、甘肃省兰州市以北等;NDVI 介于 0.2—0.3 范围

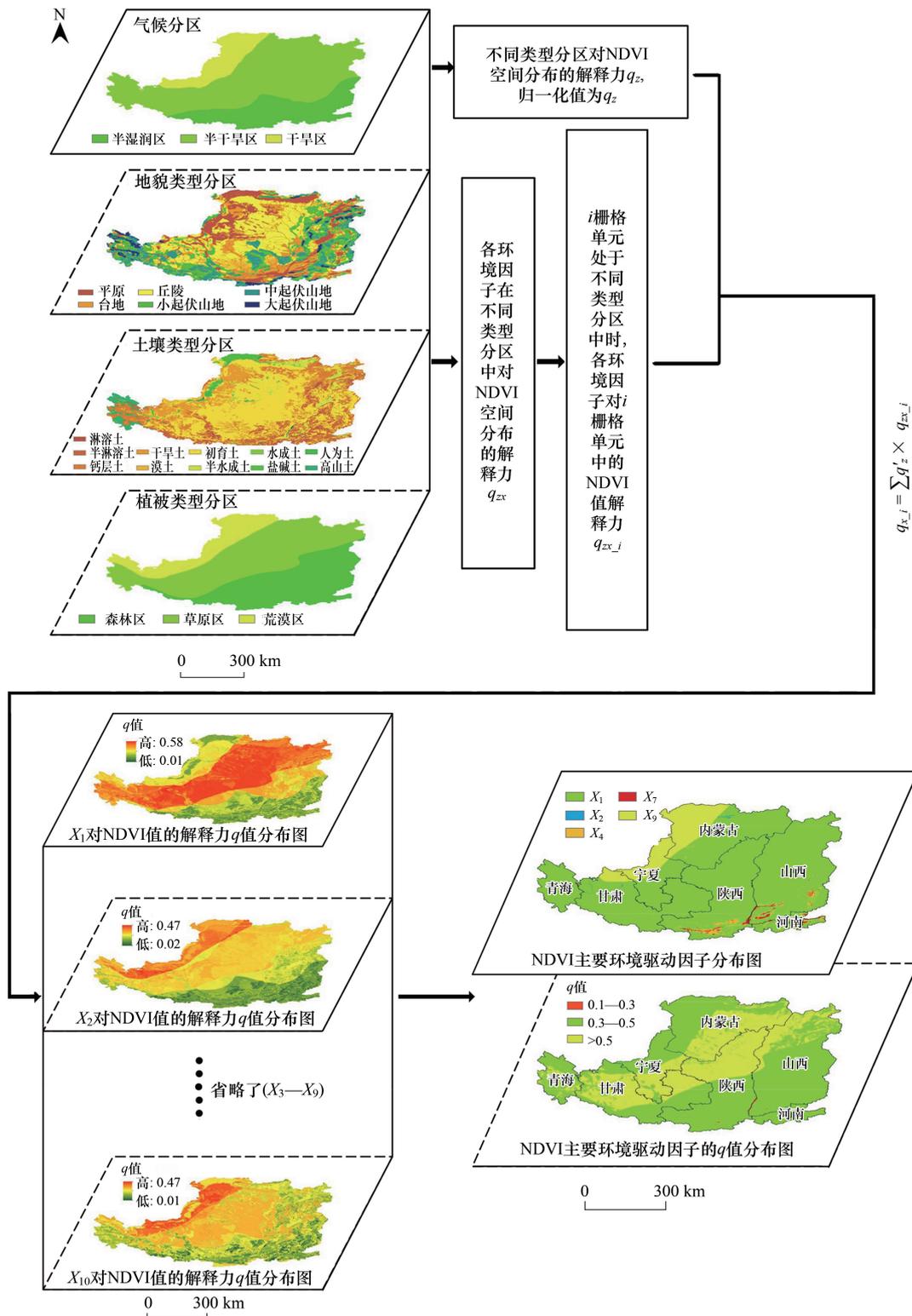


图1 黄土高原植被 NDVI 主要环境驱动因子判别技术路线图

Fig.1 Technical roadmap for distinguishing the main environmental driving factors of vegetation NDVI in the Loess Plateau

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

内的区域占黄土高原总面积的 27.60%, 主要位于内蒙古伊金霍洛旗以南和陕西安塞县以北等; NDVI 处于 0.3—0.4 范围内的区域占黄土高原总面积的 22.36%, 零散分布在青海西宁市以北和山西省武乡县等地; 黄土

高原东南部的 NDVI 较高 ( $>0.4$ ), 包括河南省北部和山西阳城县等, 约占黄土高原总面积的 27.87%。

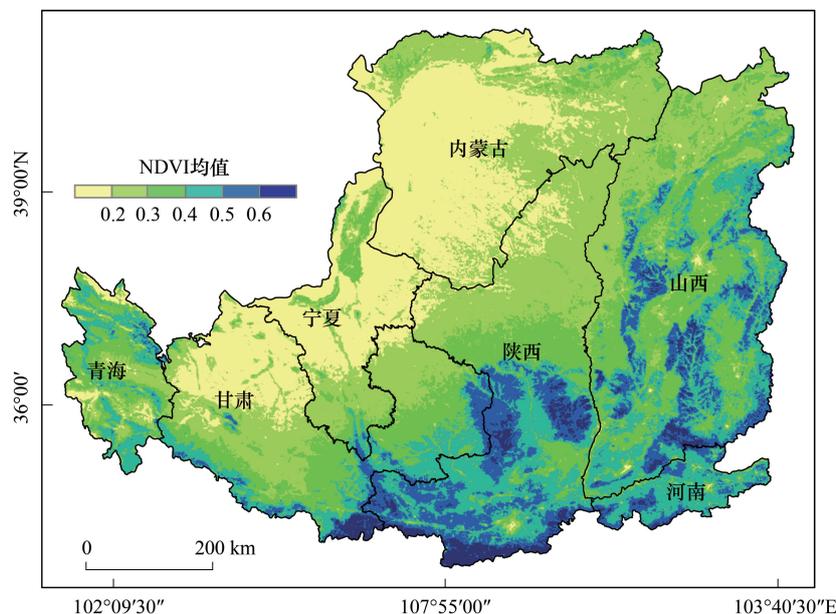


图 2 黄土高原 2000—2017 年年均植被 NDVI 空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of average annual vegetation NDVI in the Loess Plateau during 2000—2017

## 2.2 NDVI 与环境因子的关联性分析

### 2.2.1 全区因子驱动分析

对黄土高原 3668 个采样点的环境因子和 2000—2017 年年均 NDVI 的空间关联性及其差异性进行分析 (表 2); 各因子对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值的显著性检验  $P$  值均小于 0.001, 说明各环境因子的  $q$  值具有统计学意义, 其中, 年平均降雨量 ( $q=0.68$ )、日照时数 ( $q=0.63$ )、相对湿度 ( $q=0.54$ )、植被类型 ( $q=0.54$ ) 和年均气温 ( $q=0.51$ ) 对 NDVI 空间分布的解释等级为强解释力; 土壤类型 ( $q=0.30$ )、平均风速 ( $q=0.25$ )、坡度 ( $q=0.17$ ) 和海拔 ( $q=0.10$ ) 为弱解释力; 而坡向 ( $q=0.01$ ) 对 NDVI 空间分布无解释力 (表 2)。同时, 除植被类型与平均相对湿度对 NDVI 空间分布的影响不具有显著的差异性外, 其余环境因子间对 NDVI 空间分布的影响存在显著的差异。表明 2000—2017 年黄土高原年均植被 NDVI 分布具有空间异质性, 且气候因子和植被类型对黄土高原 NDVI 空间分布具有较强的解释力, 而地形因子和土壤类型对 NDVI 空间分布解释较弱。

表 2 环境因子对黄土高原植被 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值

Table 2 The explanatory power  $q$  value of environmental factors on the spatial distribution of vegetation NDVI in the Loess Plateau

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$q$	0.68 <sup>a</sup>	0.51 <sup>d</sup>	0.54 <sup>c</sup>	0.63 <sup>b</sup>	0.25 <sup>f</sup>	0.17 <sup>e</sup>	0.10 <sup>h</sup>	0.01 <sup>i</sup>	0.30 <sup>e</sup>	0.54 <sup>c</sup>
$P$	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000

不同小写字母表示不同环境因子间差异显著 ( $P<0.05$ )

### 2.2.2 分区因子驱动分析

鉴于黄土高原全区 2000—2017 年年均植被 NDVI 空间分布具有较强的异质性, 利用地理探测器, 分析不同植被区、地貌区、土壤区和气候区中采样点的植被 NDVI 空间分布与环境因子的关联性, 进一步识别环境因子对植被 NDVI 影响的差异性。

#### (1) 植被区

从图 3 可知, 在森林区中, 主要的环境驱动因子为植被类型,  $q$  值为 0.34, 解释等级为中等解释力; 在草原

区中,日照时数和年降水量是主要的环境驱动因子, $q$  值分别为 0.44 和 0.41,解释等级均为中等解释力;在荒漠区中,土壤类型和植被类型是主要的环境驱动因子, $q$  值分别为 0.51 和 0.48,解释力等级分别为强解释力和中等解释力,对 NDVI 的空间分布有较强的驱动作用。在不同植被区中,气候因子在草原区中对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值显著高于荒漠区和森林区;植被类型和土壤类型在荒漠区中对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值显著高于草原区和森林区。

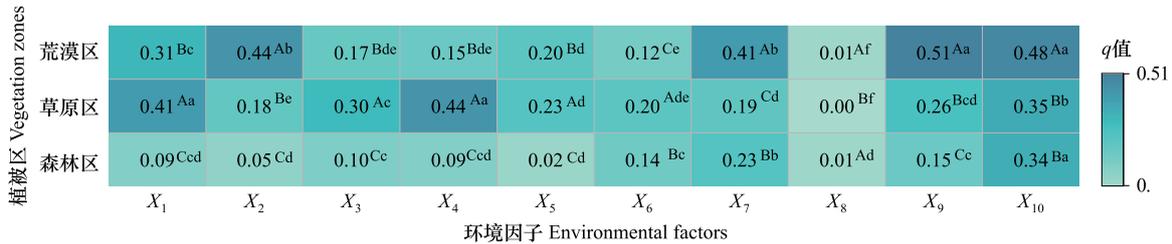


图 3 环境因子对黄土高原不同植被区中植被 NDVI 的解释力  $q$  值及其差异性

Fig.3 The explanatory power  $q$  value and its differences of environmental factors on the spatial distribution of vegetation NDVI in different vegetation zones of the Loess Plateau

不同大写字母表示同一环境因子在不同区中差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示不同环境因子在同一区中差异显著 ( $P < 0.05$ )

(2) 地貌区

由图 4 可知,年平均降雨量是各地貌区中 NDVI 空间分布的主要环境驱动因子,对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值均高于 0.60,解释等级均为强解释力,其空间关联性在不同地貌类型区间具有显著的差异性,在台地中,年平均降雨量对 NDVI 空间分布的驱动作用较强, $q$  值为 0.83,而在中起伏山地中较弱, $q$  值为 0.61。在不同地貌区间,除年均风速外,其余气候因子在台地中的解释力  $q$  值显著高于其它地貌区,同时,除年均气温外,其余气候因子在中起伏山中的解释力  $q$  值显著低于其它地貌区;土壤类型和植被类型在大起伏山地中的解释力  $q$  值显著高于其余地貌区,但在小起伏山地中显著低于其它地貌区;海拔在平原中对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值显著高于其它地貌区。

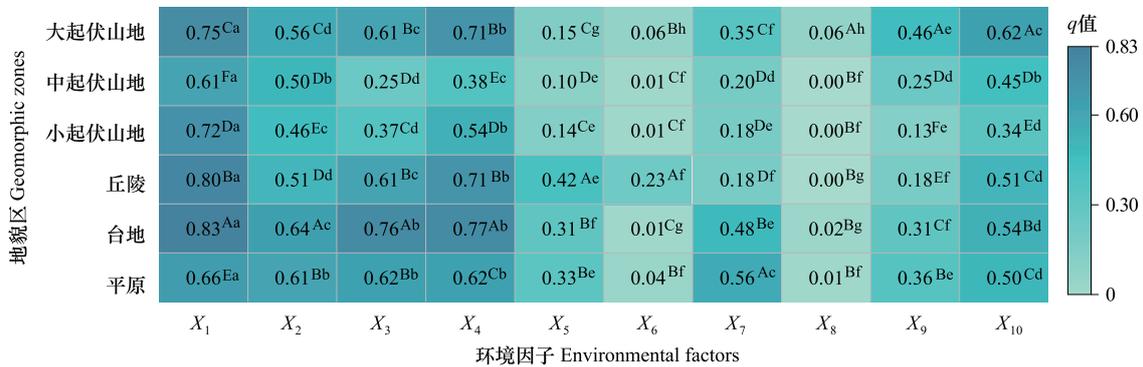


图 4 环境因子对黄土高原不同地貌区中植被 NDVI 的解释力  $q$  值及其差异性

Fig.4 The explanatory power  $q$  value and its differences of environmental factors on the spatial distribution of vegetation NDVI in different geomorphic zones of the Loess Plateau

(3) 土壤区

由图 5 可知,在半淋溶土中,年平均降雨量和日照时数是 NDVI 空间分布的主要环境驱动因子, $q$  值均为 0.23,均为弱解释力;在钙层土中,NDVI 空间分布的主要环境驱动因子是年平均降雨量和日照时数, $q$  值分别为 0.55 和 0.56,均为强解释力;在干旱土、漠土和初育土中,NDVI 空间分布的主要环境驱动因子均为年平均

降雨量,  $q$  值均大于 0.7, 为强解释力; 在半水成土中, 日照时数和相对湿度是 NDVI 空间分布的主要环境驱动因子,  $q$  值分别为 0.66 和 0.63, 均为强解释力。在不同土壤区中, 年平均降雨量、年平均气温、日照时数、坡度和植被类型在干旱土中对 NDVI 空间分布的解释力  $q$  值显著高于其它土壤区, 而气候因子和植被类型在半淋溶土中解释力  $q$  值显著低于其它土壤区; 海拔在半水成土中的解释力  $q$  值显著高于其它土壤区。

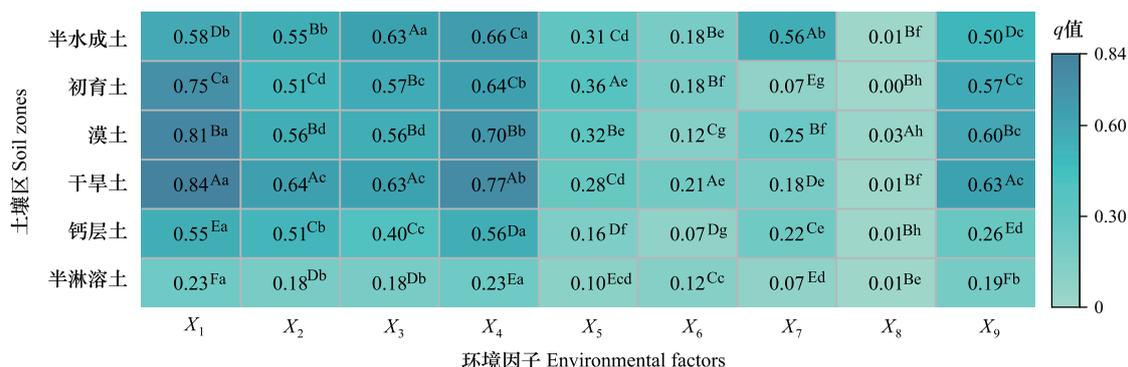


图 5 环境因子对黄土高原不同土壤区中植被 NDVI 的解释力  $q$  值及其差异性

Fig.5 The explanatory power  $q$  value and its differences of environmental factors on the spatial distribution of vegetation NDVI in different soil zones of the Loess Plateau

#### (4) 气候区

由图 6 可知, 在半湿润地区中, 主要的环境驱动因子为植被类型,  $q$  值为 0.38, 为中等解释力; 在半干旱区中, 年降雨量是主要的环境驱动因子,  $q$  值为 0.47, 为中等解释力; 在干旱区中, 土壤类型和植被类型的  $q$  值分别为 0.54 和 0.50, 解释力等级均为强解释力。在不同气候区间, 气候因子在半干旱区中解释力  $q$  值显著高于半湿润区和干旱区; 而土壤类型和植被类型在干旱区中解释力  $q$  值显著高于半湿润区, 在半湿润区中解释力  $q$  值显著高于半干旱区。

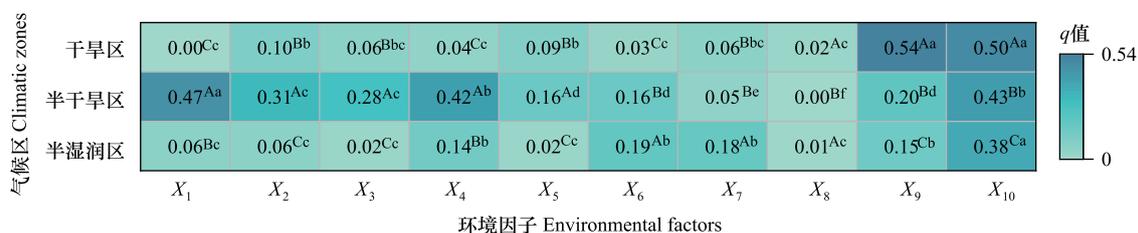


图 6 环境因子对黄土高原不同气候区中植被 NDVI 的解释力  $q$  值及其差异性

Fig.6 The explanatory power  $q$  value and its differences of environmental factors on the spatial distribution of vegetation NDVI in different climatic zones of the Loess Plateau

### 2.2.3 NDVI 主要环境驱动因子分析

对黄土高原 2000—2017 年年均 NDVI 主要环境驱动因子及其  $q$  值的空间分布进行分析可知(图 7): 黄土高原约 12.01% 的区域 NDVI 值主要受土壤类型影响, 解释力  $q$  值大于 0.3, 多为中等解释力, 主要分布在黄土高原西北部, 包括内蒙古乌拉特前旗以北、宁夏同心县以北及甘肃靖原县等; NDVI 值主要受日照时数影响的区域约占全区 1.79%, 解释力  $q$  值在 0.3—0.5 之间, 为中等解释力, 主要分布在山西南部 and 东部; NDVI 值主要受年均气温和海拔影响的区域较少, 分别占全区的 0.14% 和 0.86%, 其中主要受年均气温影响的区域零星分布在甘肃靖远东部和内蒙古乌拉特前旗南部,  $q$  值在 0.3—0.5 间, 为中等解释力, 主要受海拔影响的区域主要分布在陕西和山西接壤处,  $q$  值在 0.3—0.5 之间, 为中等解释力。其余 85.20% 的区域植被生长主要受年平均降雨量影响, 其中 41.43% 的区域降水对 NDVI 值的解释等级为强解释力, 主要分布在半干旱区, 约 43.75% 的

区域为中等解释力,主要分布在黄土高原南部,约 0.02% 的区域为弱解释力。可见,降水量是黄土高原 NDVI 空间异质性的主要驱动因子,进一步说明黄土高原植被建设中坚持“以水定植”的重要性。

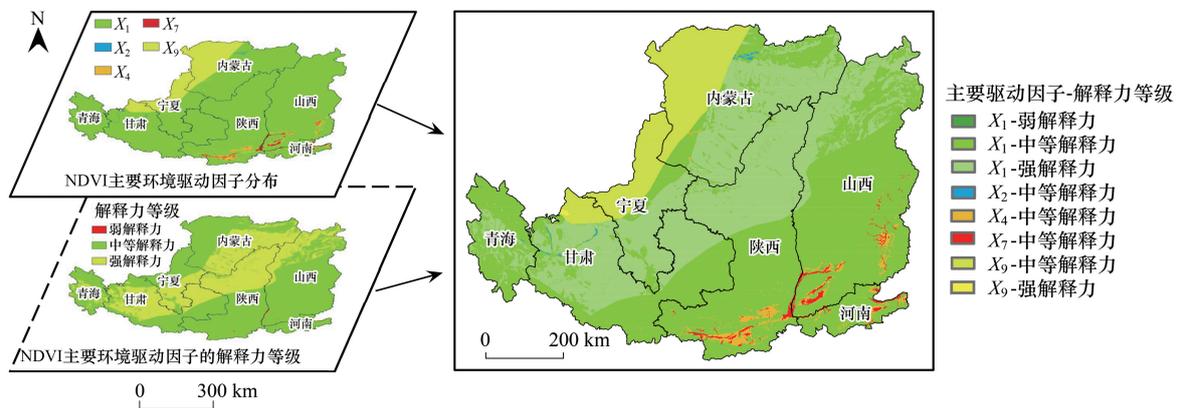


图7 黄土高原植被 NDVI 主要环境驱动因子及其解释力等级分布图

Fig.7 The main environmental driving factors of vegetation NDVI in the Loess Plateau and its  $q$  value classification spatial distribution

### 3 讨论

黄土高原位于气候过渡带,地势由东南向西北逐渐升高<sup>[18]</sup>,地表起伏频率大,地貌类型和植被类型多样,土壤类型繁多,且空间分布不均,导致植被的生长和分布受多种条件影响<sup>[1, 15]</sup>。其中,气候和土壤提供植物生命活动所需的能量<sup>[24]</sup>,地形要素通过改变局部地区水热的分配来影响植被生长<sup>[7]</sup>,植被类型通过影响植被与大气间的物质和能量相互作用对气候产生影响,而改变的气候又通过大气与植被的物质和能量交换作用对植被生长产生影响<sup>[9]</sup>。NDVI 能够反映植被生长状况<sup>[3]</sup>,其空间分布特征可以衡量植被与生态环境之间的关联性。黄土高原植被 NDVI 与环境因子具有空间关联性,且由于黄土高原地理过程的复杂性,各环境因子与植被 NDVI 的空间关联性在不同的类型区中存在显著的差异性。

(1)在不同植被类型区中,气候因子在草原区中对 NDVI 空间分布的解释力较高,在荒漠区和森林区解释力较弱;而植被类型和土壤类型在荒漠区中对 NDVI 空间分布的解释力较高,在森林区和草原区较低,原因可能是在不同植被区中,物种组成、群落结构和系统稳定性等方面存在明显差异,致使不同植被区中植物对外界环境变化的响应有所不同<sup>[9]</sup>。例如,在黄土高原典型的子午岭、吕梁山、六盘山和秦岭等森林区中,植物主要以乔木为主,而乔木通过发达的根系、丰富的凋落物和植物群落等的共同作用对大气降水进行重新分配和调节,有效改善了当地小气候和土壤理化性质<sup>[25]</sup>,致使森林区中的植物对环境的依赖性较小。在云雾山草原区中,植物以灌木和草本为主<sup>[26]</sup>,物种多样性较低,导致该区生态系统稳定性偏低,进而致使植被对环境变化具有较强的敏感性<sup>[27-28]</sup>。在毛乌素沙漠和库布齐沙漠等荒漠区中,植被稀少,对水分和热量的利用率有限<sup>[29]</sup>,土壤持水能力和地形对水热的分配能力一定程度上决定了植被对水分和热量的利用率<sup>[10-11]</sup>,对植被生长起着关键作用。由此可知,提高植物覆盖率及其物种多样性可消弱植被对环境因子的依赖性,进一步说明黄土高原“退耕还林”的必要性,但“退耕还林”应注重多种树种间在空间上的混搭,以提高生态系统稳定性。

(2)在不同地貌区中,气候因子在台地中对 NDVI 空间分布的解释力度较高,而在中起伏山地中的解释力较低;土壤类型和植被类型在大起伏山地中的解释力高,在小起伏山地的解释力较低,这可能因为地形地貌通过改变地表径流和土壤水分布来调节植被水分的获取,进而影响植物 NDVI 的分布格局<sup>[10]</sup>。例如,分布在山西太原边缘、临汾东部等区域的台地,台面倾斜,水系冲沟较发育,易形成地表径流<sup>[30]</sup>,沟头溯源侵蚀较强烈,进而降低土壤含水量和土壤肥力等,从而增强植被对气候和土壤等条件的依赖性。因此,在具体的植被建设中,应选择根系发达、耐贫瘠的物种,以防止土壤侵蚀和提高植被覆盖率。兴隆山是西北半干旱区典型的中起

伏山地,该区地形可以增加其上空水汽的平流输入,加强下垫面水汽向上输送,且地形的强迫作用有利于云雨和降水的形成<sup>[31]</sup>,使得该区的年降水量明显高于周边地,进而削弱了植被对气候要素的依赖性,该区的植被建设建议以“近自然林业”为指导思想<sup>[32]</sup>,以达到植被群落的动态平衡。

(3)在不同土壤类型区中,气候因子和植被类型在干旱土中对 NDVI 空间分布有着较强的解释力,在半淋溶土中解释力较弱,这可能是由于不同土壤类型成土条件和过程及理化性质的不同<sup>[10]</sup>。例如,半淋溶土是通过碳酸盐的淋溶和沉积过程形成的,其含水量和有机质含量高、营养元素较丰富,半淋溶土中植物多以乔木和灌木为主<sup>[11]</sup>,森林植被具有的自我调节能力<sup>[27]</sup>,消减了植被对环境因子的依赖性。干旱土持水能力差,有机质含量较低,且多数微量元素的含量缺乏<sup>[11]</sup>,该区中植物多以草本为主,而草本植物对外界环境条件的改变具有敏感性<sup>[28]</sup>,使得该区的植被对环境因子的依赖性强。在具体植被建设中,应考虑不同土壤的成土条件和过程及理化性质,培养适应于不同土壤类型中生存的物种,防止土壤贫瘠化和干燥化,以提高物种存活率,形成稳定的植物群落<sup>[33]</sup>。

(4)在不同气候区中,黄土高原植被 NDVI 与环境因子的空间关联性具有明显的差异性。较干旱地区植被对水分和热量的利用率有限<sup>[29]</sup>,而土壤类型和植被类型决定了植物对水分和热量的再利用率<sup>[8,11]</sup>,因此在干旱区中,土壤类型和植被类型成了植被 NDVI 空间异质性的主要环境限制条件,在具体的植被建设中,应注重物种的选择,强化植物精准配置<sup>[34]</sup>。气候因子对半湿润区中植被的影响较小,这可能因为半湿润区年平均降雨量较多,年均气温较高,致使该区植被类型主要以乔木和灌木为主,同时,这些地区靠近河流,人为灌溉较多,植被生长对雨水的依赖较少,鉴于此,该区可选择的比较适宜的生态经济兼备高效水土保持植物;在半干旱区中,气候因子对植被的空间分布影响较强,尤其是降水量,这可能是由于半干旱地区降水稀少,蒸散量大<sup>[7]</sup>,降水量与植物需水量的关系供不应求,从而影响植物生长,导致降水量成为黄土高原植被 NDVI 空间异质性的主要驱动因子,进一步说明降水量对相对缺水地区植被生长较为重要<sup>[35]</sup>,为了消弱半干旱区中植被对环境因子的依赖性,在植被建设中,应注重选择耐旱的物种,以维持土壤水分的持续利用等。

#### 4 结论

本文基于 GIS 和地理探测器平台,选取气候要素、地形因素、土壤类型和植被类型等自然环境因子,研究黄土高原植被 NDVI 与环境因子的空间关联性,得出以下结论:

(1)黄土高原 2000—2017 年的年均植被 NDVI 值在 0.016—0.72 之间,呈地带性分布,由西北部向东南部逐渐升高。其中,NDVI 小于 0.3 的区域占黄土高原总面积 49.78%,NDVI 处于 0.3—0.4 范围内的区域占黄土高原总面积的 22.36%,NDVI 大于 0.4 的区域占黄土高原总面积的 27.87%。

(2)2000—2017 年黄土高原年均植被 NDVI 分布具有空间异质性,其中年平均降雨量、日照时数、相对湿度、植被类型和年均气温对 NDVI 空间分布的解释等级为强解释力;而土壤类型、平均风速和地形因子为弱解释力或无解释力。

(3)在不同气候区、植被区、地貌区和土壤区中,黄土高原植被 NDVI 与环境因子的空间关联性具有差异性。对于不同植被区,NDVI 主要环境驱动因子在森林区中是植被类型,草原区中是日照时数和年平均降雨量,荒漠区中是土壤类型和植被类型。在各地貌类型区中,年平均降雨量均是 NDVI 空间分布的主要环境因子;对于土壤类型区,干旱土、漠土和初育土区的 NDVI 主要环境驱动因子均为年平均降雨量,半水成土区为相对湿度和日照时数,半淋溶土和钙层土区中均是年平均降雨量和日照时数。对于不同气候,NDVI 主要环境驱动因子在半湿润区和半干旱区中分别是植被类型和年平均降雨量,在干旱区中是土壤类型和植被类型。

(4)黄土高原有 85.20%的区域植被生长主要受年平均降雨量影响,约 12.01%的区域植被生长主要受土壤类型影响,其余区域的植被生长主要受年均气温、日照时数或海拔影响,表明黄土高原“以水定植”的重要性。

综上,环境因子与黄土高原植被 NDVI 分布具有较强的空间关联性,但由于黄土高原地理过程的复杂性,

在不同环境条件下,各环境因子与植被 NDVI 的空间关联性存在显著的差异性。因此,建议综合考虑不同环境条件下 NDVI 的空间分布与各影响因子的空间关联性,明确不同区域的环境制约因子,以制约因子定植,在防止土壤干燥化、贫瘠化的前提下,提高植被覆盖率和生物多样性,以期促进黄土高原植被建设高质量发展。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Qu L L, Huang Y X, Yang L F, Li Y R. Vegetation restoration in response to climatic and anthropogenic changes in the Loess Plateau, China. *Chinese Geographical Science*, 2020, 30(1): 89-100.
- [ 2 ] Gong Z N, Zhao S Y, Gu J Z. Correlation analysis between vegetation coverage and climate drought conditions in North China during 2001 - 2013. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(2): 143-160.
- [ 3 ] Yang J, Wan Z Q, Borjigin S, Zhang D, Yan Y L, Chen Y L, Gu R, Gao Q Z. Changing trends of NDVI and their responses to climatic variation in different types of grassland in Inner Mongolia from 1982 to 2011. *Sustainability*, 2019, 11(12): 3256.
- [ 4 ] Bento V A, Gouveia C M, DaCamara C C, Libonati R, Trigo I F. The roles of NDVI and Land Surface Temperature when using the Vegetation Health Index over dry regions. *Global and Planetary Change*, 2020, 190: 103198.
- [ 5 ] 张文. 西秦岭植被分布与环境因子的关系研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2010.
- [ 6 ] 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.
- [ 7 ] 谢宝妮. 黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [ 8 ] 赵瑞东. 气候变化和人类活动对黄土高原植被 NDVI 的影响研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2018.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Wu X B, Archer S R. Scale-dependent influence of topography-based hydrologic features on patterns of woody plant encroachment in savanna landscapes. *Landscape Ecology*, 2005, 20(6): 733-742.
- [ 11 ] 耿增超, 戴伟. 土壤学. 北京: 科学出版社, 2011.
- [ 12 ] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [ 13 ] Hein L, de Ridder N, Hiernaux P, Leemans R, de Wit A, Schaeppman M. Desertification in the Sahel: towards better accounting for ecosystem dynamics in the interpretation of remote sensing images. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(11): 1164-1172.
- [ 14 ] Wang J F, Hu Y. Environmental health risk detection with GeogDetector. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 33: 114-115.
- [ 15 ] Yuan L H, Chen X Q, Wang X Y, Xiong Z, Song C Q. Spatial associations between NDVI and environmental factors in the Heihe River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(9): 1548-1564.
- [ 16 ] 陈鹏. 1982—2015 年黄土高原植被覆盖变化中气候和人类活动的贡献率研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2017.
- [ 17 ] 郭敏杰. 基于 NDVI 的黄土高原地区植被覆盖度对气候变化响应及定量分析[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2014.
- [ 18 ] 汪秀泽. 2000—2013 年黄土高原植被覆盖变化驱动力研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [ 19 ] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策. *地理学报*, 2017, 72(1): 161-173.
- [ 20 ] 郑景云, 尹云鹤, 李炳元. 中国气候区划新方案. *地理学报*, 2010, 65(1): 3-12.
- [ 21 ] 张磊. 基于地形起伏度的地貌形态划分研究——以京津冀地区为例[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009.
- [ 22 ] Muller K. Statistical power analysis for the behavioral sciences. *Technometrics*, 1989, 31(4): 499-500.
- [ 23 ] Romano G, Sasso P D, Liuzzi G T, Gentile F. Multi-criteria decision analysis for land suitability mapping in a rural area of Southern Italy. *Land Use Policy*, 2015, 48: 131-143.
- [ 24 ] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982-2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [ 25 ] 罗佳. 武陵山区小流域不同植被类型水文生态功能研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [ 26 ] 赵新宇. 云雾山国家级自然保护区典型草原生态系统价值研究[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2014.
- [ 27 ] Wang X Y, Wu C Y, Peng D L, Gonsamo A, Liu Z J. Snow cover phenology affects alpine vegetation growth dynamics on the Tibetan Plateau: satellite observed evidence, impacts of different biomes, and climate drivers. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 61-74.
- [ 28 ] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernández-Clemente R, Zhao Y C, Gaitún J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehmann A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. *Science*, 2020, 367(6479): 787-790.
- [ 29 ] Xie B N, Jia X X, Qin Z F, Shen J, Chang Q R. Vegetation dynamics and climate change on the Loess Plateau, China: 1982—2011. *Regional Environmental Change*, 2015, 16(6): 1583-1594.
- [ 30 ] 任圆圆. 地表水体、土壤与地形地貌多样性的格局特征及关联分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
- [ 31 ] 陈磊. 植被变化和地形对干旱半干旱区天气气候的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [ 32 ] 周飞梅, 马旺彦. 德国“近自然林业”的借鉴之处及中国化发展措施. *防护林科技*, 2020, (7): 41-42, 64-64.
- [ 33 ] Gao X D, Li H C, Zhao X N, Ma W, Wu P T. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, 2018, 319: 61-69.
- [ 34 ] 赵东晓, 蔡建勳, 土小宁, 殷丽强, 胡建忠, 温秀凤, 李蓉. 黄河流域水土保持植被建设对策. *中国水利*, 2020, (6): 30-33.
- [ 35 ] Zhao X, Tan K, Zhao S, Fang J. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.