

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡德豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩语, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析

赖金林¹, 齐实^{1,2*}, 崔冉冉¹, 廖瑞恩¹, 唐颖¹, 李鹏¹

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 水土保持国家林业局重点实验室, 北京 100083)

摘要: 西南高山峡谷区是我国典型生态脆弱区, 认识其植被变化特征及影响因素可以为西南高山峡谷区生态环境建设对策的制定提供理论依据, 对实现区域经济、环境以及生态和谐统一发展, 具有一定的现实意义。基于 2000~2019 年 NDVI、社会经济因子和自然因子数据集, 采用一元线性回归法、Hurst 指数、地理探测器模型和变异系数等方法分析了西南高山峡谷区 NDVI 时空变化及稳定性特征, 并探讨了 NDVI 空间分异影响因素。结果表明: ①空间上看, 植被呈现东南高、西北低的分布格局, 中高和高植被覆盖的区域面积占比 71.71%, 植被覆盖总体处于较高水平。时间上看, 植被呈现改善趋势的区域面积占比 85.90%, 恢复效果明显, 且未来植被变化趋势还将以改善为主。②高程、植被类型和土壤类型是影响 NDVI 空间分异的主导因子, q 值均不低于 0.40; 气温和降雨量为次要因子, q 值分别为 0.274 和 0.225。双因子交互作用增强了单因子的影响力, 表现为双因子增强和非线性增强两种关系, 其中高程 $\cap$ 植被类型组合 q 值最高为 0.714, 其次是高程 $\cap$ 土壤类型组合 q 值为 0.688。③研究时段内 NDVI 整体稳定性较好, 低波动变化和较低波动变化的区域面积占比为 89.95%; 而中等以上波动的区域面积占比为 10.05%, 集中在海拔高、气温低、降雨少、土壤贫瘠和植被较差等生态环境相对脆弱的区域。植被变化是多因素综合作用的结果, 需因地制宜, 有针对性地采取不同策略修复西南高山峡谷区生态环境。

关键词: 西南高山峡谷区; 归一化植被指数 (NDVI); 空间分布格局; 地理探测器; 影响因素

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6833-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212190

Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area

LAI Jin-lin¹, QI Shi^{1,2*}, CUI Ran-ran¹, LIAO Rui-en¹, TANG Ying¹, LI Peng¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Soil and Water Conservation State Forestry Bureau, Beijing 100083, China)

Abstract: The southwest alpine canyon area is a typical ecologically fragile area. Understanding the characteristics of vegetation change here and its influencing factors can provide a theoretical basis for formulating countermeasures for ecological environment construction in the southwest alpine canyon area and has practical significance for realizing the harmonious and unified development of the regional economy, environment, and ecology. Based on the data set of NDVI, socio-economic factors, and natural factors from 2000 to 2019, the spatial and temporal variation and stability characteristics of NDVI in the southwest alpine canyon area were analyzed by using the methods of unary linear regression, Hurst index, geographic detector model, and coefficient of variation, and the influencing factors of the spatial differentiation of NDVI were also discussed. The results showed that: ① in terms of spatial distribution, the vegetation was high in the southeast and low in the northwest. The area covered by medium and high vegetation accounted for 71.71%, and the vegetation cover was at a relatively high level. From the perspective of time, the area of vegetation showing an improvement trend accounted for 85.90%, and the recovery effect was obvious, and the future vegetation change trend will continue to be improved. ② Elevation, vegetation type, and soil type were the main factors affecting the spatial differentiation of NDVI, and the q value was no less than 0.40. Temperature and rainfall were secondary factors, with q values of 0.274 and 0.225, respectively. The dual-factor interaction enhanced the single factor influence, which was manifested as the dual-factor enhancement and nonlinear enhancement relationship. The highest q value was 0.714 for the combination of altitude $\cap$ vegetation, followed by 0.688 for the combination of altitude $\cap$ soil. ③ The overall stability of NDVI during the study period was good, and the proportion of the regional area with low fluctuating changes and slightly low fluctuating changes was 89.95%. The area with moderate fluctuation accounted for 10.05%, concentrated in the relatively fragile ecological environment with factors such as high altitude, low temperature, little rainfall, barren soil, and sparse vegetation. Vegetation change is the result of a combination of multiple factors, so it is necessary to adapt to local conditions and adopt different strategies to restore the ecological environment of the southwest alpine canyon area.

Key words: southwest alpine canyon area; normalized difference vegetation index (NDVI); spatial distribution pattern; geographic detector; influencing factor

地表植被是维持陆地生态系统平衡的重要组成部分, 被称作气候变化和碳库指示器^[1~3], 在生态系统碳平衡、气候调节和涵养水源等方面发挥了至关重要的作用^[4~6]。因此, 监测植被动态变化也成为区域变化研究中的热点问题^[7]。归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 作为衡量植被覆盖度和生长特征的有效遥感指标, 对植被敏感性高, 被广泛用于植被动态监测, 有助于了解区域生态环境发展, 对区域生态环境质量评估具有

重要现实意义^[8,9]。

西南高山峡谷区物种丰富, 生态系统复杂, 基于其独特的地形地貌环境以及气候特征, 加之过去人类活动对生态环境的破坏, 导致生态环境恶化, 使西南高山峡谷区成为中国典型的生态脆弱区。因此, 反

收稿日期: 2022-12-25; 修订日期: 2023-02-28

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1302903)

作者简介: 赖金林 (1999~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植被覆盖变化及其生态效应, E-mail: laijinlin919@163.com

* 通信作者, E-mail: qishi@bjfu.edu.cn

演该地区植被变化历史轨迹并分析其影响因素,为生态保护评估提供科学依据和有效支撑,是当前国家需求,也是面向区域生态安全、生态恢复与生态保护相结合的重要任务^[10]。

近年来,有学者基于一元线性回归法、Hurst 指数和变异系数等方法在不同时空尺度上对植被时空变化特征及影响因素进行了研究。随着研究的不断深入,取得了丰硕的成果。李焱等^[11]针对藏西南地区的研究发现:NDVI 变化不光与区域水热条件密切相关,而且受地形因子的共同影响,NDVI 在不同高程梯度上也存在较大差异。李美丽等^[12]探讨了气候因子与西南地区植被覆盖变化的响应机制,发现西南地区 NDVI 变化整体呈现上升趋势,并且表现为非气候因素驱动。有研究表明^[13~15],西南地区 NDVI 明显提升的原因,人为因素主要体现在天然林资源保护、退耕还林还草和西南岩溶石漠化综合治理等林业生态工程的实施;自然因素主要体现在气候因子(气温和降水)对 NDVI 影响。金芳芳^[16]对西南山区的研究表示近年来西南山区 NDVI 呈上升趋势,但不同区域之间存在显著差异。彭文甫等^[17]对四川地区 NDVI 变化分析发现高程和年均温对植被状况可变性具有较强的影响力。综上可知,NDVI 变化主要受气候因子、地形因子和人类活动的共同影响,但目前研究更多侧重于 NDVI 值与上述因子的相关性方面,未能较好地量化各因子对 NDVI 空间分异的影响力水平。考虑的影响因子主要为气候因子、地形因子和人类活动,而忽略了植被类型和土壤类型差异对 NDVI 空间分异的影响,影响因子考虑不充分。西南高山峡谷区地形复杂,气候条件和人类活动空间分异明显,已有研究表明 NDVI 变化与影响因子之间存在明显空间尺度效应^[18],但是现有研究空间尺度上主要集中在西南地区或者局部小区域,西南高山峡谷区植被变化及影响因素依然缺乏系统性研究。

鉴于此,本研究通过 2000~2019 年 NDVI、社会经济因子和自然因子数据集,对西南高山峡谷区 NDVI 时空变化特征进行分析,结合地理探测器定量分析了自然因子和社会经济因子对 NDVI 空间分异的影响力,并探讨了 NDVI 稳定性与影响因子的关系,以期对西南高山峡谷区植被动态监测、管理及保护提供科学依据,对于制定合理的生态保护方案具有重要的应用价值。

1 研究区概况

西南高山峡谷区地处四川、西藏和云南三省交界地带,面积约 611 000 km²,地理坐标在

24°58′7.47″~32°51′24.93″N, 91°23′48.24″~104°13′43.55″E 之间(图 1)。按照水土保持区划可划分为滇西北高山峡谷生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区、藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区。海拔介于 89~6 826 m 之间,地势起伏大,地形复杂,地貌以山地、丘陵以及高原为主。由东南向西北横跨干旱区、半干旱区、半湿润区以及湿润区,由于热带和亚热带季风气候的交替影响,气候空间分布差异明显,平均气温为 -2.98~21.89℃,平均降雨量为 296.62~2 302.90 mm。土壤和植被类型丰富,土壤类型主要有高山土、淋溶土和铁铝土;植被类型以针叶林、阔叶林、灌丛和草甸为主。由于特殊地质地貌和气候条件影响,西南高山峡谷区生态环境十分脆弱,属于生态环境重点保护区域。

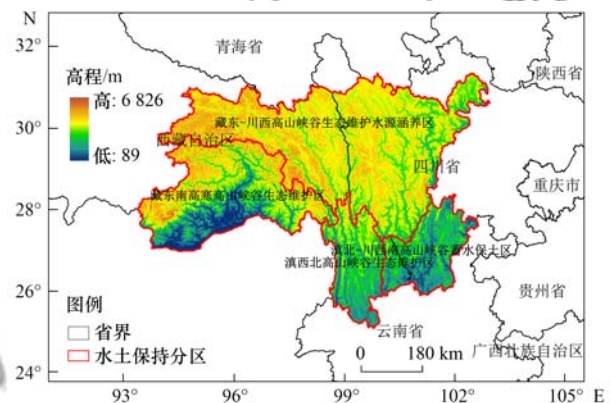


图 1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Geographic location diagram of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源及处理

研究采用的数据主要包括 2000~2019 年 NDVI 数据集、社会经济因子数据集以及自然因子数据集。NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)中国月度植被指数空间分布数据集^[19],时间跨度为 2000 年 1 月至 2019 年 12 月,空间分辨率为 1 km,使用 ArcGIS 软件对该数据集进行重投影和裁剪,并采用最大值合成法生成逐年西南高山峡谷区 NDVI 数据集。

社会经济因子包括人口密度和 GDP,其栅格数据集来源于中国科学院资源环境科学与数据中心^[20,21],时间跨度为 2000~2019 年,空间分辨率为 1 km,使用 ArcGIS 软件对该数据进行重投影和裁剪,然后通过像元统计工具获取 2000~2019 年人口密度和 GDP 均值数据。

自然因子包括气象因子、地形因子、植被类型、土壤类型以及地貌类型。气象因子数据来源于

CRU TS(<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>)发布的全球0.5°气候数据集,使用 ArcGIS 软件进行空间降尺度生成空间分辨率为1 km 的中国区气象数据集,进而通过裁剪获取西南高山峡谷区气象数据集。地形因子包括高程、坡度和坡向,DEM 下载自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),通过重投影和裁剪获取研究区 DEM,并进一步提取坡向和坡度。植被类型、土壤类型和地貌类型栅格数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心,空间分辨率1km,通过重投影和裁剪获取研究区植被类型、土壤类型和地貌类型数据集。

2.2 研究方法

2.2.1 最大值合成法(maximum value composites, MVC)

使用最大值合成法(MVC)^[22]合成年度 NDVI,计算公式为:

$$\text{NDVI}_i = \text{Max}(\text{NDVI}_t) \quad (1)$$

式中,NDVI_i为第*i*年 NDVI 最大值;Max 为最大值函数;NDVI_t为第*t*月 NDVI 值,*t*为月序号,*t*=1,2,3,⋯,12。

2.2.2 NDVI 变化趋势分析

为研究西南高山峡谷区 NDVI 变化趋势空间分布特征,本文采用一元线性回归法^[23],逐像元对 NDVI 变化趋势进行分析,从而反映其空间变化特征,计算公式为:

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

式中,Slope 为回归方程的斜率;*n*为研究时间段年数;*V_i*为第*i*年 NDVI 像元值。Slope>0 则表示研究时间段内 NDVI 值增加,Slope<0 则表示 NDVI 值减少,|Slope|越大,则 NDVI 值在研究时段内变化越大,反之表示变化越小。

采用 *F* 检验法^[23]对 NDVI 变化趋势进行显著性检验,其计算公式为:

$$F = \frac{U(n-2)}{Q} \quad (3)$$

$$U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2 \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

式中,*U*为误差平方和,*Q*为回归平方和;*y_i*为第*i*年 NDVI 像元值; $\hat{y}_i$ 为其回归值, $\bar{y}_i$ 为研究时段 NDVI 平均值;*n*为研究年数。综合斜率 Slope 和 *F* 检验法将 NDVI 变化趋势划分为 6 个等级,如表 1 所示。

表 1 NDVI 变化趋势等级划分

Table 1 Classification of NDVI change trends

划分范围	等级
Slope < 0, <i>P</i> < 0.01	极显著退化
Slope < 0, 0.01 ≤ <i>P</i> < 0.05	显著退化
Slope < 0, <i>P</i> > 0.05	不显著退化
Slope > 0, <i>P</i> > 0.05	不显著改善
Slope > 0, 0.01 ≤ <i>P</i> < 0.05	显著改善
Slope > 0, <i>P</i> ≤ 0.01	极显著改善

2.2.3 未来变化趋势分析

Hurst 指数可以预测时间序列 NDVI 未来变化趋势,最早由 Hurst 提出,Mandelbrot 对其进行了改进,目前被广泛运用于气象、水文以及生态领域长时间序列变化趋势分析^[24~27],其计算方法过程如下。

对于时间序列 NDVI_{*t*}, *t*=1,2,3,⋯,*n*,定义其均值序列:

$$\overline{\text{NDVI}}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \text{NDVI}_t, \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (6)$$

累积离差计算:

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^{\tau} (\text{NDVI}_i - \overline{\text{NDVI}}_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

极差计算:

$$R_\tau = \max_{1 \leq t \leq \tau} (t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} (t, \tau), \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (8)$$

标准差计算:

$$S_\tau = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\text{NDVI}_t - \overline{\text{NDVI}}_\tau)^2 \right\}^{1/2}, \tau = 1, 2, 3, \dots, n \quad (9)$$

Hurst 指数计算:

$$\frac{R_\tau}{S_\tau} = c\tau^H \quad (10)$$

拟合直线得到 Hurst 指数:

$$\ln(R/S)_n = a + H \ln n \quad (11)$$

式中,*c*为关系常数,*H*为 Hurst 指数,*a*为截距。*H*=0.5 时,表示 NDVI 未来变化趋势不确定,具有随机性;0<*H*<0.5 时,表示 NDVI 未来变化趋势与过去相反,具有反可持续性;0.5<*H*<1 时,表示 NDVI 未来变化趋势与过去相同,具有可持续性。

2.2.4 地理探测器模型

地理探测器^[28~31]是由王劲峰提出的一种空间分析模型,其中因子探测器和因子交互作用探测器可以用于定量分析多个自变量 *X* 与因变量 *Y* 之间的关系。

(1)因子探测器 该探测器主要用来探测自变量 *X* 对因变量 *Y* 的影响力,影响力大小采用 *q* 值衡量^[32,33],*q* 值越高,其影响力越强,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{12}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \rho_h^2 \tag{13}$$

$$SST = N \rho^2 \tag{14}$$

式中, $h=1,2,3,\cdots,L$,为自变量 X 的分层; N_h 为 h 层的单元数; N 为整个区域单元数量; ρ_h^2 为 h 层的方差; ρ^2 为整个区域方差. SST 表示层内方差; SSW

表示整个区域方差和.
(2)因子交互作用探测器 该探测器可以用于识别不同因素之间交互作用影响力^[34,35].即通过计算 $q(X_1 \cap X_2)$ 值来判断因子 X_1 和 X_2 的共同作用对因变量 Y 的影响力是增强还是减弱,将 $q(X_1 \cap X_2)$ 值与 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ 的数值进行比较,对于因变量 Y 的作用关系判别依据见表 2.

表 2 交互作用判别依据及作用关系类型

判断依据	作用关系
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

(3)数据离散化处理 NDVI 空间分异是多因子综合作用的结果,本研究选取 10 个影响因子(表 3),分析其对 NDVI 空间分异的影响力水平.自然断点分类法^[36]可以有效避免人为干扰,最大限度地提高类之间的差异,常用于地理探测器数据分类.采用自然断点分类法将气温、降水量、人口密度和 GDP

等 4 个影响因子分为 7 类;考虑高程落差大将其分为 10 类;坡度根据《土地利用现状调查技术规程》划分 6 级;按照坡向定义将其划分为 8 类;植被类型根据《中国植被图集》大类划分为 9 类;土壤类型按照土纲划分为 10 类;地貌类型根据《中国地貌图集》划分为 7 类.

表 3 影响因子分类

分区	高程(X_1) /m	坡度(X_2) /(°)	坡向(X_3)	降雨量(X_4) /mm	气温(X_5) /℃	土壤类型(X_6)	植被类型(X_7)	地貌类型(X_8)	GDP(X_9) /元·km ⁻²	人口密度(X_{10}) /人·km ⁻²
1	≤1 051	≤5	北坡	296.62~540.52	-2.97~0	淋溶土	针叶林	平原	≤138	≤27
2	1 051~1 745	5~8	东北坡	540.52~690.01	0~2.29	半淋溶土	针阔混交林	台地	138~683	27~77
3	1 745~2 306	8~15	东坡	690.01~847.36	2.29~5.02	初育土	阔叶林	丘陵	163~1 454	77~190
4	2 306~2 828	15~25	东南坡	847.36~1 036.19	5.02~8.62	半水成土	灌丛	小起伏山地	1 454~2 244	190~568
5	2 828~3 332	25~35	南坡	1 036.19~1 280.09	8.62~12.04	水成土	草丛	中起伏山地	2 244~4 330	568~1 303
6	3 332~3 795	>35	西南坡	1 280.09~1 642.01	12.04~15.65	人为土	草甸	大起伏山地	4 330~13 632	1 303~2 801
7	3 795~4 199		西坡	1 642.01~2 295.03	15.65~21.80	高山土	高山植被	极大起伏山地	>13 632	>2 801
8	4 199~4 572		西北坡			铁铝土	栽培植被			
9	4 572~4 984					岩石	其他			
10	>4 984					冰川雪被				

2.2.5 稳定性分析

变异系数^[37,38]是 NDVI 时间序列标准差与平均值的比值,可用于反映研究时段内西南高山峡谷区 NDVI 变化的波动程度,其计算公式如下:

$$C_v = \frac{SD_{NDVI}}{NDVI} \tag{15}$$

式中, C_v 为变异系数; SD_{NDVI} 为标准差; $NDVI$ 为研究期间 NDVI 均值.按照自然断点分类法将 C_v 划分为 5 个等级:低波动变化(0~0.10)、较低波动变化(0.10~0.20)、中等波动变化(0.20~0.38)、中高波动变化(0.38~0.66)和高波动变化(0.66~2.01).

3 结果与分析

3.1 NDVI 空间分布格局

根据 2000~2019 年 NDVI 均值空间分布可知[图 2(a)],西南高山峡谷区 NDVI 空间分异明显,呈现东南高,西北低的分布格局.为进一步反映 NDVI 空间分布情况,参考前人研究将 NDVI 均值按照等间距法^[39]划分为 5 个等级[图 2(b)]:低植被覆盖(0~0.2)、中低植被覆盖(0.2~0.4)、中等植被覆盖(0.4~0.6)、中高植被覆盖(0.6~0.8)和高植被覆盖(0.8~1),分区统计结果如表 4 所示:总体上西南高山峡谷区植被覆盖较好,中

高和高植被覆盖的区域面积为 $438.17 \times 10^3 \text{ km}^2$ ，占研究区总面积的 71.71%。其中，滇西北高山峡谷生态维护区以及滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区中高和高植被覆盖的区域面积占比较高，均超过 90%；而藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区的区域面积占比均不超过 70%，主要分布在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区东部以及藏东南高寒高山

峡谷生态维护区南部。中等植被覆盖的区域面积为 $91.56 \times 10^3 \text{ km}^2$ ，占比为 14.98%，主要分布在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区中部以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区北部。低和中低植被覆盖的区域面积为 $81.30 \times 10^3 \text{ km}^2$ ，占比为 13.30%，在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带分布相对集中。

表 4 植被覆盖等级面积及占比
Table 4 Area and proportion of vegetation coverage grade

植被覆盖等级	滇西北		滇北-川西南		藏东-川西		藏东南		合计	
	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%
低植被覆盖	0.13	0.20	0.00	0.00	13.73	4.29	17.27	10.82	31.13	5.09
中低植被覆盖	0.95	1.48	0.03	0.04	28.76	8.98	20.43	12.80	50.17	8.21
中等植被覆盖	2.95	4.61	0.90	1.35	62.61	19.55	25.10	15.73	91.56	14.98
中高植被覆盖	40.06	62.66	52.15	77.61	184.10	57.48	41.55	26.03	317.86	52.02
高植被覆盖	19.85	31.04	14.12	21.01	31.08	9.70	55.27	34.63	120.31	19.69

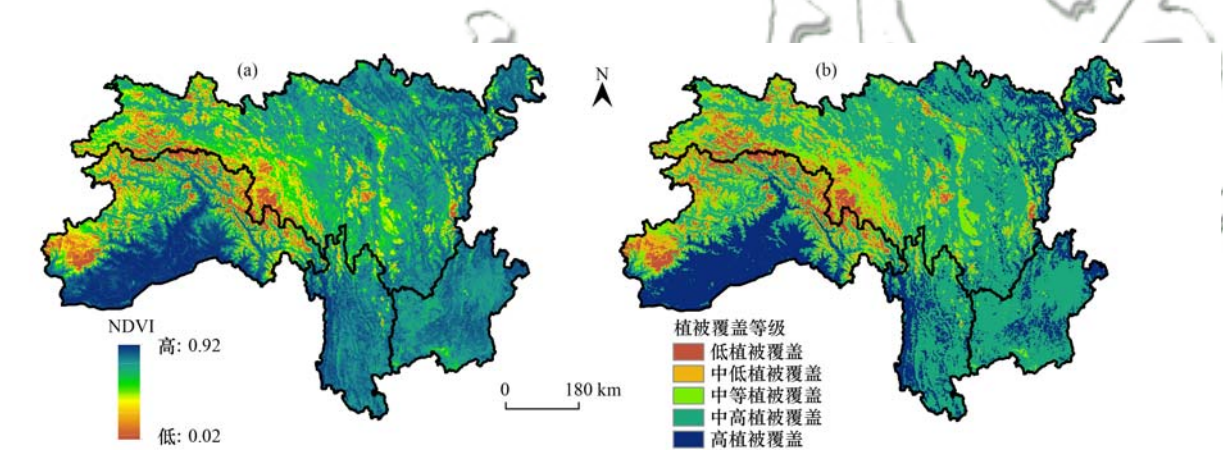


图 2 NDVI 空间分布
Fig. 2 Spatial distribution pattern of NDVI

3.2 NDVI 时空变化特征

3.2.1 NDVI 时间变化特征

如图 3 所示,2000 ~ 2019 年西南高山峡谷区 NDVI 整体呈波动上升趋势,NDVI 均值在 0.60 ~ 0.70 之间波动,多年平均值为 0.65,最小值出现在 2000 年和 2002 年,为 0.60;在 2016 年达到峰值,为 0.70,增长速率为 0.0046 a^{-1} ($R^2 = 0.82$, $P < 0.01$).从水土保持分区的角度来看,2000 ~ 2019 年各分区 NDVI 均表现为波动上升趋势,其中滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区上升趋势最为显著,增长速率为 0.0072 a^{-1} ;其次是滇西北高山峡谷生态维护区,增长速率为 0.0059 a^{-1} ;藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区增长速率相对较低,分别为 0.0039 a^{-1} 和 0.0037 a^{-1} .20 年间滇西北高山峡谷生态维护区和滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区 NDVI 均值明显高于藏东-川西高山峡谷生态维护

水源涵养区以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区,说明滇西北高山峡谷生态维护区和滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区整体植被覆盖情况优于其

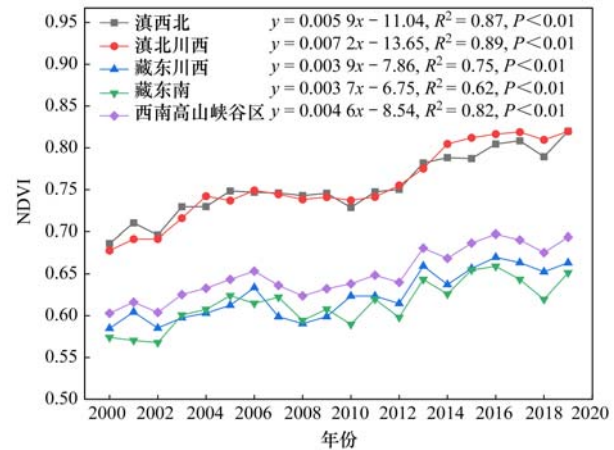


图 3 NDVI 年际变化
Fig. 3 Interannual variation in NDVI

他区域.

3.2.2 NDVI 空间变化特征

基于一元线性回归法对 NDVI 时间序列变化趋势进行逐像元分析,得到研究时段西南高山峡谷区 NDVI 变化趋势[图 4(a)], $Slope > 0$ 的区域面积为 $524.86 \times 10^3 \text{ km}^2$,占研究区总面积的 85.90%,西南高山峡谷区 NDVI 整体明显增加.结合 F 检验法趋势显著性检验结果,将变化趋势划分为 6 个等级[图 4(b)],统计结果见表 5,通过显著性检验的区域面积为 $485.84 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 79.44%.其中,显著和极显著改善的区域面积为 $442.39 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 72.41%,主要分布在滇西北高山峡谷

生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区、藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区北部以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区南部.其中滇西北高山峡谷生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区改善情况较为明显,显著和极显著改善的区域面积占比超过 80%.退化趋势的区域面积为 $86.19 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 14.10%,其中显著和极显著退化的区域面积为 $42.97 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 7.03%,主要分布在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带以及藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区东部.

表 5 NDVI 变化趋势面积及占比

Table 5 Area and proportion of NDVI change trend										
变化趋势	滇西北		滇北-川西南		藏东-川西		藏东南		合计	
	面积 $\times 10^3$ /km ²	占比 /%	面积 $\times 10^3$ /km ²	占比 /%	面积 $\times 10^3$ /km ²	占比 /%	面积 $\times 10^3$ /km ²	占比 /%	面积 $\times 10^3$ /km ²	占比 /%
极显著退化	1.06	1.66	0.68	1.01	11.96	3.74	8.44	5.29	22.15	3.62
显著退化	0.99	1.54	0.42	0.63	11.82	3.69	7.59	4.75	20.82	3.41
不显著退化	2.41	3.77	1.14	1.69	24.32	7.59	15.35	9.62	43.22	7.07
不显著改善	5.35	8.36	3.27	4.87	49.49	15.45	24.32	15.24	82.43	13.49
显著改善	4.26	6.66	3.05	4.54	38.77	12.10	14.09	8.83	60.17	9.85
极显著改善	49.87	78.00	58.64	87.26	183.92	57.42	89.83	56.28	382.26	62.56

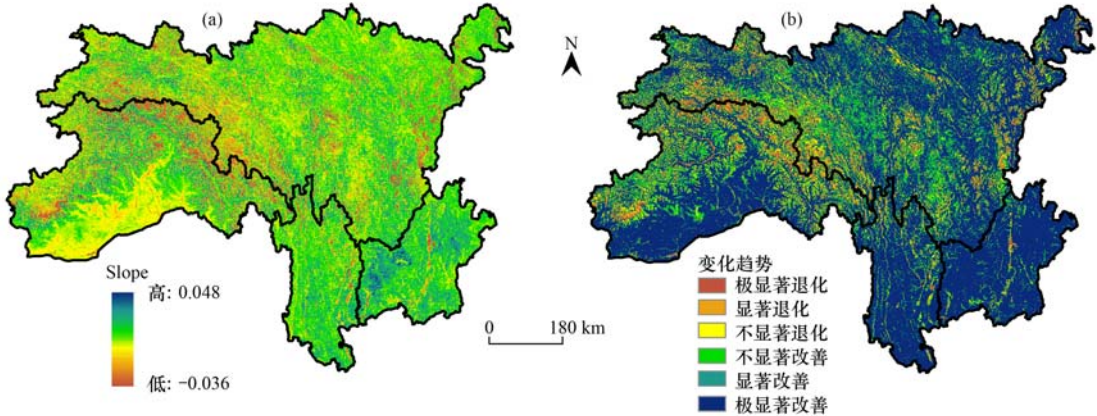


图 4 NDVI 变化趋势空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of NDVI change trend

3.2.3 NDVI 未来变化趋势分析

结合 Hurst 指数预测未来西南高山峡谷区 NDVI 变化趋势,Hurst 指数空间分布如图 5(a)所示,Hurst(H)指数值介于 0.24~0.75 之间, $H > 0.5$ 的区域面积为 $557.48 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 91.24%,说明西南高山峡谷区 NDVI 短期内将延续现有变化趋势.使用 ArcGIS 将斜率 Slope 与 Hurst 指数进行叠加分析,获得 NDVI 未来变化趋势[图 5(b)],其分区结果统计见表 6,未来西南高山峡谷区 NDVI 变化趋势将以改善为主,持续改善和未来改善趋势的区域面积为 $501.30 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 82.04%,其中持

续改善的区域面积占比为 79.59%,由退化向改善趋势转变的区域面积占比为 2.45%,主要分布滇西北高山峡谷生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区、藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区北部以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区南部.持续退化和未来退化趋势的区域面积为 $109.73 \times 10^3 \text{ km}^2$,占比为 17.96%,其中持续退化的区域面积占比为 11.65%,由改善向退化趋势转变的区域面积占比为 6.31%,在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带分布相对集中.

表 6 NDVI 未来变化趋势面积及占比
Table 6 Area and proportion of future change trend of NDVI

未来变化趋势	滇西北		滇北-川西南		藏东-川西		藏东南		合计	
	面积 × 10 ³ /km ²	占比 /%	面积 × 10 ³ /km ²	占比 /%	面积 × 10 ³ /km ²	占比 /%	面积 × 10 ³ /km ²	占比 /%	面积 × 10 ³ /km ²	占比 /%
持续改善	56.48	88.34	63.52	94.53	249.19	77.81	117.11	73.37	486.30	79.59
未来改善趋势	0.52	0.81	0.20	0.30	9.37	2.92	4.91	3.08	15.00	2.45
持续退化	3.94	6.16	2.04	3.03	38.74	12.10	26.47	16.58	71.18	11.65
未来退化趋势	3.00	4.69	1.44	2.14	22.98	7.17	11.13	6.97	38.55	6.31

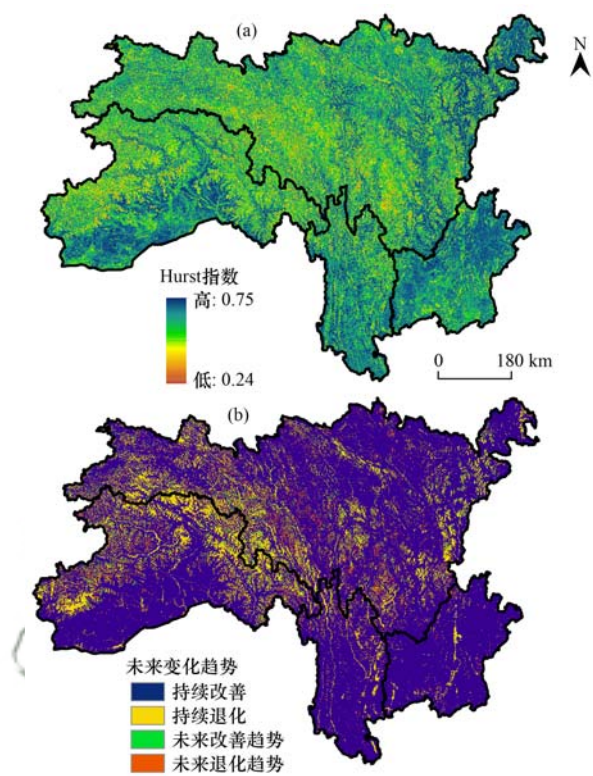


图 5 Hurst 指数及未来变化趋势
Fig. 5 Hurst index and its future trend

3.3 NDVI 空间分布格局影响因子探测分析

3.3.1 单因子探测

基于地理探测器对社会经济因子(人口密度和 GDP)、气象因子(降雨和气温)、地形因子(高程、坡度和坡向)、植被类型、地貌类型以及土壤类型等 10 个影响 NDVI 空间分布格局的因子进行探测,探究其对 NDVI 空间分异的影响力水平. 结果表明西南高山峡谷区各因子影响力 q 值排序为[图 6 (a)]:高程>植被类型>土壤类型>降雨量>气温>人口密度>GDP>地貌类型>坡度>坡向,高程、植被类型和土壤类型 q 值均不低于 0.40,是影响 NDVI 空间分异的主导因子. 其次是气象因子,气温和降雨量, q 值分别为 0.274 和 0.225,为次要因子. 其他因子影响力微弱, q 值均低于 0.10,其中坡度和坡向 q 值分别为 0.011 和 0.002,影响力基本可以忽略不计.

从水土保持分区角度来看,各因子对植被生

长的影响在不同水土保持分区表现出明显差异[图 6(b)~6(e)]. 高程在各水土保持分区的 q 值均为最高,说明海拔对各分区 NDVI 空间分异的影响力最大,但与西南高山峡谷区相比较,藏东南高寒高山峡谷生态维护区高程的影响力增加明显, q 值为

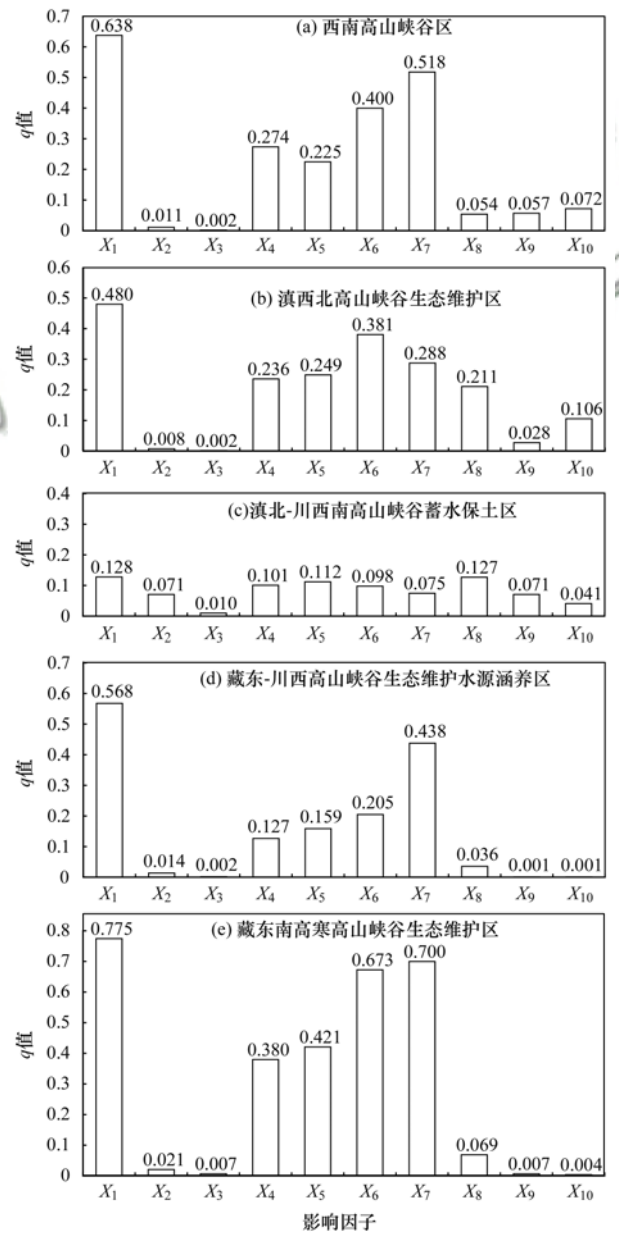


图 6 单因子探测 q 值

Fig. 6 The q values of single factor detection

0.775,其他水土保持分区高程的影响力均有不同程度的减弱.植被类型和土壤类型除在滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区影响力微弱, q 值低于0.10,在其他区域影响力较高, q 值均高于0.20.地貌类型在滇西北高山峡谷生态维护区和滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区影响力较高, q 值分别为0.211和0.127,在其他区域影响力微弱.气象因子在各水土保持分区 q 值均处于较高水平,均不低于0.10.人口密度在滇西北高山峡谷生态维护区影响力相对较高, q 值为0.106,其他区域影响力微弱.坡度、坡向以及GDP在各分区影响力微弱, q 值均低于0.10.相比于西南高山峡谷区而言,藏东南高寒高山峡谷生态维护区主导因子和次要因子的影响力更强, q 值增大;其他水土保持分区主导因子和次要因子影响力有所减弱, q 值减小.

3.3.2 交互因子探测

利用交互因子探测器可以揭示影响因子之间对NDVI空间分异的相互作用关系,由探测结果可知[图7(a)]:西南高山峡谷区影响因子交互作用 q 值均高于单因子作用的 q 值,说明双因子交互作用会增强对NDVI空间分异的影响力,且各因子交互作用均表现为双因子增强和非线性增强两种关系.高

程与其他因子交互作用影响力最强, q 值均超过0.60,其中高程 $\cap$ 植被类型交互作用的 q 值最高为0.714,其次是高程 $\cap$ 土壤类型交互作用的 q 值为0.688;土壤类型、植被类型与其他因子交互作用影响力也普遍较高, q 值均超过0.40,进一步验证了高程、植被类型和土壤类型对西南高山峡谷区NDVI空间分异的影响力占据主导地位.总体而言,影响因子对NDVI空间分异的影响并非独立,也不是简单叠加,而是相互促进.

从水土保持分区角度来看,影响因子之间交互作用在不同水土保持分区表现出较大差异.如图7(b)~7(e)所示,在滇西北高山峡谷生态维护区,高程 $\cap$ 土壤类型的 q 值最高,其次是高程 $\cap$ 降雨量和高程 $\cap$ 气温.滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区,高程 $\cap$ 地貌类型的 q 值最高,地貌类型 $\cap$ 降雨量和高程 $\cap$ 气温次之.藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区,高程 $\cap$ 气温的 q 值最高,然后是高程 $\cap$ 植被类型和高程 $\cap$ 土壤类型.藏东南高寒高山峡谷生态维护区交互作用的 q 值排名前三的组合分别为高程 $\cap$ 土壤类型、高程 $\cap$ 植被类型和高程 $\cap$ 地貌类型.由上可知,各水土保持分区影响植被生长的因素存在明显的区域差异,但主要受自然因子所调控,且在

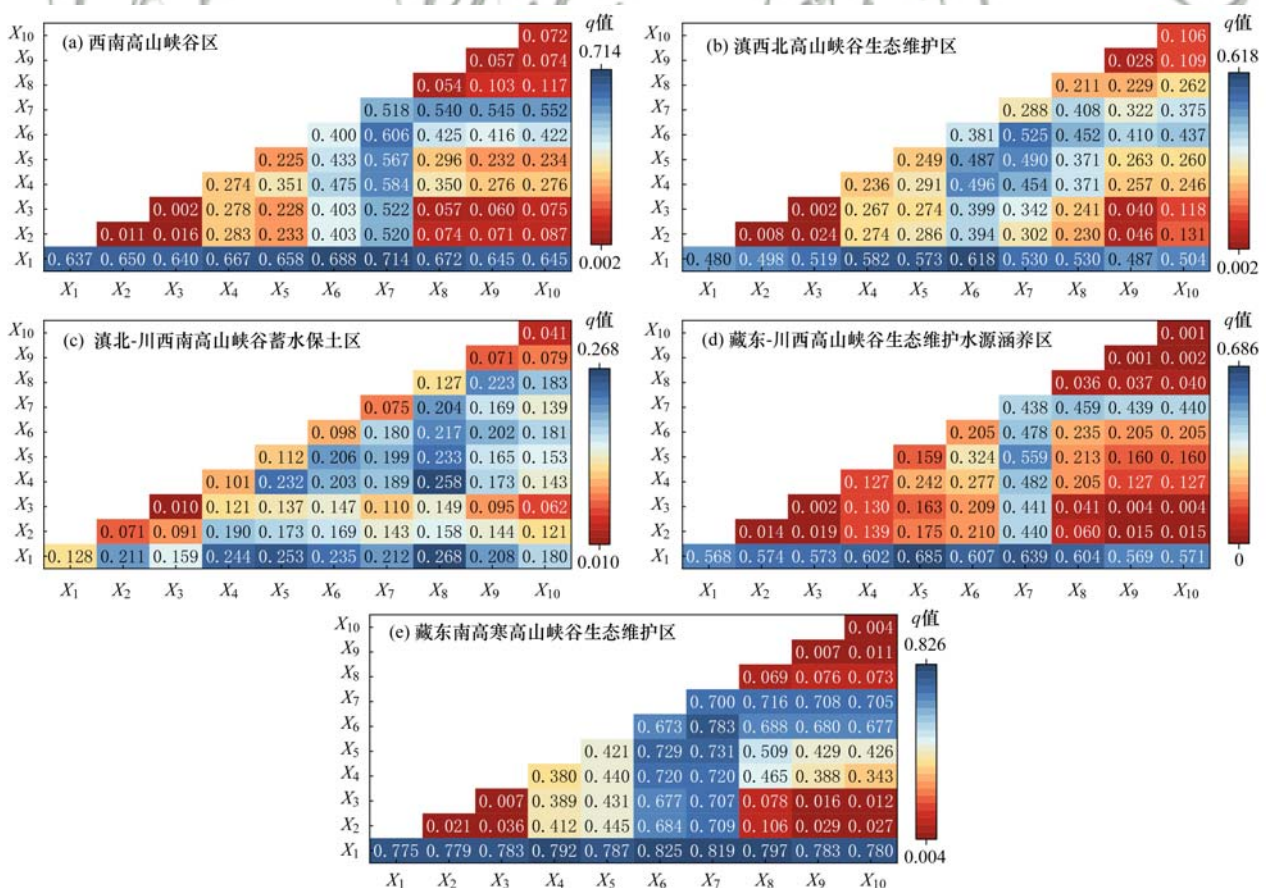


图7 交互因子探测 q 值

Fig. 7 The q values of interaction factor detection

各水土保持分区均表现为高程与其他因子交互作用的 q 值最高, 再进一步说明了高程对植被生长的影响力.

3.4 NDVI 稳定性与影响因子的关系

3.4.1 NDVI 稳定性分析

C_v 空间分布如图 6(a) 所示, 2000 ~ 2019 年西南高山峡谷区 C_v 值介于 0 ~ 2.01 之间, 均值较低, 为 0.11. 稳定性等级划分及分区统计结果见图 6(b) 和表 7, 处于低波动变化、较低波动变化的区域面积为 $549.58 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占据研究区总面积的 89.95%, 主要分布滇西北高山峡谷生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区、藏东-川西高山峡

谷生态维护水源涵养区北部和藏东南高寒高山峡谷生态维护区南部. 中等波动变化、中高波动变化和高波动变化的区域面积为 $61.45 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占比为 10.05%, 集中分布在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区北部, 而滇西北高山峡谷生态维护区和滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区分布少且零散. 总体而言, 研究时段内西南高山峡谷区植被整体稳定性较好, 但藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区北部植被变化大, 稳定性较差.

表 7 C_v 等级面积及占比
Table 7 Area and proportion of C_v grade

C_v 等级	滇西北		滇北-川西南		藏东-川西		藏东南		合计	
	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%	面积 $\times 10^3$ / km^2	占比 /%
低波动变化	52.79	82.57	52.93	78.76	190.95	59.62	75.73	47.44	372.40	60.95
较低波动变化	9.97	15.59	14.08	20.95	102.29	31.94	50.84	31.85	177.18	29.00
中等波动变化	0.98	1.53	0.17	0.25	20.02	6.25	21.17	13.26	42.34	6.92
中高波动变化	0.17	0.27	0.02	0.02	4.53	1.41	6.82	4.28	11.54	1.89
高波动变化	0.03	0.04	0.01	0.01	2.48	0.78	5.06	3.17	7.57	1.24

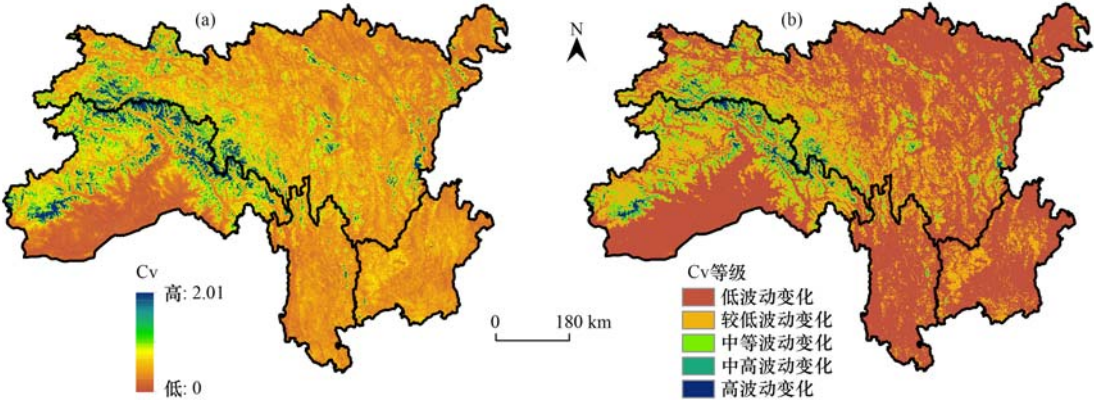


图 8 C_v 空间分布
Fig. 8 Spatial distribution of C_v

3.4.2 主导和次要因子对 NDVI 稳定性的影响

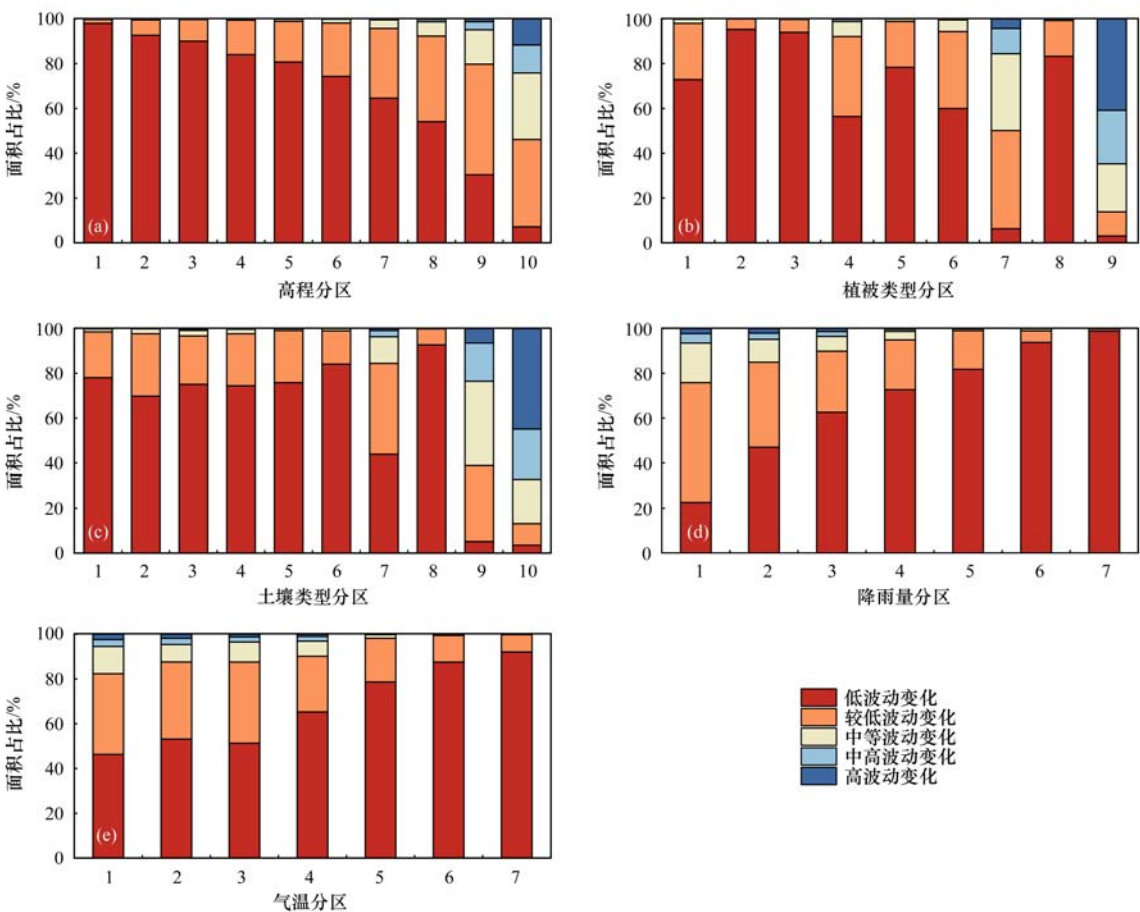
为进一步探究 NDVI 稳定性与影响因子的关系, 按照主导因子和次要因子分区对 NDVI 稳定性等级进行统计, 结果如图 9 所示. 随着高程的增加, NDVI 稳定性有所减弱, 低波动变化的区域面积比例减少, 而中等以上波动变化的区域面积比例呈现增加趋势. 植被类型分区中, 高山植被和其他植被类型区稳定性较差, 中等以上波动变化的区域面积占比分别为 49.89% 和 86.14%. 土壤类型分区中, 岩石和冰川雪被土壤类型区稳定性较差, 中等以上波动变化的区域面积占比分别为 61.09% 和 86.83%.

气温和降雨量对 NDVI 稳定性的影响具有相似性, 随着气温和降雨量的增加, NDVI 稳定性增强, 低波动变化的区域面积比例增加, 中等以上波动变化的区域面积比例呈现减少趋势. 综上所述, 在海拔高、气温低、降雨少、土壤贫瘠和植被较差等生态环境相对脆弱的区域, NDVI 稳定性相对较差, 未来应是生态修复工程重点关注的区域.

4 讨论

4.1 NDVI 时空变化特征

空间分布格局上, 2000 ~ 2019 年西南高山峡谷



各分区数值含义见表3

图9 影响因子分区中NDVI稳定性等级面积占比

Fig. 9 Proportion of NDVI stability grade area in the influence factor partition

区植被覆盖呈现“东南高,西北低”的空间分布格局,整体植被覆盖水平较高,但存在局部区域植被覆盖水平低,集中分布在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带,该区域海拔高,年均气温低,降雨量少,且多年冻土覆盖,土壤贫瘠,不适于植被生长,因此植被覆盖度较低.时间变化趋势上,期间西南高山峡谷区NDVI整体呈波动上升趋势,上升速率为 0.0046 a^{-1} ,但在2006年以及2007年出现了大幅下降,或与该时段内发生的极端干旱气候事件有所关联.植物群落是易受干旱影响的生态系统,由于极端干旱造成严重的水分亏缺和热量胁迫,引起生态环境恶化,部分植被消亡,导致植被覆盖度下降^[40~42].空间变化趋势上,85.90%区域面积的植被得到显著改善,其中滇西北高山峡谷生态维护区和滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区植被改善情况尤为明显,主要得益于多年来,国家实施退耕还林还草、天然林资源保护、长江流域防护林体系建设和西南岩溶石漠化综合治理等一系列林业生态工程,有效推进了西南高山峡谷区生态环境建设,区域植被得到了有效修复^[43].但由于人口增

长,城市化扩张,加之过度放牧导致土地退化^[44],部分区域植被明显退化,在藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界地带分布相对集中.

未来藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区交界的高海拔地带将是西南高山峡谷区生态保护和修复工作的重点,该区域植被覆盖度低,生态环境脆弱,植被稳定性差,且研究时段内植被退化明显,未来该区域植被也存在退化风险,应受到更多的关注.2021年12月,国家发改委、水利部、林草局以及自然资源部等4个部门印发了《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021-2035年)》,将继续推进青藏高原生态屏障区草原河湖生态修复、防沙治沙和水土保持等林业生态工程的实施,未来西南高山峡谷区整体生态环境将进一步改善.

4.2 NDVI空间分异影响因子分析

根据地理探测器探测结果可知,高程、植被类型和土壤类型是影响西南高山峡谷区NDVI空间分异的主导因子,其中高程是引起NDVI空间分异第一主导因子.西南高山峡谷区地形地势起伏大,地形

复杂,高程变化不光对区域水热条件存在影响,而且与植被类型、土壤类型的空间分布息息相关^[35].因此,高程对西南高山峡谷区 NDVI 空间分异的影响最高.结合图 1、图 10(a)和 10(b),西南高山峡谷区植被类型和土壤类型分布具有明显垂直地带性,低海拔区域土壤类型主要为铁铝土和淋溶土,养分足、肥力高,植被类型为森林(阔叶林和针阔混交林),故植被覆盖度较高.随着海拔上升,土壤相对瘠薄,植被适应性发生变化^[45,46],土壤类型以高山土为主,植被类型分布为灌丛、草甸和高山植被,植被生长条件相对较差,抑制了植被生长,区域植被覆盖度有所降低.

气温和降雨量是影响西南高山峡谷区 NDVI 空间分异的次要驱动因子.如图 10(c)和 10(d)所示,降雨量与气温垂直分异性较为明显,降雨量与气温较高的区域主要分布在滇西北高山峡谷生态维护区、滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区以及藏东南高寒高山峡谷生态维护区南部等海拔较低区域,该区域水热条件相对较好.对比 NDVI 空间分布(图 2)和植被类型与土壤类型分布[图 10(a)和 10(b)],空间上气温和降雨量较高的区域,土壤类型主要为铁铝土和淋溶土,植被类型为森林,是植被覆盖度较高的主要区域,丰沛的降水和充足的热量给植被生长提供了有利条件^[46].

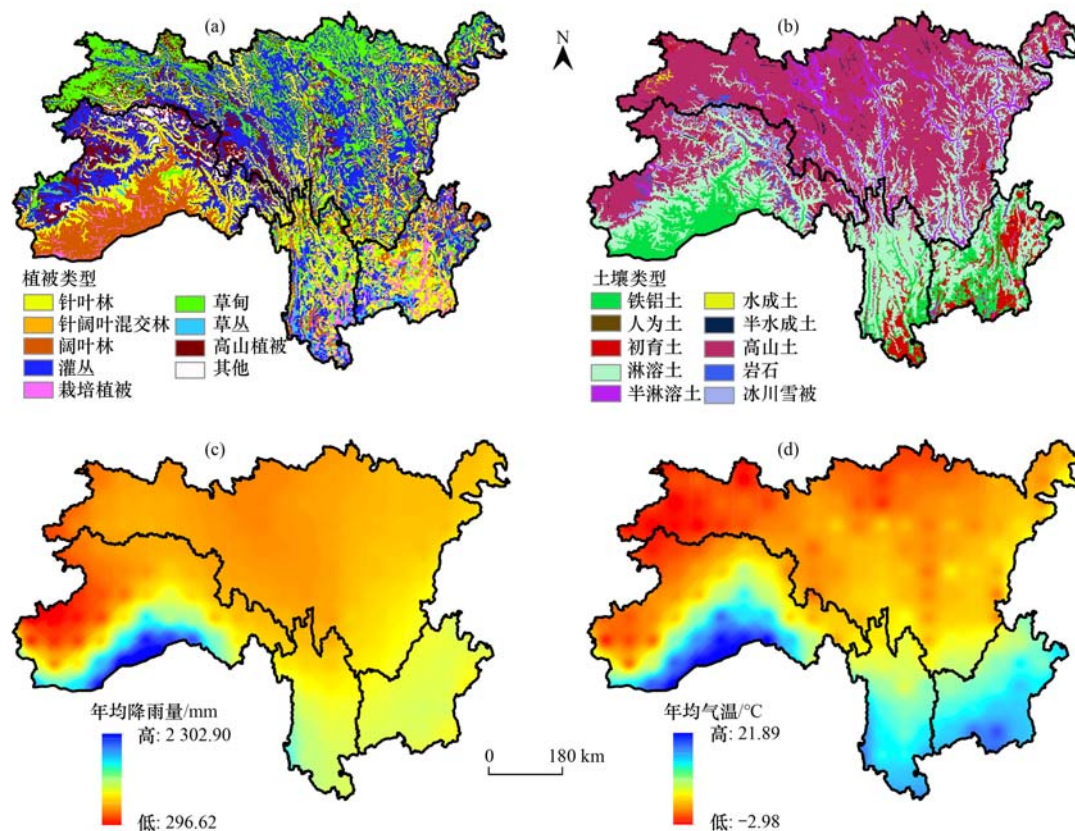


图 10 主导因子和次要因子空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of dominant and secondary factors

从水土保持分区的角度上看,各影响因子对西南高山峡谷区 NDVI 空间分异的影响力存在区域差异.高程、植被类型和土壤类型依旧是滇西北高山峡谷生态维护区、藏东-川西高山峡谷生态维护水源涵养区和藏东南高寒高山峡谷生态维护区影响 NDVI 空间分异的主导因子,其在藏东南高寒高山峡谷生态维护区的影响力更为显著,由于地势差异大,以上因子在该区域内垂直分异特征更加明显所致.但在滇北-川西南高山峡谷蓄水保土区各影响因子对 NDVI 空间分异的影响力都相对较弱,明显低于其他区域,或许是因为该区域地势平坦,植被类

型、土壤类型、气温和降雨量空间差异小.

交互因子探测结果表明,主导因子和次要因子之间交互作用影响力高于单因子作用影响力,均表现双因子增强和非线性增强两种关系,说明影响因子对 NDVI 空间分异的影响并非独立,也不是简单叠加,而是相互促进.综上可知,植被变化是多因素综合作用所产生的结果,故在制定西南高山峡谷区生态修复对策时,需因地制宜,如针对不同高程梯度、植被类型、土壤类型分布特征以及气候特点,划分区段,采取不同保护策略来恢复、建设和改善西南高山峡谷区生态环境.

5 结论

(1)从空间上看,西南高山峡谷区植被覆盖整体处于较高水平,中高和高等级植被覆盖的区域面积占比为 71.71%,低和中低植被覆盖的区域面积占比为 13.30%。从时间上看,2000~2019 年西南高山峡谷区植被恢复效果明显,呈现改善趋势的区域面积占比为 85.90%,退化趋势区域面积占比为 14.10%,且未来植被变化趋势还将以改善为主,持续改善和未来改善趋势的区域面积占比为 82.04%。

(2)地理探测器结果表明,影响因子对西南高山峡谷区 NDVI 空间分异的影响力 q 值排序为:高程>植被类型>土壤类型>降雨量>气温>人口密度>GDP>地貌类型>坡度>坡向,高程、植被类型和土壤类型为主导因子, q 值均不低于 0.40;气温和降雨量为次要因子, q 值分别为 0.274 和 0.225;其他因子影响力微弱。交互探测影响因子间交互作用 q 值均高于单因子作用 q 值,表现为双因子增强、非线性增强两种作用关系,其中高程 $\cap$ 植被类型组合 q 值最高为 0.714,其次是高程 $\cap$ 土壤类型组合 q 值为 0.688。

(3)从 NDVI 变化稳定性上看,期间 NDVI 整体稳定性较好,低波动变化和较低波动变化的区域面积占比为 89.95%;中等以上波动的区域面积占比为 10.05%,集中分布在海拔高、气温低、降雨少、土壤贫瘠和植被较差等生态环境相对脆弱的区域。

参考文献:

- [1] Jiao W Z, Wang L X, Smith W K, *et al.* Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades [J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi: 10.1038/s41467-021-24016-9.
- [2] Wang B, Jia K, Wei X Q, *et al.* Generating spatiotemporally consistent fractional vegetation cover at different scales using spatiotemporal fusion and multiresolution tree methods [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2020, **167**: 214-229.
- [3] Essaadia A, Abdellah A, Ahmed A, *et al.* The normalized difference vegetation index (NDVI) of the Zat valley, Marrakech: comparison and dynamics [J]. *Heliyon*, 2022, **8**(12), doi: 10.1016/J.HELIYON.2022.E12204.
- [4] Hu Y F, Wang H, Shao W Y, *et al.* Comparative analysis and comprehensive trade-off of four spatiotemporal fusion models for NDVI generation [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(23), doi: 10.3390/RS14235996.
- [5] Pompa-García M, Martínez-Rivas J A, Valdez-Cepeda R D, *et al.* NDVI values suggest immediate responses to fire in an uneven-aged mixed forest stand [J]. *Forests*, 2022, **13**(11), doi: 10.3390/F13111901.
- [6] Muradyan V, Asmaryan S, Ayzvanyan G, *et al.* Multidecadal trend analysis of Armenian mountainous grassland and its relationship to climate change using multi-sensor NDVI time-series [J]. *Geosciences*, 2022, **12**(11), doi: 10.3390/GEOSCIENCES12110412.
- [7] Niu B B, Li X J, Li F Q, *et al.* Vegetation dynamics and its linkage with climatic and anthropogenic factors in the Dawen River Watershed of China from 1999 through 2018 [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, **28**(38): 1-14.
- [8] Yan K, Gao S, Chi H J, *et al.* Evaluation of the vegetation-index-based dimidiate pixel model for fractional vegetation cover estimation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, **60**, doi: 10.1109/TGRS.2020.3048493.
- [9] Andleeb T, Ali Z, Mahmood Z, *et al.* Wheat varietal response to relative SPAD index (RSI) and relative normalized difference vegetation index (RNDVI) under variable nitrogen application and terminal heat stress along with yield repercussion [J]. *Agronomy*, 2022, **12**(7), doi: 10.3390/AGRONOMY12071538.
- [10] 李同艳. 西南地区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [11] 李焱, 戴睿, 张云霞, 等. 藏西南高原植被 NDVI 时空变化及其与高程梯度的关系 [J]. *水土保持研究*, 2022, **29**(4): 215-222.
Li Y, Dai R, Zhang Y X, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation NDVI and its relationship with altitude gradient in southwest Tibet Plateau [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 215-222.
- [12] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 等. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(3): 1138-1147.
Li M L, Yin L C, Zhang Y, *et al.* Spatio-temporal dynamics of fractional vegetation coverage based on MODIS-EVI and its driving factors in Southwest China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(3): 1138-1147.
- [13] 杨艳蓉, 侯召朕, 张增信. 2001-2018 年西南地区 NDVI 变化特征及影响因素 [J]. *水土保持通报*, 2021, **41**(2): 337-344.
Yang Y R, Hou Z Z, Zhang Z X. NDVI changes and driving factors in Southwest China from 2001 to 2018 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(2): 337-344.
- [14] Wang M, An Z F, Wang S Y. The time lag effect improves prediction of the effects of climate change on vegetation growth in Southwest China [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21), doi: 10.3390/RS14215580.
- [15] Wang Y Y, Chen X, Gao M, *et al.* The use of random forest to identify climate and human interference on vegetation coverage changes in southwest China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **144**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.109463.
- [16] 金芳芳. 西南山区生态特征的变化及其与人类活动的关系 [D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [17] 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 [J]. *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 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, **74**(9): 1758-1776.
- [18] Tao J, Xu T Q, Dong J W, *et al.* Elevation-dependent effects of climate change on vegetation greenness in the high mountains of southwest China during 1982-2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, **38**(4): 2029-2038.
- [19] 徐新良. 中国月度植被指数 (NDVI) 空间分布数据集 [EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系

- 统, <https://www.resdc.cn/>, 2018-06-06.
- [20] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, <https://www.resdc.cn/>, 2017-12-11.
- [21] 徐新良. 中国 GDP 空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统, <https://www.resdc.cn/>, 2017-12-11.
- [22] 杨鑫, 曹文侠, 鱼小军, 等. 基于近 20 年 MODIS NDVI 日数据的青海省草地资源动态监测及其对环境因子的响应[J]. 草业学报, 2021, **30**(9): 1-14.
Yang X, Cao W X, Yu X J, *et al.* Dynamic monitoring of grassland resources and their responses to environmental factors in Qinghai Province based on analyses of daily MODIS NDVI data from the past 20 years[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, **30**(9): 1-14.
- [23] Wei Z Z, Wan X Y. Spatial and temporal characteristics of NDVI in the Weihe River Basin and its correlation with terrestrial water storage[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(21), doi: 10.3390/RS14215532.
- [24] 马晓妮, 任宗萍, 谢梦瑶, 等. 砒砂岩区植被覆盖度环境驱动因子量化分析—基于地理探测器[J]. 生态学报, 2022, **42**(8): 3389-3399.
Ma X N, Ren Z P, Xie M Y, *et al.* Quantitative analysis of environmental driving factors of vegetation coverage in the Pisha sandstone area based on geodetector[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(8): 3389-3399.
- [25] 涂又, 姜亮亮, 刘睿, 等. 1982-2015 年中国植被 NDVI 时空变化特征及其驱动分析[J]. 农业工程学报, 2021, **37**(22): 75-84.
Tu Y, Jiang L L, Liu R, *et al.* Spatiotemporal changes of vegetation NDVI and its driving forces in China during 1982—2015[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(22): 75-84.
- [26] 董镜, 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[J]. 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[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, **25**(8): 120-131.
- [27] Bhuyan M, Singh B, Vid S, *et al.* Analysing the spatio-temporal patterns of vegetation dynamics and their responses to climatic parameters in Meghalaya from 2001 to 2020[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2023, **195**(1), doi: 10.1007/S10661-022-10685-6.
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [29] Xu M R, Zhang J, Li Z H, *et al.* Attribution analysis and multi-scenario prediction of NDVI drivers in the Xilin Gol grassland, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, **14**(9): 941-961.
- [30] Li X C, Niu Y, He Q N, *et al.* Identifying driving factors of the runoff coefficient based on the geographic detector model in the upper reaches of Huaihe River Basin[J]. *Open Geosciences*, 2022, **14**(1): 1421-1433.
- [31] 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 等. 基于地理探测器的山西省 2000~2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析[J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 312-322.
Shao J H, Li J, Yan X G, *et al.* Analysis of spatiotemporal variation characteristics and driving forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 based on geodetector [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 312-322.
- [32] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. *Ecological Indicators*, 2016, **67**: 250-256.
- [33] 徐勇, 郑志威, 郭振东, 等. 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3730-3740.
Xu Y, Zheng Z W, Guo Z D, *et al.* Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(7): 3730-3740.
- [34] Liang P, Yang X P. Landscape spatial patterns in the Maowusu (Mu Us) Sandy Land, northern China and their impact factors [J]. *CATENA*, 2016, **145**: 321-333.
- [35] 龚仓, 王亮, 王顺祥, 等. 基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(10): 4566-4577.
Gong C, Wang L, Wang S X, *et al.* Spatial differentiation and influencing factor analysis of soil heavy metal content at town level based on geographic detector[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(10): 4566-4577.
- [36] 高思琦, 董国涛, 蒋晓辉, 等. 基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(4): 336-343.
Gao S Q, Dong G T, Jiang X H, *et al.* Analysis of vegetation coverage changes and natural driving factors in the three-river headwaters region based on geographical detector[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, **29**(4): 336-343.
- [37] Wu S P, Gao X, Lei J Q, *et al.* Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, **14**(1): 14-33.
- [38] Han W J, Chen D H, Li H, *et al.* Spatiotemporal variation of NDVI in Anhui Province from 2001 to 2019 and its response to climatic factors[J]. *Forests*, 2022, **13**(10), doi: 10.3390/F13101643.
- [39] 王晓蕾, 石守海, 陈江朝霞. 黄河流域植被覆盖度变化及驱动因素[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(11): 5358-5368.
Wang X L, Shi S H, Chen J Z X. Change and driving factors of vegetation coverage in the Yellow River Basin [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(11): 5358-5368.
- [40] 马梓策, 孙鹏, 姚蕊, 等. 内蒙古地区干旱时空变化特征及其对植被的影响[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(6): 231-240.
Ma Z C, Sun P, Yao R, *et al.* Temporal and spatial variation of drought and its impact on vegetation in Inner Mongolia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(6): 231-240.
- [41] 陆梦恬. 长江流域干旱和热浪对植被绿度和生产力的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [42] 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 等. 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 3230-3240.
Xu Y, Huang W T, Dou S Q, *et al.* Responding mechanism of vegetation cover to climate change and human activities in southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 3230-3240.
- [43] 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 等. 2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究[J]. 环境科学, 2023, **44**(1): 323-335.
Xu Y, Dai Q Y, Huang W T, *et al.* Spatio-temporal variation in vegetation cover and its driving mechanism exploration in

- Southwest China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(1): 323-335.
- [44] 柴立夫, 田莉, 奥勇, 等. 人类活动干扰对青藏高原植被覆盖变化的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(6): 382-388.
- Chai L F, Tian L, Ao Y, *et al.* Influence of human disturbance on the change of vegetation cover in the Tibetan Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(6): 382-388.
- [45] 张友辉. 江西山地土壤系统分类和垂直地带性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [46] 胡实, 赵茹欣, 贾仰文, 等. 中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素[J]. *自然杂志*, 2018, **40**(1): 12-16.
- Hu S, Zhao R X, Jia Y W, *et al.* The characteristic of vegetation vertical zonality and the influential factors in typical mountains in China[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, **40**(1): 12-16.

《环境科学》连续 11 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2022 年 12 月 5 日, 中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2022 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果. 《环境科学》荣获“2022 中国最具国际影响力学术期刊”称号, 是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊, 也是自首次评选以来连续 11 次获此殊荣. 评选以期刊国际影响力指数进行排序, 遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)