

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

不同国家农用地土壤环境标准比较与启示  
李勣之, 姜璐, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年2月

第43卷 第2期  
Vol.43 No.2



# 目次

## 综述

- 不同国家农用地土壤环境标准比较与启示 ..... 李助之, 姜蓉, 王国庆, 陈玉东, 龙涛, 林玉锁 (577)  
再生水水质稳定性评价指标与体系 ..... 张馨怡, 魏东斌, 杜宇国 (586)

## 研究报告

- 兰州市采暖期和非采暖期大气降尘重金属的分布特征及来源 ..... 黄文, 王胜利 (597)  
基于多种新型受体模型的 PM<sub>2.5</sub> 来源解析对比 ..... 王振宇, 李永斌, 郭凌, 宋志强, 许艳玲, 王丰, 梁维青, 史国良, 冯银厂 (608)  
华中地区夏季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子污染特征及来源分析 ..... 苏业旺, 刘威杰, 毛瑶, 程铨, 石明明, 许安, 李星谕, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (619)  
淄博 2021 年元宵节 PM<sub>2.5</sub> 水溶性离子污染特征 ..... 陈巧, 吴丽萍, 徐勃, 张向炎, 李梦辉, 赵雪艳, 杨文 (629)  
浙江省大气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中全氟化合物污染特征分析及健康风险评估 ..... 李冰洁, 陈金媛, 刘铮铮, 王静, 何士冲 (639)  
2001~2019 年气象条件对江苏省 PM<sub>2.5</sub> 分布的影响 ..... 潘晨, 康志明 (649)  
基于神经网络和数值模型的重点区域 PM<sub>2.5</sub> 预报比较分析 ..... 高愈霄, 汪巍, 黄永海, 王晓彦, 朱媛媛, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (663)  
2015~2020 年海南省臭氧时空变化及其成因分析 ..... 符传博, 徐文帅, 丹利, 佟金鹤 (675)  
济南市城区夏季臭氧污染过程及来源分析 ..... 孙晓艳, 赵敏, 申恒青, 刘杨, 杜明月, 张文娟, 许宏宇, 范国兰, 公华林, 李青松, 李大秋, 高晓梅, 张丽娜 (686)  
山东临沂大气夏季典型时段臭氧污染特征及其控制因素分析 ..... 杨雪, 安馨悦, 刘玉启, 江春美, 张鹏程, 李灵婕, 赵世阳, 张书源 (696)  
基于气团老化程度对挥发性有机物分类改善 PMF 源解析效果 ..... 朱玉凡, 陈强, 刘晓, 张瑞欣, 郭文凯 (707)  
日照市夏季 VOCs 物种空间分布特征及其对臭氧生成的影响 ..... 姚维杰, 王大玮, 谢付堂, 朱宏伟, 孟祥宇, 田雨, 刘航, 刘晓咏, 张宇婷, 雷山东, 孙业乐, 吴林, 潘小乐, 王自发 (714)  
泰山大气卤代烃的长期变化趋势与来源 ..... 赵峰, 陈天舒, 董灿, 李洪勇, 刘子璐, 毕于健, 国兆新, 王新锋, 杨凌霄, 王韬, 王文兴, 薛丽坤 (723)  
典型内燃叉车尾气挥发性有机物与正构烷烃的排放特征 ..... 周文钦, 李成, 刘俊文, 朱曼妮, 桂小亮, 余飞, 廖松地, 姜帆, 李光辉, 蒋斌, 郑君瑜 (735)  
2000~2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制 ..... 田智慧, 任祖光, 魏海涛 (743)  
西南喀斯特流域土地利用对河流溶解无机碳及其同位素的影响 ..... 徐森, 李思亮, 钟君 (752)  
生物炭添加对太湖滨岸带土壤氮矿化和淋失特征的影响 ..... 熊钰婷, 袁旭音, 周慧华, 高一丹, 汪宜敏 (762)  
不同降雨条件下北运河河岸带类型对径流污染削减效果的影响 ..... 朱利英, 赵凯, 张俊亚, 王春荣, 魏源送 (770)  
雨源型城市河流污染特征及水质联合评价: 以深圳龙岗河为例 ..... 毕业亮, 王华彩, 夏兵, 姜参参, 吴伟业, 李志林, 李诗敏, 宿辉, 白志辉, 徐圣君, 庄绪亮 (782)  
廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析 ..... 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 门聪, 张丽萍, 黄守斌 (795)  
北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析 ..... 郭芝芝, 苏振华, 邱琰茗, 郭道宇 (803)  
河北省典型景观水体反硝化菌群落时空分布特征及驱动因素: 以石家庄为例 ..... 陈召莹, 张紫薇, 张甜娜, 周石磊, 张艺冉, 董宛佳, 于明会, 张一凡, 张家丰 (813)  
青海湖流域有色可溶性有机物来源与特征分析 ..... 俞晓琴, 孟先强, 吴华武, 陈慧敏, 李宇阳, 朱俊羽, 郭燕妮, 姚磊 (826)  
鄱阳湖丰枯情景对有色可溶性有机物生物可利用性及收支平衡的影响 ..... 郭燕妮, 姚晓龙, 陈慧敏, 俞晓琴, 李宇阳, 朱俊羽, 韩龙飞, 周蕾, 周永强 (837)  
鄱阳湖沉积物溶解性有机质光谱特征 ..... 罗燕清, 万智巍, 晏彩霞, 聂明华, 丁明军, 鞠民, 刘赞 (847)  
汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 ..... 李星谕, 李朋, 苏业旺, 石明明, 胡天鹏, 毛瑶, 刘力, 张雅, 邢新丽, 祁士华 (859)  
基于核密度估计的城市基础要素与街尘营养元素含量特征关联 ..... 王子娇, 李叙勇 (867)  
新冠疫情下武汉典型饮用水水源中 DBPs 污染特征与风险评估 ..... 张坤峰, 昌盛, 涂响, 付青, 杨光, 樊月婷, 孙兴滨 (878)  
铁改性石英砂过滤协同控制饮用水含氮消毒副产物和条件致病菌 ..... 齐鹏, 胡春, 邢学群, 毕志浩, 李泽松 (887)  
氮掺杂生物炭催化臭氧对于布洛芬的降解特性与机制 ..... 柴铨, 许路, 金鑫, 石炬, 吴晨曦, 金鹏康 (896)  
环糊精多孔聚合物对水中染料分子的吸附性能及主客效应 ..... 赵传靓, 王子婕, 闫仪, 徐慧, 周俊垣, 杨利伟, 王东升 (907)  
冷冻 PN/A 颗粒污泥快速活化过程中的污泥形态与菌群演化特征分析 ..... 黄子恒, 张立, 崔舒惠, 张琦英, 文言, 钱飞跃 (920)  
不同阳离子聚丙烯酰胺有机脱水剂对污泥脱水性能的影响 ..... 冯齐云, 高宝玉, 岳钦艳, 石伟杰, 冯春晖, 周继柱, 王国瑞 (928)  
云南某矿区小流域土壤重金属健康风险评价 ..... 刘洋, 何朝辉, 牛学奎, 张迪, 潘波 (936)  
山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析 ..... 张丁, 黄容, 高雪松 (946)  
地累积指数法评价多金属环境质量的方法优化探索: 以农业发达地区为例 ..... 鞠铁男, 雷梅 (957)  
西南地质高背景区蔬菜 Pb 的安全生产阈值与土地质量类别划分 ..... 穆德苗, 孙约兵 (965)  
典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价 ..... 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 彭锐, 石雪芳, 李峰 (975)  
矿业废弃地不同生态修复模式下植物多样性及重金属富集迁移特征 ..... 周鹏飞, 张世文, 罗明, 魏洪斌, 宋强, 方兵, 庄红娟, 陈弘扬 (985)  
不同种植年限蔬菜大棚土壤特性、重金属累积和生态风险 ..... 任强, 孙瑞玲, 郑凯旋, 刘祎丹, 阮心玲, 王洋洋 (995)  
温室与大田种植方式对胡萝卜生长过程中重金属吸收的影响 ..... 曹春, 任丹, 吕贞英, 张鹏, 李锦超, 陈勋文, 王俊坚 (1004)  
两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全的影响 ..... 王港, 余海英, 李廷轩, 唐婵 (1015)  
复合淋洗条件下农用地耕作层土壤去镉效率及其功能调节 ..... 曹坤坤, 张沙沙, 胡学玉, 张敏, 胡晓晓, 王子劲 (1023)  
产多胺细菌调控根际细菌群落阻控小麦 Cd 吸收效应 ..... 李晓哲, 覃善梅, 陈兆进, 张君, 姚伦广, 李娜, 虎发虎, 韩辉 (1031)  
土壤 *phoC* 和 *phoD* 微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 杨文娜, 余冻, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 王子芳, 高明 (1040)  
刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系 ..... 李文杰, 张颖皎, 赵雅萍, 许森平, 任成杰, 杨改河, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娟, 韩新辉 (1050)  
中亚热带不同林龄马尾松林土壤酶学计量特征 ..... 焦鹏宇, 郭文, 陈泽龙, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (1059)  
稻田与旱地土壤中真菌和细菌对秸秆碳的利用特征 ..... 邓少虹, 郑小东, 毛婉琼, 陈香碧, 胡亚军, 程爱武, 何寻阳, 苏以荣 (1069)  
模拟及实际根系分泌物对苤蓝土壤微生物群落的影响 ..... 韩博远, 张闻, 胡芳雨, 赵庆庆, 卢媛, 孔学, 吕俊岗 (1077)  
德兴铜矿区抗生素抗性基因污染特征及其驱动因子 ..... 韩柳, 楼倩, 乔敏, 刘梦婷, 钟家有, 丁惠君 (1089)  
陕西渭北旱塬区农田土壤有机质空间预测方法 ..... 尉芳, 刘京, 夏利恒, 徐仲伟, 龙小翠 (1097)  
长三角农田轮作系统氨排放特征、转化机制和减排潜力 ..... 徐昶, 苗文亮, 倪远之, 沈根祥, 钱晓雍, 付侃, 高宗源, 王振旗 (1108)  
《环境科学》征订启事(618) ..... 信息(685, 935, 956)

# 2000 ~ 2020 年黄河流域植被时空演化驱动机制

田智慧<sup>1,2</sup>, 任祖光<sup>3</sup>, 魏海涛<sup>1,2,\*</sup>

(1. 郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450000; 2. 中国气象科学研究院-郑州大学生态气象联合实验室, 郑州 450000; 3. 郑州大学化学学院, 郑州 450000)

**摘要:** 以归一化植被指数(NDVI)作为植被覆盖及生长状况指标, 基于2000~2020年MODIS NDVI数据及同时期气象数据, 采用Theil-Sen斜率估算、Mann-Kendall检验、相关性分析和残差分析等方法研究了2000~2020年黄河流域植被时空演化驱动机制。结果表明, 2000~2020年黄河流域生长季NDVI均值以 $0.005\text{ a}^{-1}$ 的速率波动上升, 植被明显改善的区域主要分布于流域中游的秦岭山系、陕北高原和吕梁山系; 黄河流域生长季NDVI与降水和气温的偏相关系数均值分别为0.57和0.49, 降水对植被的影响高于气温; 人类活动对植被生长起明显改善的区域主要分布在流域中部的陕北高原、吕梁山系和宁夏南部等区域, 对植被生长起抑制作用的区域主要分布在银川、包头、西安、洛阳、郑州和太原等人类活动强烈的城市区域; 人类活动和气候变化分别对黄河流域植被变化贡献了72%和28%, 在人类活动和气候变化的驱动下, 黄河流域植被生长得到改善的面积占流域面积的96.4%, 其中人类活动贡献率大于80%的区域面积占34.3%, 主要分布在流域中部和东南部。气候变化贡献率大于80%的区域面积占4.2%, 主要分布在流域内川藏高原和陇中黄土高原等区域; 研究结果可为黄河流域生态保护及高质量发展提供科学支撑。

**关键词:** 黄河流域; 归一化植被指数(NDVI); 气候变化; 人类活动; 残差分析

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)02-0743-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202105213

## Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020

TIAN Zhi-hui<sup>1,2</sup>, REN Zu-guang<sup>3</sup>, WEI Hai-tao<sup>1,2,\*</sup>

(1. School of Earth Sciences and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China; 2. Joint Laboratory of Eco-Meteorology, Zhengzhou University-Chinese Academy of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450000, China; 3. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The NDVI (normalized difference vegetation index) was used as the vegetation coverage index. Based on the NDVI and weather data from 2000 to 2020, the characteristics of the spatiotemporal evolution and the driving mechanism of vegetation were investigated by using correlation analysis, the Theil-Sen estimator, the Mann-Kendall method, and multivariate residual trend analysis. The results showed that the growing season average NDVI in the Yellow River basin was a fluctuating upward trend of  $0.005\text{ a}^{-1}$  from 2000 to 2020. Areas with significantly improved vegetation in the basin were mainly distributed in the Qinling Mountains, the Northern Shaanxi Plateau, and the Lvliang Mountains in the midstream. The average value of the partial correlation coefficient between the growing season average NDVI and rainfall in the Yellow River basin was 0.57, and the average value of the partial correlation coefficient between the growing season average NDVI and temperature was 0.49. The impact of rainfall on vegetation was higher than that of temperature. The areas where human activities significantly improved vegetation growth were mainly distributed in the northern Shaanxi Plateau, the Lvliang Mountains, and southern Ningxia. The areas where human activities inhibited vegetation growth were mainly distributed in cities with strong human activities such as Yinchuan, Baotou, Xi'an, Luoyang, Zhengzhou, and Taiyuan. Human activities and climate change contributed to 72% and 28% of the vegetation change in the Yellow River basin. Driven by human activities and climate change, the area where vegetation growth has improved in the Yellow River basin accounted for 96.4% of the basin area, of which the contribution rate of human activities greater than 80% of the area accounted for 34.3%, which was mainly distributed in the middle and southeast of the basin. The area with a contribution rate of climate change greater than 80% accounted for 4.2%, which was mainly distributed in the Sichuan-Tibet Plateau and Longzhong Loess Plateau in the basin. The results of this research can provide scientific support for the ecological protection and high-quality development of the Yellow River basin.

**Key words:** Yellow River basin; normalized difference vegetation index (NDVI); climate change; human activities; residuals analysis

植被作为生产者,是生态系统最重要的角色之一,也是连结土壤、大气和水分的纽带,所以监测植被覆盖、生长状况及其背后的驱动机制有着重要的意义<sup>[1~3]</sup>。遥感数据因其良好的时空连续性及覆盖范围广等特点,被认为是研究植被变化的重要数据源。在诸多遥感数据中,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)被认为是植被生长状况及覆盖程度的最佳指示因子,是监测区域植被及生态环境最有效的指标<sup>[4,5]</sup>。

目前国内外学者常用的 NDVI 数据集主要包括

MODIS NDVI、SPOT-VGT NDVI 和 GIMMS NDVI。3 种数据集在时空分辨率、数据处理方法、传感器参数等方面均有一定的差异,其中 MODIS NDVI 和 SPOT-VGT NDVI 有着较高的空间分辨率,而 GIMMS NDVI 具有较长的时间序列,3 种数据集各有其优

收稿日期: 2021-05-20; 修订日期: 2021-07-23

基金项目: 2020 年度国家超级计算郑州中心创新生态系统建设科技专项(201400210900); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)项目(192102210124)

作者简介: 田智慧(1965~),男,博士,教授,主要研究方向为环境遥感和高性能地理计算, E-mail: jiezhtian@zzu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: zzu\_wei@163.com

势<sup>[6-8]</sup>。

国内外学者常基于以上数据集,采用趋势分析、Hurst 指数、变异性分析和相关性分析等方法在不同时空尺度上研究植被时空演化特征及气候因子对其影响。如 Zewdie 等<sup>[9]</sup>的研究基于 MODIS NDVI 数据,结果表明埃塞俄比亚西北部地区植被同降水呈正相关且降水对植被的影响存在 1 个月的滞后期。Emamian 等<sup>[10]</sup>的研究同样基于 MODIS NDVI 数据,结果表明伊朗东北部植被退化的区域面积要大于改善区域。De Keersmaecker 等<sup>[11]</sup>的研究基于 GIMMS NDVI 数据,结果表明随着时间的增长澳大利亚植被稳定性下降。我国学者主要对青藏高原<sup>[12]</sup>、三江源<sup>[13]</sup>、黄土高原<sup>[14]</sup>和三北防护林<sup>[15]</sup>等一些生态敏感区植被时空演化特征进行重点研究,均取得了一定的成果。

除气候变化外,人类活动也是植被时空演化的重要驱动因素,国内外学者常用植被数据与社会经济数据进行相关性分析或者残差趋势法探讨人类活动对植被生长的影响。如 John 等<sup>[16]</sup>的研究利用 NDVI 数据及同时期气候数据及社会经济数据,结果表明蒙古高原 NDVI 与降水呈正相关、与牲畜密度呈负相关。李辉等<sup>[17]</sup>的研究基于 NPP 数据,结果表明人类活动是内蒙古草地退化的主要原因。Qu 等<sup>[18]</sup>的研究基于 GIMMS NDVI 数据,结果表明生态恢复工程是长江流域植被改善的主要因素。董懿等<sup>[19]</sup>的研究同样基于 GIMMS NDVI 数据,结果表明人类活动对黄土高原植被生长有双重影响。

黄河流域地貌复杂、气候多样且人口众多,其

生态环境敏感、人地关系复杂。在此背景下,对黄河流域生态环境做一个整体性评估显得尤为重要。植被作为流域生态系统的生产者,是维持流域生态平衡的重要角色之一,所以认清流域内植被覆盖变化及其驱动机制对于流域生态的可持续发展有着重要的意义。然而目前针对黄河流域范围内植被时空演化的研究存在着分辨率过低、不同驱动要素难以区分和不同驱动要素的相对贡献难以量化等问题<sup>[20,21]</sup>,以致流域内植被时空演化特征及其驱动机制尚不明确。

鉴于此,本研究基于 MODIS NDVI 数据和地面气象数据,采用 Mann-Kendall 检验、Theil-Sen 斜率估算、相关性分析和残差分析等多种方法在 1 km 尺度定量探究黄河流域植被时空演化特征及其驱动机制,以期对黄河流域生态可持续发展做出科学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

黄河流域位于我国干旱、半干旱和半湿润地区(图 1),东西长约 1 900 km,南北宽约 1 100 km,总面积约  $8.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,其中内蒙古河口镇以上河段为黄河流域上游,河南桃花峪以下河段为黄河流域下游,两地之间河段为黄河流域中游;黄河流域发源于青海巴颜喀拉山,从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元;黄河流域人口众多,地理和气候条件十分复杂,其人口、资源和环境可持续发展一直是人们所关注的焦点<sup>[20-22]</sup>。

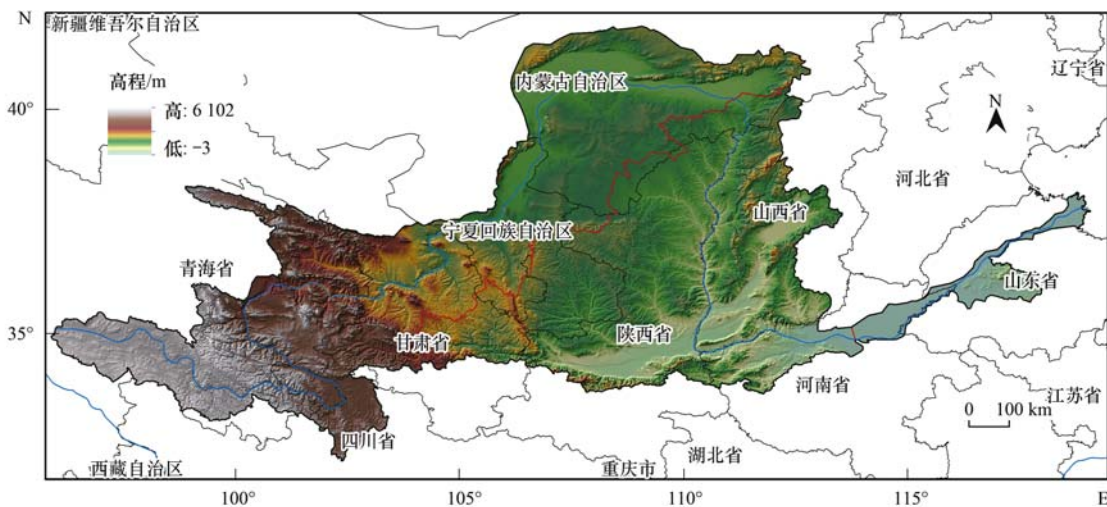


图 1 黄河流域区位及高程

Fig. 1 Location and elevation of the Yellow River basin

### 1.2 数据来源与处理

NDVI 数据为 2000 ~ 2020 年 MOD13A2 数据产品,该数据来源于美国航空航天宇航局 ([https://](https://lpdaac.usgs.gov/)

[lpdaac.usgs.gov/](https://lpdaac.usgs.gov/)),其空间分辨率为 1 km,每月两景,使用 MRT 工具对 MOD13A2 数据进行 HDF 到 Tiff 的格式转换、重投影、裁剪等,得到黄河流域每



年生长季(4~10月)14幅影像的NDVI均值数据。

气象数据为生长季(4~10月)降水量、气温均值数据,该数据来源于国家地球系统科学数据中心黄土高原分中心(<http://loess.geodata.cn/>),空间分辨率约1 km。该数据是以CRU全球0.5°气候数据及WorldClim全球高分辨率气候数据为基础,通过Delta空间降尺度方案在中国地区降尺度并用496个独立气象观测点数据进行验证生成,将该数据集在ArcGIS10.5中进行裁剪等处理,进而获取黄河流域气象数据。

### 1.3 Theil-Sen 斜率估算分析法

Theil-Sen 斜率估算是一种非参数检验方法,它不要求时间序列满足序列自相关和正态分布等假设,能够有效处理小的离群点和缺失值噪声。Theil-Sen 斜率估算通过计算时间序列中两两数据对之间的斜率,将斜率中值作为时间序列变化的总体趋势<sup>[23]</sup>。计算方法如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中, $\beta$ 为所有数据对斜率的中值,当 $\beta > 0$ 时植被变化呈现出上升趋势,当 $\beta < 0$ 时植被变化呈现出下降趋势。 $X_i$ 和 $X_j$ 为NDVI时间序列中第 $i$ 和第 $j$ 年的值,Median表示取中值。

### 1.4 Mann-Kendall 检验分析法

Mann-Kendall 检验是一种非参数检验方法,作为Theil-Sen 斜率估算的补充,用来检验时间序列趋势的显著性<sup>[24]</sup>。计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sign}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $n$ 为数据集长度,sign为符号函数,NDVI<sub>*i*</sub>和NDVI<sub>*j*</sub>为样本时序数据的集合。当 $Z$ 的绝对值大于1.65、1.96和2.58时,表示趋势分别通过了信度为90%、95%和99%的显著性检验,本研究采用通过95%的信度检验。

### 1.5 相关分析法

相关性分析主要用来反映要素之间的相关程度和相关方向,本研究主要采用基于像元的相关性分析,以相关系数表示NDVI与气象因素的相关性,在简单相关系数的基础上计算固定某一要素的,探讨另外两个要素间的相关性,得出偏相关系数<sup>[25~27]</sup>。计算过程如下:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为两变量 $n$ 年的平均值, $R_{xy}$ 为两要素间的简单相关系数, $n$ 为样本。

$$R_{xy,z} = \frac{R_{xy} - R_{xz}R_{yz}}{\sqrt{(1 - R_{xz}^2)} \sqrt{(1 - R_{yz}^2)}} \quad (7)$$

式中, $R_{xy,z}$ 为固定自变量 $z$ 后,因变量 $x$ 与自变量 $y$ 的偏相关系数。

通过 $t$ 检验方法完成偏相关系数的显著性检验,计算公式如下:

$$t = \frac{R_{xy,z}}{\sqrt{1 - R_{xy,z}^2}} \sqrt{n - m - 1} \quad (8)$$

式中, $n$ 为研究年数, $m$ 为自变量个数。

### 1.6 残差分析法

本文中此方法基于植被生长变化仅受到气候变化和人类活动影响的假设,逐像元对NDVI与降水、气温数据做多元回归分析,进而得到NDVI的预测值,而后与NDVI真实值做差值运算,得到逐年残差,最后采用一元线性回归对逐年残差值进行趋势分析<sup>[28~30]</sup>。计算过程如下:

$$\text{DNVI}_{\text{CC}} = a \times \text{Pre} + b \times \text{Tem} + c \quad (9)$$

$$\text{DNVI}_{\text{HZ}} = \text{NDVI}_{\text{OBS}} - \text{NDVI}_{\text{CC}} \quad (10)$$

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times \text{NDVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \text{NDVI}_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left( \sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (11)$$

式中, $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为多元回归方程的系数,Pre为生长季降水量,Tem为生长季平均气温,NDVI<sub>CC</sub>为多元回归方程得出的预测值,NDVI<sub>OBS</sub>为实际观测值,NDVI<sub>HA</sub>为NDVI实际值与预测值的差值,slope为一元线性回归方程的斜率, $i$ 为时间变量, $n$ 为年数,NDVI<sub>*i*</sub>为第 $i$ 年人类活动或气候变化主导的NDVI值。

根据残差趋势分析结果,将驱动植被NDVI时空演化的因素分为6类,其具体判定计算方法如表1<sup>[31]</sup>。

表 1 植被 NDVI 变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法

Table 1 Identification criteria and contribution calculations of the drivers of NDVI change

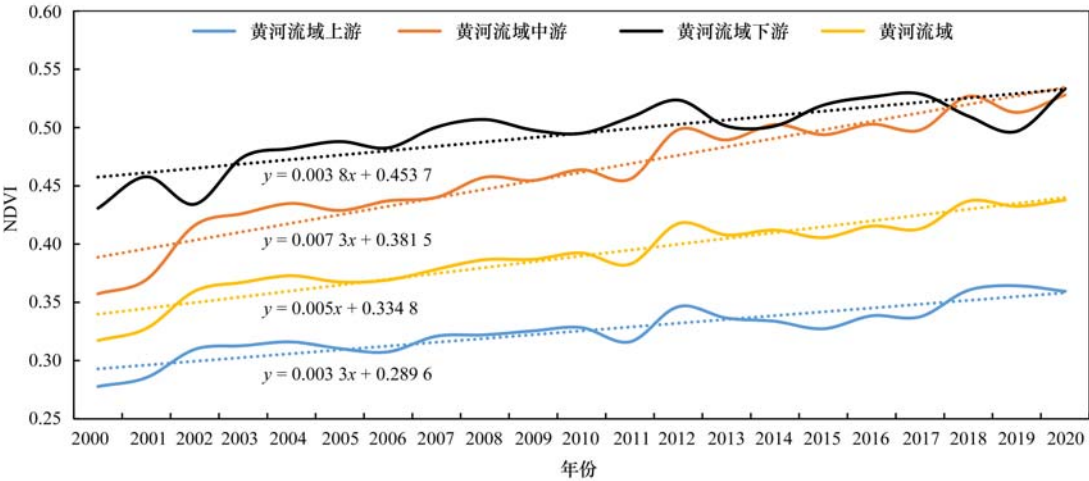
| Slope(NDVI <sub>OBS</sub> ) | 驱动要素    | 划分标准                       |                            | 贡献率/%                                                  |                                                        |
|-----------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                             |         | Slope(NDVI <sub>CC</sub> ) | Slope(NDVI <sub>HA</sub> ) | 气候变化(CC)                                               | 人类活动(HA)                                               |
| >0(改善)                      | CC 和 HA | >0                         | >0                         | Slope(NDVI <sub>CC</sub> )/Slope(NDVI <sub>OBS</sub> ) | Slope(NDVI <sub>HA</sub> )/Slope(NDVI <sub>OBS</sub> ) |
|                             | CC      | >0                         | <0                         | 100                                                    | 0                                                      |
|                             | HA      | <0                         | >0                         | 0                                                      | 100                                                    |
| <0(抑制)                      | CC 和 HA | <0                         | <0                         | Slope(NDVI <sub>CC</sub> )/Slope(NDVI <sub>OBS</sub> ) | Slope(NDVI <sub>HA</sub> )/Slope(NDVI <sub>OBS</sub> ) |
|                             | CC      | <0                         | >0                         | 100                                                    | 0                                                      |
|                             | HA      | >0                         | <0                         | 0                                                      | 100                                                    |

2 结果与分析

2.1 黄河流域植被时间变化特征

从逐年生长季 NDVI 均值变化情况来看,黄河流域 2000 ~ 2020 年生长季 NDVI 均值为 0.39,呈现出以 0.005 a<sup>-1</sup> 的速率波动上升.从流域上中下游来

看,黄河流域下游 2000 ~ 2020 年生长季 NDVI 均值为 0.50,高于上游和中游.流域上中下游生长季 NDVI 均值均以不同速率波动上升(图 2),其中黄河流域中游 2000 ~ 2020 年生长季 NDVI 增长速率为 0.007 3 a<sup>-1</sup>,高于上游和下游.整体来看,2000 ~ 2020 年黄河流域生长季 NDVI 在波动中增长.



虚线为拟合出的线性趋势线

图 2 2000 ~ 2020 年黄河流域上中下游生长季 NDVI 年际变化

Fig. 2 Interannual variation in growing season NDVI for upstream, midstream and downstream in the Yellow River basin from 2000 to 2020

2.2 黄河流域植被演化空间分布特征

由黄河流域生长季 NDVI 均值空间分布可知(图 3),黄河流域 NDVI 存在明显的空间分异性,整体分布从西北到东南阶梯状变大,植被生长状况较好的区域主要位于流域内秦岭山系、吕梁山系、子午岭和中条山等地.与 2000 年相比,2020 年植被生长及覆盖存在明显的改善;进一步对 2000 ~ 2020 年黄河流域生长季 NDVI 进行逐像元 Theil-Sen 斜率估算(图 4)及 MK 趋势检验,通过 MK 趋势检验

的流域面积为 652000 km<sup>2</sup>,占流域面积的 81.5%,依据计算结果和流域实际情况,将斜率估算结果划分为 5 个等级(表 2).其中,明显退化的区域占 0.2%,轻微退化的区域占 0.7%,二者总和仅占 0.9%,主要分布于郑州、洛阳、西安、太原和银川等人类活动强度较大的城市及周边区域.基本不变的区域占 0.5%,主要分布于流域上游的河套平原和库布齐沙漠等区域.轻微改善的区域占 55.3%,主要分布于流域上游的宁夏北部、内蒙古南部和青

表 2 植被趋势变化分级及其所占比例

Table 2 Classification of vegetation trend change and its proportion

| Theil-Sen 斜率       | 影响程度 | 植被所占面积比例/% |      |      |
|--------------------|------|------------|------|------|
|                    |      | 整个流域       | 上游   | 中游   |
| < -0.006           | 明显退化 | 0.2        | 0.2  | 0.2  |
| -0.006 ~ -0.000 6  | 轻微退化 | 0.7        | 0.7  | 0.6  |
| -0.000 6 ~ 0.000 6 | 基本不变 | 0.5        | 1.0  | 0    |
| 0.000 6 ~ 0.006    | 轻微改善 | 55.3       | 79.1 | 32.1 |
| > 0.006            | 明显改善 | 43.3       | 19.1 | 67.1 |

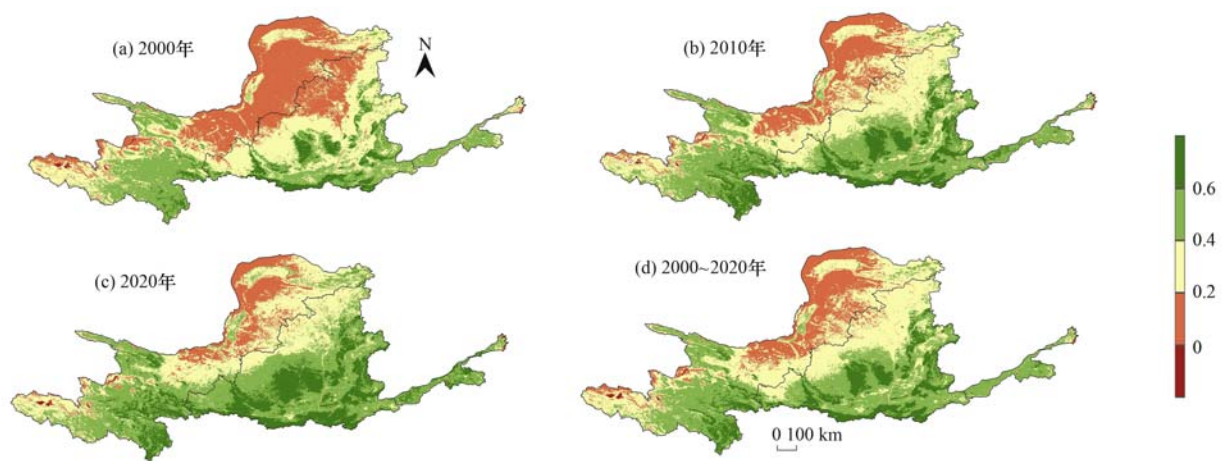


图3 2000 ~ 2020 年黄河流域生长季 NDVI 均值空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the growing season average NDVI in the Yellow River basin from 2000 to 2020

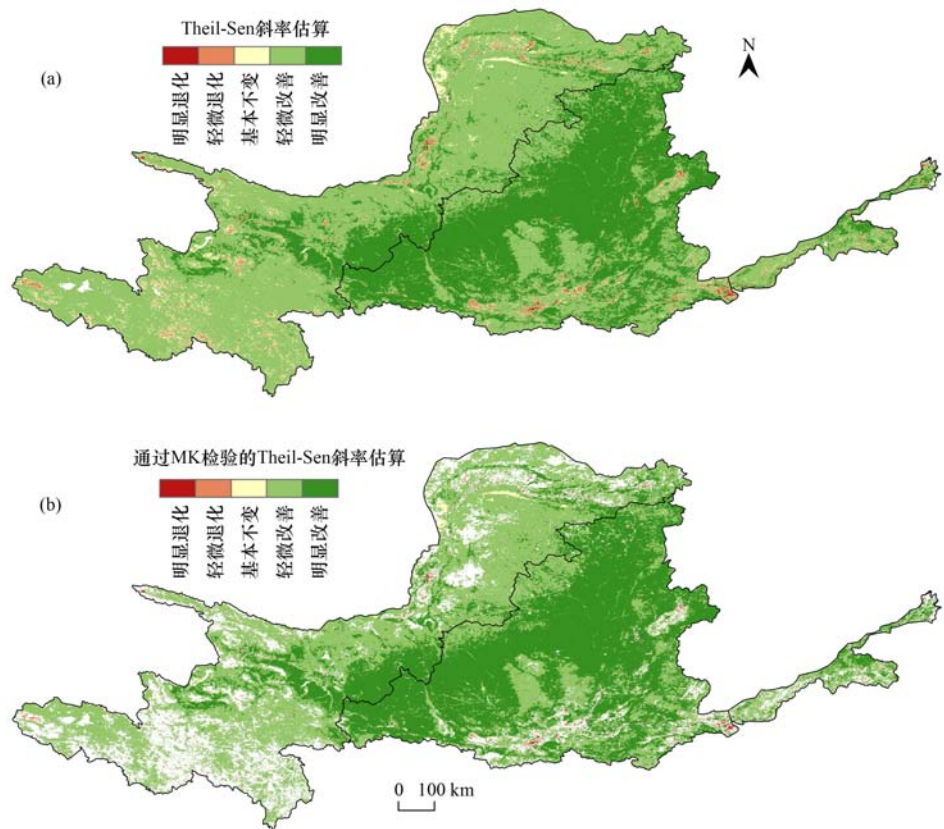


图4 2000 ~ 2020 年黄河流域生长季 NDVI 均值 Theil-Sen 斜率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the growing season average NDVI for the Theil-Sen slope in the Yellow River basin from 2000 to 2020

海东部等区域. 明显改善的区域占 43.3%, 主要分布于流域中游的秦岭山系、陕北高原和吕梁山系等区域.

2.3 黄河流域植被演化驱动机制分析

2.3.1 气候变化对黄河流域 NDVI 的影响

黄河流域 2000 ~ 2020 生长季降水量为 443.8 mm, 南部降水量较大, 西北部降水量较小, 降水量空间差异明显[图 5(a)]. 生长季平均气温为 14.0℃, 东部、中部气温较高, 西部高原地区气温较低, 气温空间差异明显[图 5(b)]; 逐像元计算 2000 ~ 2020

年黄河流域 NDVI 与降水、气温之间的偏相关系数并进行  $t$  检验. 计算结果得出, NDVI 与降水的偏相关系数均值为 0.57, 与气温的偏相关系数均值为 0.49, 气候因子对黄河流域植被演化的驱动呈现出明显的空间差异性. NDVI 与降水的偏相关系数通过  $t$  检验的面积占流域面积的 45.6%, 偏相关系数大于 0.6 的区域占 36.5%, 主要分布在流域上游的川藏高原、陇中黄土高原、宁夏中部, 流域中游的山西北部等区域[图 6(a)]. NDVI 与气温的偏相关系数通过  $t$  检验面积占流域面积的 10.5%, 偏相关



系数大于 0.6 的区域占 8.8%, 主要分布在流域内鄂尔多斯高原西北部等区域[图 6(b)]; 整体来看, 黄河流域生长季 NDVI 与降水、气温呈正相关关系, 降水对植被生长的影响要高于气温。

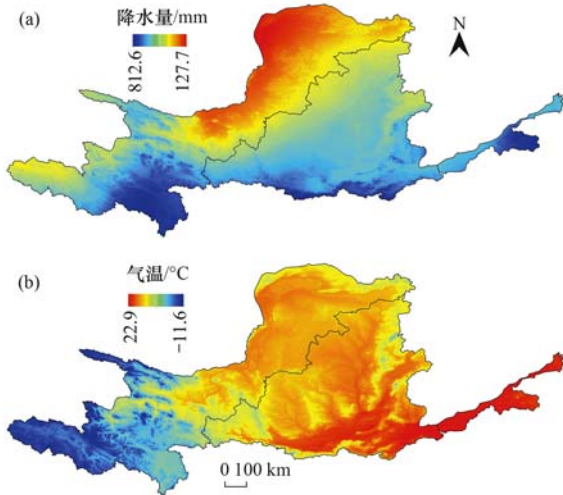


图 5 2000 ~ 2020 年生长季降水量及气温均值

Fig. 5 Average precipitation and temperature during the growing season from 2000 to 2020

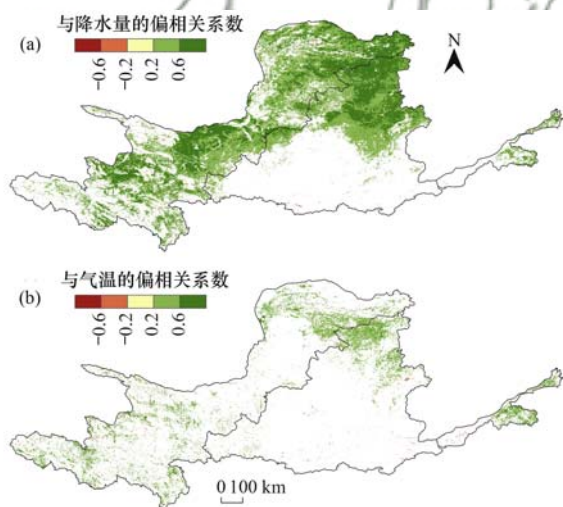


图 6 2000 ~ 2020 年生长季 NDVI 均值和降水、气温的偏相关系数

Fig. 6 Partial correlation coefficients between the growing season average NDVI and precipitation, temperature from 2000 to 2020

### 2.3.2 人类活动对黄河流域 NDVI 的影响

由于人类活动对植被生长的影响难以在栅格尺度量化, 本研究采用残差趋势分析法分离出人类活动对黄河流域 NDVI 的影响, 并将在人类活动影响下的植被变化趋势分为 5 类(图 7): 明显退化 ( $< -0.006$ )、轻微退化 ( $-0.006 \sim -0.0006$ )、基本不变 ( $-0.0006 \sim 0.0006$ )、轻微改善 ( $0.0006 \sim 0.006$ ) 和明显改善 ( $> 0.006$ )。人类活动对植被生长起改善作用的区域占整个流域面积的 83.6%, 其中明显改善的区域占 19.8%, 主要分布在流域中游的陕北高原、吕梁山系、宁夏南部和甘

肃东部等地, 对植被生长基本无影响的区域占整个流域的 13.9%, 主要分布在流域上游的川藏高原和库布齐沙漠等区域。人类活动导致植被退化的区域占流域面积的 2.6%, 主要分布在银川、包头、西安、洛阳、郑州、太原和西宁等人类活动强烈的城市区域。

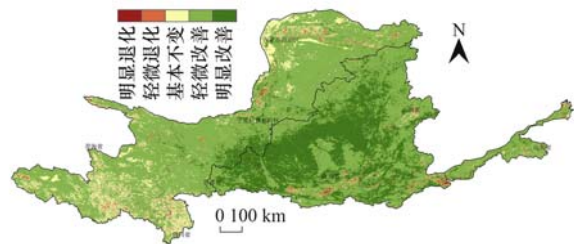


图 7 2000 ~ 2020 年人类活动对黄河流域生长季 NDVI 影响空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of the impacts of human activities on the growing season average NDVI in the Yellow River basin from 2000 to 2020

### 2.3.3 不同驱动因素对黄河流域植被变化的相对贡献

在人类活动和气候变化的驱动下, 黄河流域植被生长得到改善的面积占流域面积的 96.4%。其中人类活动贡献率大于 80% 的区域面积占 34.3%, 主要分布在流域中游陕西省和甘肃省东部[图 8(a)]。气候变化贡献率大于 80% 的区域面积占 4.2%, 主要分布在流域上游的川藏高原、陇中黄土高原和库布齐沙漠等区域[图 8(b)]; 在人类活动和气候变化的驱动下, 黄河流域植被退化的面积占流域面积的 3.4%, 其中人类活动贡献率大于 80% 的区域占 68.5%, 主要分布在银川、包头、西安、

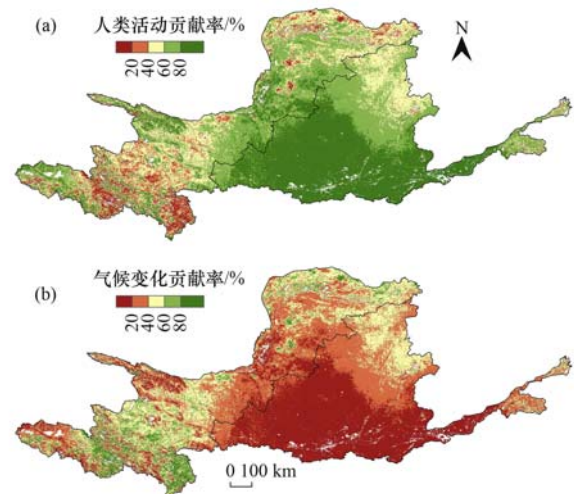


图 8 2000 ~ 2020 年人类活动和气候变化对黄河流域植被生长起改善作用贡献率空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the contributions of human activities and climatic change to improving vegetation growth in the Yellow River basin from 2000 to 2020



洛阳、郑州和太原等人类活动强烈的城市区域[图 9(a)]; 气候变化贡献率在大于 80% 的区域面积占 24.9%, 主要分布在流域上游的川藏高原东部地区等区域[图 9(b)]; 根据黄河流域实际生长季 NDVI 均值变化趋势以及分别受人类活动和气候变化影响的生长季 NDVI 均值变化趋势, 计算可得人类活动和气候变化对黄河流域生长季 NDVI 的贡献分别为 72% 和 28%.

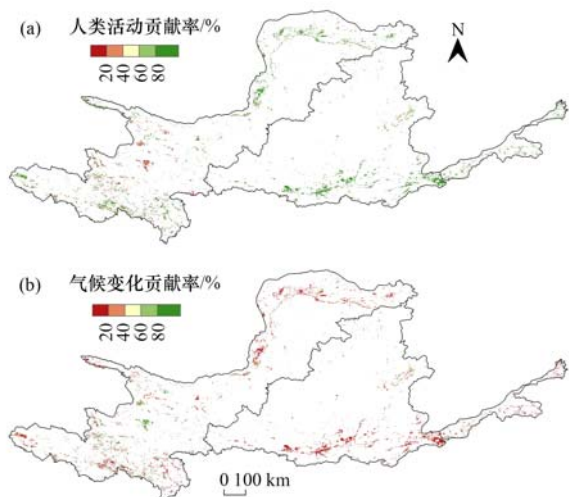


图 9 2000~2020 年人类活动和气候变化对黄河流域植被生长起抑制作用贡献率空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of the contributions of human activities and climatic change to inhibiting vegetation growth in the Yellow River basin from 2000 to 2020

### 3 讨论

#### 3.1 2000~2020 年黄河流域植被时空演化特征

黄河流域 2000~2020 年生长季 NDVI 均值为 0.39, 并以  $0.005 \text{ a}^{-1}$  的速率波动上升, 流域植被明显改善的区域主要分布在秦岭山系、子午岭和中条山等地, 该结果与贺振等<sup>[20]</sup>、陈强等<sup>[32]</sup>和张志强等<sup>[33]</sup>对黄河流域的研究基本一致, 但是本研究中 NDVI 增长速率略高于前人研究且陕北高原和吕梁山系等地植被增长速率也在明显加快. 其原因可能是 20 世纪末以来我国政府在黄土高原等地实施的退耕还林还草和封山育林等一系列生态工程已初见成效.

#### 3.2 不同驱动因子对植被时空演化的影响

气候变化和人类活动是促进植被生长的主要原因. 一方面, 良好的水热条件是植被生长的关键要素, 研究表明气候变暖加速了土壤有机质的分解、延长了植被的生长期, 从而促进植被的生长<sup>[34]</sup>. 本研究中秦岭山系、子午岭和中条山等区域植被的改善正是得益于这种稳定的水热条件. 另一方面, 进入 21 世纪以来, 我国政府实施的一系列生态修复工程

在局部甚至区域尺度增加了植被覆盖面积<sup>[35]</sup>. 本研究中陕北高原及吕梁山系植被增长的速率高于其它区域正是得益于这种政策性的生态工程; 气候变化及人类活动同样也能够抑制植被的生长. 一方面, 极端的气候如极冷会减小植物的生长周期, 其次某些干旱地区, 气候变暖会加速土壤水分的流失, 从而抑制植被的生长<sup>[36]</sup>. 本研究中流域上游库布齐沙漠处于低植被覆盖区并多年未改善正是由于这种极端的水热条件. 另一方面人类活动对植被生长产生的负面影响也显而易见, 主要体现在大规模的工业活动及城市化进程侵占了林地或草地<sup>[37]</sup>, 本研究中流域内几个发展较快的城市如郑州、西安、包头、太原、银川和西宁等地的植被生长均受到了不同程度地抑制正是由于这种高强度的人类活动.

#### 3.3 不同驱动因素对植被时空演化的相对贡献

本文进行了不同驱动因素对植被生长贡献率的研究. 于植被生长改善的区域而言, 人类活动贡献率大于 80% 的主要分布在黄河流域中部和南部等政府生态工程实施区域, 气候变化贡献率超过 80% 的区域主要分布在流域西部川藏高原等人类活动强度较小的区域; 于植被生长受到抑制的区域而言, 人类活动贡献率大于 80% 的区域主要分布在郑州、西安、包头、太原、银川和西宁等地, 可见高强度的工业活动是造成植被退化的主要原因. 以往研究鲜有涉及到黄河流域植被不同驱动因子的相对贡献, 本研究表明人类活动和气候变化对黄河流域生长季 NDVI 的贡献分别为 72% 和 28%, 生态工程的实施对植被的改善起到了积极的影响, 但是高强度的城市化进程抑制了植被的生长.

### 4 结论

(1) 黄河流域 2000~2020 年生长季 NDVI 均值为 0.39, 呈现出以  $0.005 \text{ a}^{-1}$  的速率波动上升的趋势, 中游 NDVI 增长速率要高于上游和下游. 植被明显改善的区域主要分布于流域内秦岭山系、陕北高原和吕梁山系等地, 植被退化的区域主要分布在郑州、洛阳、西安、太原和银川等地.

(2) 人类活动和气候变化对黄河流域生长季 NDVI 的贡献分别为 72% 和 28%. 其中气候变化贡献率大于 80% 的区域主要分布在流域内川藏高原等人类活动较弱的区域; 人类活动贡献率大于 80% 的区域主要分布在陕北高原、吕梁山系和流域内几个较大的城市区域, 人类活动对植被的生长有双重影响, 一方面生态工程的实施对植被的改善起到了积极的影响, 另一方面高强度的城市化进程抑制了植被的生长.

致谢:感谢国家科技基础条件平台:国家地球系统科学数据中心-地理资源分中心 (<http://gre.geodata.cn>) 提供数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] Pearson R G, Phillips S J, Lorant M M, *et al.* Shifts in arctic vegetation and associated feedbacks under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2013, **3**(7): 673-677.
- [2] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, *et al.* Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982-2013)[J]. *Global and Planetary Change*, 2017, **148**: 1-8.
- [3] Gillespie T W, Madson A, Cusack C F, *et al.* Changes in NDVI and human population in protected areas on the Tibetan Plateau[J]. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2019, **51**(1): 428-439.
- [4] Hao F H, Zhang X, Ouyang W, *et al.* Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2012, **17**(4): 389-398.
- [5] Xu Y F, Yang J, Chen Y N. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, **126**(1-2): 213-222.
- [6] Tarnavsky E, Garrigues S, Brown M E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(2): 535-549.
- [7] Bai Y Q, Yang Y P, Jiang H. Intercomparison of AVHRR GIMMS3g, Terra MODIS, and SPOT-VGT NDVI products over the Mongolian Plateau[J]. *Remote Sensing*, 2019, **11**(17), doi: 10.3390/rs11172030.
- [8] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **119**: 131-147.
- [9] Zewdie W, Csaplovics E, Inostroza L. Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability[J]. *Applied Geography*, 2017, **79**: 167-178.
- [10] Emamian A, Rashki A, Kaskaoutis D G, *et al.* Assessing vegetation restoration potential under different land uses and climatic classes in northeast Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **122**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107325.
- [11] De Keersmaecker W, Lhermitte S, Hill M J, *et al.* Assessment of regional vegetation response to climate anomalies: a case study for Australia using GIMMS NDVI time series between 1982 and 2006[J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(1), doi: 10.3390/rs9010034.
- [12] 王涛, 赵元真, 王慧, 等. 基于 GIMMS NDVI 的青藏高原植被指数时空变化及其气温降水响应[J]. *冰川冻土*, 2020, **42**(2): 641-652.
- Wang T, Zhao Y Z, Wang H, *et al.* Spatial and temporal changes of vegetation index and their response to temperature and precipitation in the Tibetan Plateau based on GIMMS NDVI[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, **42**(2): 641-652.
- [13] 彭凯峰, 蒋卫国, 侯鹏, 等. 三江源国家公园植被时空变化及其影响因子[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(10): 3388-3396.
- Peng K F, Jiang W G, Hou P, *et al.* Spatiotemporal variation of vegetation coverage and its affecting factors in the Three-river-source National Park[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(10): 3388-3396.
- [14] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于 Google Earth Engine 分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(11): 4804-4811.
- Guo Y Q, Wang N J, Chu X S, *et al.* Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(11): 4804-4811.
- [15] 王强, 张勃, 戴声佩, 等. 三北防护林工程区植被覆盖变化与影响因子分析[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(7): 1302-1308.
- Wang Q, Zhang B, Dai S P, *et al.* Analysis of the vegetation cover change and its relationship with factors in the Three-North Shelter Forest Program[J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1302-1308.
- [16] John R, Chen J Q, Kim Y, *et al.* Differentiating anthropogenic modification and precipitation-driven change on vegetation productivity on the Mongolian Plateau[J]. *Landscape Ecology*, 2016, **31**(3): 547-566.
- [17] 李辉, 红英, 邓国荣, 等. 1982—2015 年气候变化和人类活动对内蒙古草地净初级生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(2): 415-424.
- Li H, Hong Y, Deng G R, *et al.* Impacts of climate change and human activities on net primary productivity of grasslands in Inner Mongolia, China during 1982-2015 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(2): 415-424.
- [18] Qu S, Wang L C, Lin A W, *et al.* What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: climate change or anthropogenic factors? [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **90**: 438-450.
- [19] 董锦, 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.
- [20] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测[J]. *农业机械学报*, 2017, **48**(2): 179-185.
- He Z, He J P. Remote Sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River basin during 1982—2013 [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, **48**(2): 179-185.
- [21] 田智慧, 张丹丹, 赫晓慧, 等. 2000-2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子[J]. *水土保持研究*, 2019, **26**(2): 255-262.
- Tian Z H, Zhang D D, He X H, *et al.* Spatiotemporal variations in vegetation net primary productivity and their driving factors in Yellow River basin from 2000 to 2015[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2019, **26**(2): 255-262.
- [22] Li Y, Xie Z X, Qin Y C, *et al.* Responses of the Yellow River basin vegetation: climate change [J]. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 2019, **11**(4): 483-498.
- [23] Yu H C, Bian Z F, Mu S G, *et al.* Effects of climate change on land cover change and vegetation dynamics in Xinjiang, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(13), doi: 10.3390/ijerph17134865.
- [24] Liu Z Z, Wang H, Li N, *et al.* Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River basin from 2003 to 2018[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(6), doi: 10.3390/su12062198.



- [25] Hou J, Du L T, Liu K, *et al.* Characteristics of vegetation activity and its responses to climate change in desert/grassland biome transition zones in the last 30 years based on GIMMS3g [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, **136**(3-4): 915-928.
- [26] Yang R, Li X T, Mao D H, *et al.* Examining fractional vegetation cover dynamics in response to Climate from 1982 to 2015 in the Amur River basin for SDG 13 [J]. *Sustainability*, 2020, **12**(14), doi: 10.3390/su12145866.
- [27] Chu H S, Venevsky S, Wu C, *et al.* NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River basin from 1982 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2051-2062.
- [28] Wang J, Xie Y W, Wang X Y, *et al.* Driving factors of recent vegetation changes in Hexi Region, Northwest China based on a new classification framework [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(11), doi: 10.3390/rs12111758.
- [29] Cai H Y, Yang X H, Xu X L. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: the effects of ecological protection and restoration projects [J]. *Ecological Engineering*, 2015, **83**: 112-119.
- [30] Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, *et al.* Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **599-600**: 967-980.
- [31] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响 [J]. *地理学报*, 2020, **75**(5): 961-974.
- Jin K, Wang F, Han J Q, *et al.* Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982-2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(5): 961-974.
- [32] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析 [J]. *应用生态学报*, 2014, **25**(10): 2811-2818.
- Chen Q, Chen Y H, Wang M J, *et al.* Change of vegetation net primary productivity in Yellow River watersheds from 2001 to 2010 and its climatic driving factors analysis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, **25**(10): 2811-2818.
- [33] 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 [J]. *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 [J]. *Resources Science*, 2021, **43**(4): 849-858.
- [34] Ma Q M, Long Y P, Jia X P, *et al.* Vegetation response to climatic variation and human activities on the Ordos Plateau from 2000 to 2016 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(24), doi: 10.1007/s12665-019-8732-z.
- [35] 马锋, 卓静, 何慧娟, 等. 陕西省榆林市植被生态演变及其驱动机制 [J]. *水土保持通报*, 2020, **40**(5): 257-261, 267.
- Ma F, Zhuo J, He H J, *et al.* Ecological evolution and driving mechanism of vegetation in Yulin City, Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(5): 257-261, 267.
- [36] 何航, 张勃, 候启, 等. 1982—2015 年中国北方生长季 NDVI 变化及其对气温极值的响应 [J]. *干旱区研究*, 2020, **37**(1): 244-253.
- He H, Zhang B, Hou Q, *et al.* Spatiotemporal Change of NDVI and its response to extreme temperature indices in North China from 1982 to 2015 [J]. *Arid Zone Research*, 2020, **37**(1): 244-253.
- [37] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力 [J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7722-7736.
- Zhao W Q, Li J W, Chu L, *et al.* Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7722-7736.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| A Comparative Study of Soil Environmental Standards for Agricultural Land Among Different Countries and Its Implication for China .....                                                             | LI Xu-zhi, JIANG Rong, WANG Guo-qing, <i>et al.</i> ( 577 )            |
| Evaluation Parameters and System for Reclaimed Water Quality Stability .....                                                                                                                        | ZHANG Xin-yi, WEI Dong-bin, DU Yu-guo ( 586 )                          |
| Distribution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Atmospheric Deposition During Heating and Non-heating Period in Lanzhou .....                                                           | HUANG Wen, WANG Sheng-li ( 597 )                                       |
| PM <sub>2.5</sub> Source Apportionment Based on a Variety of New Receptor Models .....                                                                                                              | WANG Zhen-yu, LI Yong-bin, GUO Ling, <i>et al.</i> ( 608 )             |
| Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Pollution in PM <sub>2.5</sub> During Summer in Central China .....                                                                  | SU Ye-wang, LIU Wei-jie, MAO Yao, <i>et al.</i> ( 619 )                |
| Pollution Characteristics of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During the Lantern Festival of 2021 in Zibo City .....                                                                         | CHEN Qiao, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i> ( 629 )                    |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Perfluorinated Compounds in PM <sub>2.5</sub> in Zhejiang Province .....                                                                    | LI Bing-jie, CHEN Jin-yuan, LIU Zheng-zheng, <i>et al.</i> ( 639 )     |
| Impact of Meteorological Conditions on PM <sub>2.5</sub> in Jiangsu Province from 2001 to 2019 .....                                                                                                | PAN Chen, KANG Zhi-ming ( 649 )                                        |
| Comparison and Analysis of PM <sub>2.5</sub> Forecast in Key Areas Based on the Neural Network Model and Numerical Model .....                                                                      | GAO Yu-xiao, WANG Wei, HUANG Yong-hai, <i>et al.</i> ( 663 )           |
| Temporal and Spatial Variations in Ozone and Its Causes over Hainan Province from 2015 to 2020 .....                                                                                                | FU Chuan-bo, XU Wen-shuai, DAN Li, <i>et al.</i> ( 675 )               |
| Ozone Formation and Key VOCs of a Continuous Summertime O <sub>3</sub> Pollution Event in Ji'nan .....                                                                                              | SUN Xiao-yan, ZHAO Min, SHEN Heng-qing, <i>et al.</i> ( 686 )          |
| Pollution Characteristic and Control Factor Analysis of Atmospheric Ozone During Summer Typical Periods in Linyi, Shandong .....                                                                    | YANG Xue, AN Xin-yue, LIU Yu-qi, <i>et al.</i> ( 696 )                 |
| Improved Performance of PMF Source Apportionment for Volatile Organic Compounds Based on Classification of VOCs' Aging Degree in Air Mass .....                                                     | ZHU Yu-fan, CHEN Qiang, LIU Xiao, <i>et al.</i> ( 707 )                |
| Spatial Distribution Characteristics of VOCs and Its Impact on Ozone Formation Potential in Rizhao City in Summer .....                                                                             | YAO Wei-jie, WANG Da-wei, XIE Fu-ying, <i>et al.</i> ( 714 )           |
| Long-term Trends and Sources of Atmospheric Halocarbons at Mount Taishan, Northern China .....                                                                                                      | ZHAO Feng, CHEN Tian-shu, DONG Can, <i>et al.</i> ( 723 )              |
| Emission Characteristics of VOCs and <i>n</i> -alkanes from Diesel Forklifts .....                                                                                                                  | ZHOU Wen-qin, LI Cheng, LIU Jun-wen, <i>et al.</i> ( 735 )             |
| Driving Mechanism of the Spatiotemporal Evolution of Vegetation in the Yellow River Basin from 2000 to 2020 .....                                                                                   | TIAN Zhi-hui, REN Zu-guang, WEI Hai-tao ( 743 )                        |
| Effects of Land Use on Riverine Dissolved Inorganic Carbon (DIC) and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in a Karst River Basin, Southwestern China .....                                            | XU Sen, LI Si-liang, ZHONG Jun ( 752 )                                 |
| Effects of Biochar Addition on Soil Nitrogen Mineralization and Leaching Characteristics in Riparian Zone of Taihu Lake .....                                                                       | XIONG Yu-ting, YUAN Xu-yin, ZHOU Hui-hua, <i>et al.</i> ( 762 )        |
| Impacts of Riparian Buffer Zone Type on Reduction in Runoff Pollution in the North Canal River Under Different Rainfall Events .....                                                                | ZHU Li-ying, ZHAO Kai, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 770 )             |
| Pollution Characterization and Comprehensive Water Quality Assessment of Rain-source River: A Case Study of the Longgang River in Shenzhen .....                                                    | BI Ye-liang, WANG Hua-cai, XIA Bing, <i>et al.</i> ( 782 )             |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Runoff Pollution in Langfang City .....                                                                               | PAN Xin-rong, ZUO Jian-e, ZHANG Yu, <i>et al.</i> ( 795 )              |
| Analysis on Diversity of Plankton Microbial Community in the Beijing-Tianjin-Hebei Section of the North Canal River .....                                                                           | GUO Zhi-zhi, SU Zhen-hua, DI Yan-ming, <i>et al.</i> ( 803 )           |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Bacterial Community Structure from Landscape Water in Hebei Province: Taking Shijiazhuang as Example ..... | CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> ( 813 )     |
| Source and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Watershed of Lake Qinghai .....                                                                                         | YU Xiao-qin, MENG Xian-qiang, WU Hua-wu, <i>et al.</i> ( 826 )         |
| Influences of Hydrological Scenarios on the Bioavailability, Fate, and Balance of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Poyang .....                                                        | GUO Yan-ni, YAO Xiao-long, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> ( 837 )         |
| Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Sediments from Poyang Lake .....                                                                                                            | LUO Yan-qing, WAN Zhi-wei, YAN Cai-xia, <i>et al.</i> ( 847 )          |
| Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Tangxun Lake .....                                                                                       | LI Xing-yu, LI Peng, SU Ye-wang, SHI Ming-ming, <i>et al.</i> ( 859 )  |
| Identifying Relationship Between Nutrient Contents in Road-Deposited Sediment and Urban Basic Elements Based on Kernel Density Estimation .....                                                     | WANG Zi-qiao, LI Xu-yong ( 867 )                                       |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of DBPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan Under the COVID-19 Pandemic .....                                                                  | ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, TU Xiang, <i>et al.</i> ( 878 )           |
| Synergistic Control of Nitrogenous Disinfection By-products and Opportunistic Pathogens in Drinking Water by Iron-Modified Quartz Sand Filtration .....                                             | QI Peng, HU Chun, XING Xue-ci, <i>et al.</i> ( 887 )                   |
| Degradation Characteristics and Mechanism of Ibuprofen by Ozone Catalyzed by Nitrogen-Doped Biochar .....                                                                                           | CHAI Cheng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> ( 896 )                      |
| Adsorption Properties and Host-guest Effects of Porous Cyclodextrin Polymers for Dye Molecules in Water .....                                                                                       | ZHAO Chuan-liang, WANG Zi-jie, YAN Yi, <i>et al.</i> ( 907 )           |
| Characterization of Sludge Morphology and Bacterial Community Evolution in the Rapid Activation of Freeze-stored PV/A Granular Sludge .....                                                         | HUANG Zi-heng, ZHANG Li, CUI Shu-hui, <i>et al.</i> ( 920 )            |
| Effect of Different Cationic Polyacrylamide Organic Dehydrating Agents on Sludge Dewatering Performance .....                                                                                       | FENG Qi-yun, GAO Bao-yu, YUE Qin-yan, <i>et al.</i> ( 928 )            |
| Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in a Small Watershed of a Mining Area in Yunnan .....                                                                                                   | LIU Yang, HE Zhao-hui, NIU Xue-kui, <i>et al.</i> ( 936 )              |
| Spatial Characteristics and Potential Ecological Risk Factors of Heavy Metals in Cultivated Land in the Transition Zone of a Mountain Plain .....                                                   | ZHANG Ding, HUANG Rong, GAO Xue-song ( 946 )                           |
| Geo-accumulation Index Method to Optimize the Evaluation Method of Polymetallic Environment Quality: Taking Developed Agricultural Areas as an Example .....                                        | JU Tie-nan, LEI Mei ( 957 )                                            |
| Safety Production Threshold and Land Quality Classification of Vegetable Pb in High Geological Background Area of Southwest China .....                                                             | MU De-miao, SUN Yue-bing ( 965 )                                       |
| Pollution Properties and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around a Typical Manganese Mining Area .....                                                        | HUANG Zhong-ting, YI Sheng-wei, CHEN Bei-bei, <i>et al.</i> ( 975 )    |
| Characteristics of Plant Diversity and Heavy Metal Enrichment and Migration Under Different Ecological Restoration Modes in Abandoned Mining Areas .....                                            | ZHOU Peng-fei, ZHANG Shi-wen, LUO Ming, <i>et al.</i> ( 985 )          |
| Soil Properties, Heavy Metal Accumulation, and Ecological Risk in Vegetable Greenhouses of Different Planting Years .....                                                                           | REN Qiang, SUN Rui-ling, ZHENG Kai-xuan, <i>et al.</i> ( 995 )         |
| Effects of Greenhouse and Open-field Cultivation on Heavy Metal Uptake During Carrot Growth .....                                                                                                   | CAO Chun, REN Dan, LÜ Zhen-ying, <i>et al.</i> ( 1004 )                |
| Effects of Different Amendments on Cadmium Accumulation in Rice Safety in Cadmium-Contaminated Farmland Under Two Flooding Treatments .....                                                         | WANG Gang, YU Hai-ying, LI Ting-xuan, <i>et al.</i> ( 1015 )           |
| Effect of Composite Leaching on Cadmium Removal Efficiency in Plow Layer Soil of Agricultural Land and Its Functional Regulation .....                                                              | CAO Kun-kun, ZHANG Sha-sha, HU Xue-yu, <i>et al.</i> ( 1023 )          |
| Polyamine-producing Bacteria Regulated the Community Structure of Rhizosphere Bacteria and Reduced the Absorption of Cd in Wheat .....                                                              | LI Xiao-zhe, QIN Shan-mei, CHEN Zhao-jin, <i>et al.</i> ( 1031 )       |
| Responses of Soil <i>PhoC</i> and <i>PhoD</i> Gene Microbial Communities to the Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers .....                             | YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> ( 1040 )              |
| Changes in Soil Microbial Carbon-Degrading Enzymes and Their Relationships with Carbon Pool Components During the Restoration Process of <i>Robinia pseudoacacia</i> .....                          | LI Wen-jie, ZHANG Zhen-jiao, ZHAO Ya-ping, <i>et al.</i> ( 1050 )      |
| Soil Enzyme Stoichiometric Characteristics of <i>Pinus massoniana</i> Plantations at Different Stand Ages in Mid-subtropical Areas .....                                                            | JIAO Peng-yu, GUO Wen, CHEN Ze-long, <i>et al.</i> ( 1059 )            |
| Characteristics of Microbial Utilization for Crop Residue-Derived C in Paddy and Upland Soils .....                                                                                                 | DENG Shao-hong, ZHENG Xiao-dong, MAO Wan-qiong, <i>et al.</i> ( 1069 ) |
| Influence of Artificial Root Exudates and Actual Root Exudates on the Microbial Community in Pyrene-contaminated Soil .....                                                                         | HAN Bo-yuan, ZHANG Wen, HU Fang-yu, <i>et al.</i> ( 1077 )             |
| Pollution Characteristics and Driving Factors of Antibiotic Resistance Genes in Dexing Copper Mine .....                                                                                            | HAN Liu, LOU Qian, QIAO Min, <i>et al.</i> ( 1089 )                    |
| Spatial Prediction Method of Farmland Soil Organic Matter in Weiwei Dryland of Shaanxi Province .....                                                                                               | WEI Fang, LIU Jing, XIA Li-heng, <i>et al.</i> ( 1097 )                |
| Emission Characteristics, Transformation Mechanism, and Reduction Potential of Ammonia Emissions from a Crop Rotation System in Yangtze River Delta .....                                           | XU Chang, MIAO Wen-liang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i> ( 1108 )          |