

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期

Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析 刘春景, 吕建斌, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳(3375)

基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏(3386)

基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨 王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰(3396)

厦门港大气 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价 肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平(3404)

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征 张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁敏, 侯思宇(3416)

晋中盆地主要城市冬季 PM_{2.5} 传输特征分析 王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣(3423)

鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析 孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳锋(3439)

济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP 王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋(3451)

长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析 罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧(3463)

2019 年 7 月石家庄市 O₃ 生成敏感性控制策略解析 朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇(3473)

华北平原 AOD 时空演化与影响因素 郭霖, 孟飞, 马明亮(3483)

基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系 郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康(3494)

基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威(3508)

近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析 陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏(3523)

高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素 杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强(3532)

三峡水库不同支流库湾蓄水区溶解氧分层特性及差异性 纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽(3543)

典型喀斯特城市湖库溶解性有机质成分特征及来源解析 倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康(3552)

骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估 黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕(3562)

千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素 王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军(3575)

泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征 张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮(3587)

降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响 周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕(3597)

典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价 储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏(3608)

筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响 王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜(3623)

天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识 刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德(3635)

地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制 彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪(3645)

北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析 门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵(3656)

微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响 胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明(3664)

不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响 任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟(3672)

微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd²⁺ 吸附机制 马文艳, 裴刚刚, 高歌, 孙约兵(3682)

不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素 连神海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水(3692)

Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能 印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨祺, 何世颖, 薛利红(3699)

一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析 李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送(3708)

丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性 高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程丽阳, 彭永臻(3718)

2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测 徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿, 黄雯婷(3730)

近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估 陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明(3741)

土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响 何宇, 盛茂银, 王轲, 王霖娇(3752)

长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价 张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁(3763)

煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性 尚誉, 桑楠(3773)

燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价 李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚(3781)

广州市南沙区第四区剖面镉富集特征及生物有效性 王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏(3789)

黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准 徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀(3799)

土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测 张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南(3811)

添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响 鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利(3825)

不同稻作系统土壤的 CH₄ 产生潜力与产生途径 沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华(3835)

东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程 马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮(3844)

同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞(3854)

岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较 肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛(3865)

紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异化响应 王智慧, 蒋先军(3876)

有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响 肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全(3884)

《环境科学》征订启事(3403) 《环境科学》征稿简则(3462) 信息(3493, 3655, 3834)

2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测

徐勇, 郑志威, 郭振东, 窦世卿*, 黄雯婷

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 研究植被动态变化并探测驱动其变化的影响因素, 对区域生态环境质量监测和林业恢复工程效应评估具有重要现实意义. 利用 MODIS NDVI 数据、基于站点的气象数据、DEM 数据、人口密度数据和夜间灯光数据等, 结合 Theil-Sen Median 斜率估计、Mann-Kendall 显著性检验、稳定性分析和地理探测器, 在多时空尺度下分析 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 时空演变特征及稳定性, 并探测驱动植被 NDVI 空间分异的主要影响因素. 结果表明, 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 整体呈波动上升趋势. 除太湖水系外, 其余流域单元植被 NDVI 均呈上升趋势. 长江流域植被 NDVI 呈上升趋势的面积占 84.09%, 其中, 呈极显著上升和显著上升的区域占 53.67%, 主要分布在乌江、宜宾至宜昌、嘉陵江、汉江和洞庭湖水系. 除金沙江石鼓以上和太湖水系植被 NDVI 稳定性较差以外, 其他流域单元植被 NDVI 整体较为稳定. 海拔是影响各流域单元植被生长的重要因素, 而气候因子对金沙江石鼓以上植被 NDVI 的影响程度最高, 人文因子对乌江、湖口以下干流和太湖水系植被 NDVI 影响最大. 长江流域影响因素双因子交互作用均表现为双因子增强或非线性增强, 其中, 海拔与风速的 q 值最高, 为 0.68. 影响因素生态探测结果表明, 人文因子与除坡度以外的地形因子和除湿度指数以外的气候因子对长江流域植被 NDVI 空间分异的解释力存在显著性差异. 研究结果可为制定考虑区域气候、地形和人类活动的长江流域植被资源管理方案提供依据.

关键词: 长江流域; 归一化植被指数 (NDVI); 地理探测器; 时空演变; 影响因素; 交互作用

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)07-3730-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202112081

Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020

XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, DOU Shi-qing*, HUANG Wen-ting

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Studies on the dynamic variation in vegetation cover and detecting its influencing factors are highly valuable for monitoring regional ecological environment quality and evaluating forestry restoration project effects. In this study, on the basis of the MODIS normalized difference vegetation index (NDVI), in situ climate data, digital elevation model, population density, nighttime lights using Theil-Sen Median analysis, Mann-Kendall significance test, stability analysis, and geographical detector model, the spatiotemporal variation and stability of vegetation cover in the context of multi-spatiotemporal scales were analyzed, and the dominant influencing factors that affect the spatial differentiation of vegetation cover were further detected. The results showed that the vegetation cover showed a fluctuant increasing trend, and the changing trend exhibited obvious spatial heterogeneity with the increasing rate being higher in the middle and lower in the east and west portion of the Yangtze River basin from 2000 to 2020. At the sub-basin scale, except for that in the Taihu Lake basin, the vegetation cover in all sub-basin units exhibited an increasing trend during the study period. The areas with an increasing trend accounted for 84.09% of the study area, in which the areas with extremely significant increases and significant increases accounted for 53.67%, which were mainly distributed in the Wujiang River basin, Yibin-yichang, Jialing River basin, Han River basin, and Dongting Lake basin. The vegetation cover showed lower stability in the upper reaches of the Jinsha-shigu River basin and Taihu Lake basin and higher stability in other sub-basin units of the study area. Elevation was an important factor affecting the vegetation variation in all sub-basin areas. Climatic factors presented the highest impact on vegetation variation in the upper reaches of the Jinsha-shigu River basin, and human activities exhibited the greatest impact on vegetation variation in the Wujiang River basin, lower reaches of Hukou basin, and Taihu Lake basin. The interaction of the two influencing factors on vegetation variation showed mutual and non-linear enhancement, and the interaction between elevation and wind speed presented the highest value, with an explanatory power of 68%. The ecological exploration results showed that human activities combined with topographic factors and climate factors, except for slope and relative humidity, significantly differed in the explanatory power of vegetation variation in the Yangtze River basin. These results can provide a basis for formulating comprehensive vegetation resource management in the Yangtze River basin that takes into account regional climate, topography, and human activities.

Key words: Yangtze River basin; normalized difference vegetation index (NDVI); geographical detector model; spatiotemporal variation; influencing factor; interaction

植被是陆地表面生态系统重要的组成部分,是联结大气圈、水圈、生物圈和岩石圈的桥梁,其变化具有时间上的复杂性和空间上的多样性^[1-4]. 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 与植被叶绿素^[5]、叶面积指数^[6]、生物量^[7]和植被覆盖度^[8]等紧密相关,故 NDVI 常用于植被覆盖变化^[8]、水土保持和荒漠化进程^[9,10]、生态环境质量监测^[11]和气候变化^[3,12,13]等方面的研究. 长江

流域作为亚洲第一大流域,其植被覆盖状况及动态

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 广西自然科学基金项目 (2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD21220133); 国家自然科学基金项目 (42161028); 广西空间信息与测绘重点实验室项目 (191851016); 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202110596006)

作者简介: 徐勇 (1988 ~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为气候变化和植被覆盖反演, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: doushiqing@glut.edu.cn

变化对我国和周边国家乃至全球生态平衡有着十分重要的作用. 因此, 研究长江流域植被 NDVI 动态变化并探测驱动其变化的主要影响因素, 对区域生态环境保护 and 植被资源管理有着重要的现实意义.

近年来针对长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测方面的研究取得了长足的进展. 有研究指出 1982 ~ 2015 年长江流域植被 NDVI 整体呈上升趋势, 上升区域主要分布在长江流域中部, 而下降区域主要分布在长江流域东部^[14~16]. Qu 等^[14] 进一步指出 1994 年后长江流域植被 NDVI 上升趋势相比之前更加明显. Qu 等^[14] 和崔利芳等^[17] 的研究指出气温是影响长江流域植被生长的主要气候因子, 而降水对植被生长的影响较弱. Zhang 等^[15] 进一步指出长江流域植被生长对降水和气温变化均具有滞后效应, 且超过 50% 的区域植被生长受气候变化的影响强于人类活动. 崔浩楠等^[18] 的研究指出, 1982 ~ 2019 年长江经济带植被 NDVI 呈上升趋势, 上升趋势呈明显的阶段性特征, 且非气候因素对长江经济带植被 NDVI 变化的影响强于气候因素. 以上研究大部分是基于长江流域整体或流域部分地区, 考虑的因子多为气温和降水等气候因子和海拔等地形因子, 忽略了植被生长在不同流域单元存在的差异以及其他气候因子、人文因子和地形因子对植被生长的影响.

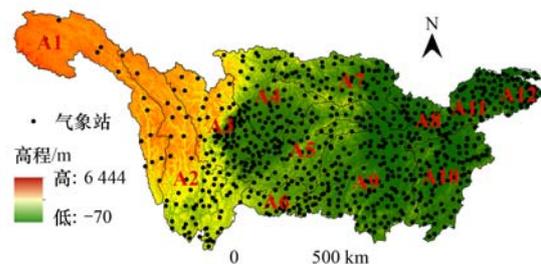
地理探测器^[19] 是一个空间分析模型, 可定量探测气候因子、人文因子和地形因子对植被 NDVI 空间分异的影响, 并且可以探测双因子交互作用对植被 NDVI 变化的影响, 因此, 被广泛应用于植被 NDVI 空间分异影响因素的探测. 基于地理探测器, Han 等^[20] 的研究指出气候因子是影响柴达木盆地植被退化最主要的因素, 环境因子和人文因子对柴达木盆地植被退化的影响依次减弱. Sun 等^[21] 的研究指出气候因子对祁连山草地空间分异的影响程度高于其他植被类型. 林地植被生长季起点和终点主要受气温和日照时数的影响, 草地和草甸植被生长季的起点主要受降水的影响, 而终点主要受最低气温的影响. Peng 等^[22] 和 Liu 等^[23] 的研究指出四川和青藏高原东北部植被生长主要受土壤类型、海拔和平均气温的影响. 周明星等^[24] 的研究指出邛崃山大熊猫栖息地植被 NDVI 变化除受土壤类型、海拔和平均气温影响以外, 还受降水的影响, 且自然因子对植被 NDVI 影响存在明显的协同效应. 潘洪义等^[25] 的研究指出岷江中下游地区植被 NPP 空间分异主要受气温、海拔和土地利用类型的影响, 且各因素对植被 NPP 空间分异的解释力存在差异. 以上研究表明, 地理探测器不仅可以有效探测区域植被

NDVI 空间分异的影响因素, 还可以揭示影响因素解释力的大小及影响因素间的协同作用.

综上, 已有研究大多侧重分析长江流域植被 NDVI 时空演变特征及其驱动因素, 但分析长江流域及其二级流域单元植被 NDVI 时空演变特征, 并利用地理探测器探测驱动植被 NDVI 空间分异的影响因素, 分析影响因素之间的交互作用的研究并不常见. 鉴于此, 本文以长江流域为研究区, 以长江流域整体和二级流域为研究单元, 研究长江流域植被 NDVI 时空演变特征, 并在多级尺度上探测人文因子(夜间灯光和人口密度)、地形因子(坡度、坡向、高程和曲率)和气候因子(最高气温、最低气温、地表温度、平均气温、寒冷指数、温暖指数、气压、风速、降水、相对湿度、日照时数和湿度指数)对长江流域植被 NDVI 空间分异的影响, 以期为长江流域植被恢复工程的实施和生态环境保护政策的制定等提供参考.

1 研究区概况

长江是我国第一长河, 发源于青藏高原的唐古拉山脉, 全长 6 397 km, 位于 90° 33' ~ 122° 25' E, 24° 30' ~ 35° 45' N 之间, 横跨 11 个省级行政区, 流域面积达 180 万 km², 其流域范围包含金沙江石鼓以上(A1)、金沙江石鼓以下(A2)、岷沱江(A3)、嘉陵江(A4)、宜宾至宜昌(A5)、乌江(A6)、汉江(A7)、宜昌至湖口(A8)、洞庭湖水系(A9)、鄱阳湖水系(A10)、湖口以下干流(A11)和太湖水系(A12), 共计 12 个流域单元(图 1). 长江流域高程在 -70 ~ 6 444 m 之间, 地势由西向东呈阶梯式下降, 横跨“第一级阶梯”、“第二级阶梯”和“第三级阶梯”, 地貌类型复杂, 区域内有高原、山地、丘陵、盆地和平原. 气候类型以亚热带季风气候为主, 植被类型主要以针叶林、阔叶林、栽培植被、灌丛、草甸和草丛为主. 长



A1 表示金沙江石鼓以上, A2 表示金沙江石鼓以下, A3 表示岷沱江, A4 表示嘉陵江, A5 表示宜宾至宜昌, A6 表示乌江, A7 表示汉江, A8 表示宜昌至湖口, A9 表示洞庭湖水系, A10 表示鄱阳湖水系, A11 表示湖口以下干流, A12 表示太湖水系

图 1 研究区气象站及高程空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of the meteorological station and elevation of the study area

江流域是中国具有全球影响力的内河经济带、东中西互动合作的协调发展带和生态文明建设的先行示范带。但经济发展的同时,受气候变化和人类活动的共同影响,长江流域部分地区生态环境脆弱,植被生长对气候变化和人类活动响应敏感。

2 材料与方法

2.1 数据来源

MODIS NDVI 数据主要来源于美国国家航空航天局发布的 MOD13A3 C6 数据 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率为每月,空间分辨率为 1 km,时间跨度为 2000 年 2 月~2020 年 12 月。MODIS NDVI 数据需要进行滤波、镶嵌、重采样、投影转换、格式转换、图像裁剪和最大值合成等预处理,得到覆盖研究区 2000~2020 年植被 NDVI 年最大值时间序列。

气象数据主要来源于国家气象科学数据中心提供的 2000~2020 年中国 2 416 个气象站点逐日数据 (<https://data.cma.cn/>),包括降水、平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速、平均气压和地表温度。研究区包含气象站点 716 个(图 1)。对于个别缺失数据,本研究利用 IBM SPSS 进行数据缺失插补。通过 ANUSPLIN 插值模型,在考虑经度、纬度和高程的基础上生成各气象因子时间序列。再根据气温和降水时间序列,计算得到寒冷指数、温暖指数和湿度指数^[26]。

人口密度数据和夜间灯光数据分别来源于 WorldPop 发布的 Population Density 数据 (<https://www.worldpop.org/>) 和 Harvard Dataverse 发布的全球 NPP-VIIRS-like 扩展时间系列的夜间灯光数据 (<https://dataverse.harvard.edu/>),时间分辨率均为每年,空间分辨率均为 1 km,时间跨度均为 2000~2020 年。DEM 数据来源于中国科学院资源环境数据云平台 (<https://www.resdc.cn/>),数据空间分辨率为 1 km。长江流域及其二级流域单元矢量数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 显著性检验

Theil-Sen Median 斜率估计是一种非参数估计方法,受异常值影响小,常用于揭示长时间序列植被 NDVI 变化特征,其分析结果能够科学且直观地反映植被 NDVI 在特定时间段内的变化趋势^[27,28]。计算公式为:

$$\text{Slope} = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为第 i 和第 j 年的最大合成植被 NDVI 值; median 为中值函数。若 Slope > 0 ,表示在 2000~2020 年内植被 NDVI 呈上升趋势;若 Slope < 0 ,表示在 2000~2020 年内植被 NDVI 呈下降趋势。Slope 的绝对值越大,表示植被 NDVI 变化趋势越明显。

Mann-Kendall 显著性检验法是一种应用在监测时间序列变化趋势的检验方法,可用来检验时间序列变化趋势的显著性^[13,29]。该方法不需要样本服从正态分布,因此常用于分析长时间序列气候、水文和植被的变化特征。本文采用 Mann-Kendall 显著性检验法来检验 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 的变化趋势。对于显著性水平 α ,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,表明时间序列在 α 水平上存在显著性变化,反之,则为不显著变化。本文定义变化趋势在 $\alpha = 0.05$ 下显著时,为显著变化;在 $\alpha = 0.01$ 下显著时,为极显著变化。为探究 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 变化趋势的显著性,本文根据植被 NDVI 变化趋势及 Mann-Kendall 显著性检验结果^[13],将植被 NDVI 变化趋势分为 6 类:极显著上升、显著上升、不显著上升、不显著下降、显著下降和极显著下降。

2.2.2 稳定性分析

变异系数为数据标准差和数据平均值的比值,可用来反映数据在时间序列上的稳定性和波动状况^[30]。本文在像元尺度上计算了 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 的变异系数,用于评估植被 NDVI 在时间序列上的稳定性。计算公式如下:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

式中,CV 为植被 NDVI 变异系数; σ 为植被 NDVI 标准差; \bar{x} 为植被 NDVI 平均值,CV 值越大,表示数据分布越离散,植被 NDVI 年际变化越大;反之,则表示数据分布紧凑,植被 NDVI 年际变化较为稳定。根据自然间断点法^[31]将植被 NDVI 的稳定性分成 5 类:低波动变化(0.006~0.049)、较低波动变化(0.049~0.100)、中度波动变化(0.100~0.185)、较高波动变化(0.185~0.392)和高波动变化(0.392~1)。

2.2.3 地理探测器

地理探测器是探测地理现象空间分异并揭示其驱动力的一组统计学方法^[19]。本文主要使用因子探测、交互作用探测和生态探测来探究长江流域植被 NDVI 空间分异的影响因素。因子探测主要用于研究属性 Y 的空间分异性及影响因素 X 对属性 Y 的

空间分异性的解释力度,以 q 值度量.

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (3)$$

式中, h 为变量 Y 或因子 X 的分层, N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数, N_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差, SSW 和 SST 分别为层内方差之和和全区总方差. q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大, 表示 X 对 Y 的解释力越大.

交互作用主要用于探究因子与因子之间是否存在相互影响及在相互作用下对属性 Y 的影响程度变化. 生态探测是比较因子与因子交互作用下对 Y 的空间分异的作用是否有显著性差异.

长江流域植被 NDVI 空间分异是多种因子共同作用的结果, 综合考虑人文因子、地形因子和气候因子, 本文选取 18 种影响因素 (表 1), 以格网为基本单元, 对长江流域植被 NDVI 进行影响因素影响力探测, 因子探测的 q 值越大, 表明该因子在对植被

表 1 影响因素类别

Table 1 Category of influencing factors

类别	影响因素				
人文因子	夜间灯光 (X_1)	人口密度 (X_2)			
地形因子	海拔 (X_3)	坡度 (X_4)	坡向 (X_5)	曲率 (X_6)	
气候因子	最高气温 (X_7)	最低气温 (X_8)	地表温度 (X_9)	平均气温 (X_{10})	
	寒冷指数 (X_{11})	温暖指数 (X_{12})	气压 (X_{13})	风速 (X_{14})	
	降水 (X_{15})	相对湿度 (X_{16})	日照时数 (X_{17})	湿度指数 (X_{18})	

NDVI 空间分布的解释力越强.

3 结果与分析

3.1 长江流域植被 NDVI 时空变化特征

3.1.1 长江流域植被 NDVI 时间变化特征

由图 2 可知, 整体上, 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 呈波动上升趋势, 上升斜率为 0.0021 a^{-1} . 流域尺度上, 除太湖水系外, 各流域单元植被 NDVI 均呈上升趋势, 其中乌江植被 NDVI 上升趋势最为显著, 为 0.0036 a^{-1} , 嘉陵江植被 NDVI 上升速率次之, 为 0.0034 a^{-1} , 湖口以下干流植被 NDVI 上升趋势最为缓慢, 仅为 0.0006 a^{-1} . 太湖水系植被 NDVI 呈下降趋势, 下降速率为 -0.0023 a^{-1} . 汉江

多年平均植被 NDVI 最高, 为 0.805, 其次为宜宾至宜昌, 为 0.790, 最低为金沙江石鼓以上, 为 0.497. 综上可知, 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 整体呈改善态势. 除太湖水系外, 各流域单元植被 NDVI 整体上均呈上升趋势, 其中, 汉江和宜宾至宜昌植被 NDVI 增长趋势最为显著. 汉江和宜宾至宜昌整体植被覆盖程度最好, 太湖水系和金沙江石鼓以上整体植被覆盖程度较低.

3.1.2 长江流域植被 NDVI 空间变化特征

如图 3 所示, 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 变化斜率在 $-0.0349 \sim 0.0397 \text{ a}^{-1}$ 之间. 由表 2 可知, 植被 NDVI 呈上升趋势的面积占 84.09%, 其中, 呈极显著上升和显著上升的面积占

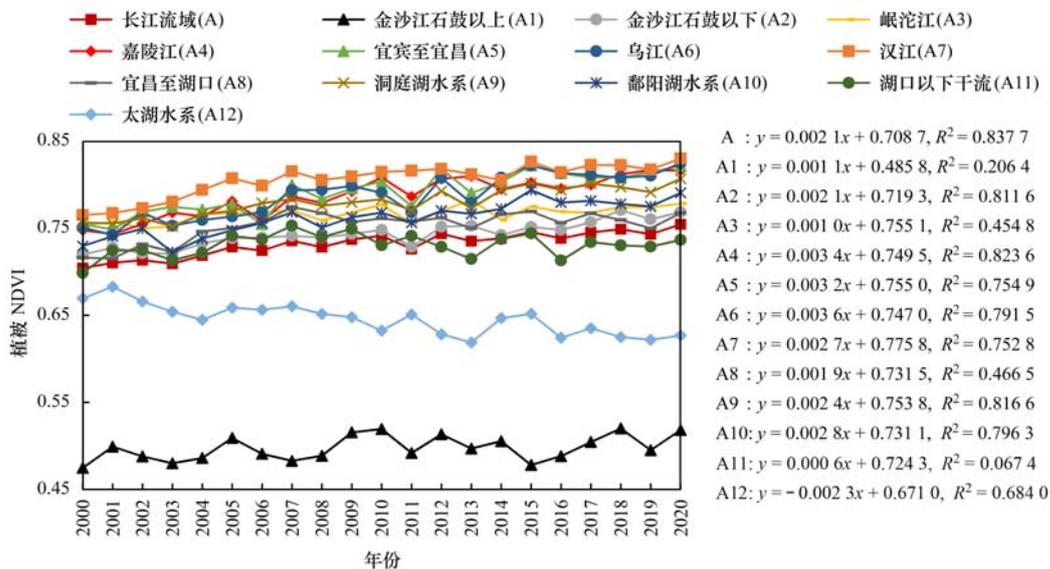


图 2 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 时间变化趋势

Fig. 2 Temporal variation in NDVI in the Yangtze River basin from 2000 to 2020

53.67%, 主要分布在嘉陵江、乌江、宜宾至宜昌、汉江和洞庭湖水系. 植被 NDVI 呈下降趋势的面积占 15.91%, 其中, 呈极显著下降和显著下降的面积占 3.50%, 主要分布在岷沱江西部的川渝地区、汉江、宜昌至湖口和洞庭湖水系交界处、湖口以下干流和太湖水系.

由表 2 可知, 除太湖水系外, 其他流域单元植被 NDVI 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积. 乌江、宜宾至宜昌、汉江、嘉陵江和鄱阳湖水系植被 NDVI 呈极显著上升的面积均超过其总面积的 50%. 而太湖水系植被 NDVI 呈下降趋势的面积占其总面积的 59.11%, 其中, 呈极显著下降和显著下降的区域占其总面积的 30.95%. 在研究时段内, 除太湖水系植被 NDVI 呈下降趋势的面积大于呈上升趋势的面积外, 其余流域单元植被 NDVI 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积, 其中, 位于长江流域中游的乌江、宜宾至宜昌、

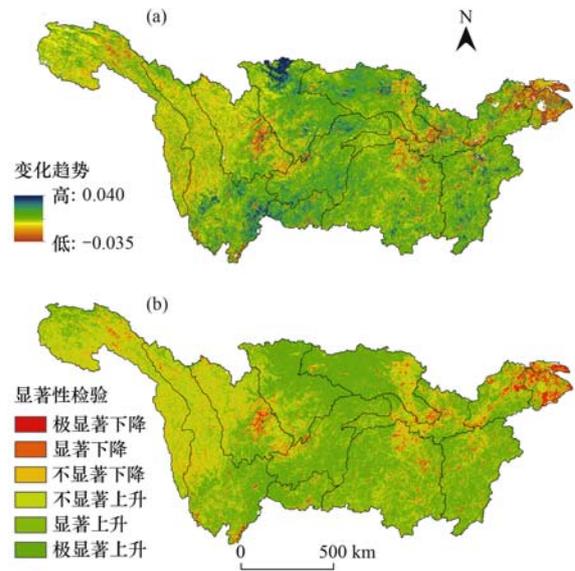


图 3 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 变化趋势及显著性检验
Fig. 3 Spatial variation in NDVI and its significance test in the Yangtze River basin from 2000 to 2020

表 2 长江流域植被 NDVI 显著性变化面积占比统计/%

Table 2 Statistical results of significance test of NDVI in the Yangtze River basin/%

流域单元	极显著下降	显著下降	不显著下降	不显著上升	显著上升	极显著上升
长江流域(A)	19.50	1.55	12.41	30.42	13.12	40.55
金沙江石鼓以上(A1)	0.58	1.19	21.98	53.87	11.46	10.93
金沙江石鼓以下(A2)	1.30	1.34	17.13	42.34	12.52	25.36
岷沱江(A3)	1.33	1.57	18.50	42.70	12.15	23.75
嘉陵江(A4)	1.39	1.19	8.37	21.93	11.90	55.22
宜宾至宜昌(A5)	0.96	0.91	7.03	21.44	15.03	54.63
乌江(A6)	0.87	0.77	4.37	15.90	14.13	63.96
汉江(A7)	1.24	1.15	8.24	18.77	10.61	59.99
宜昌至湖口(A8)	1.95	1.85	11.76	24.03	12.52	47.90
洞庭湖水系(A9)	1.20	1.22	8.07	24.27	16.66	48.57
鄱阳湖水系(A10)	1.49	1.36	8.38	22.04	14.57	52.16
湖口以下干流(A11)	10.86	5.79	19.18	25.69	10.38	28.09
太湖水系(A12)	20.80	10.15	27.15	24.03	6.38	11.49

汉江和嘉陵江的植被改善区域面积和强度均明显高于其他流域单元.

3.1.3 长江流域植被 NDVI 稳定性分析

如图 4 所示, 2000 ~ 2020 年长江流域植被 NDVI 整体稳定性较好, 平均变异系数为 0.058. 低波动变化和较低波动变化的区域占研究区总面积的 90.19%, 主要分布在金沙江石鼓以下、岷沱江、嘉陵江、乌江、宜宾至宜昌、洞庭湖水系、鄱阳湖水系、汉江和湖口以下干流; 中等波动变化、较高波动变化和高波动变化的区域占研究区总面积的 9.81%, 主要分布在金沙江石鼓以上和太湖水系.

流域尺度上, 金沙江石鼓以上和太湖水系植被 NDVI 稳定性较差, 变异系数分别为 0.092 和 0.097, 远高于其他流域单元, 其中, 金沙江石鼓以上

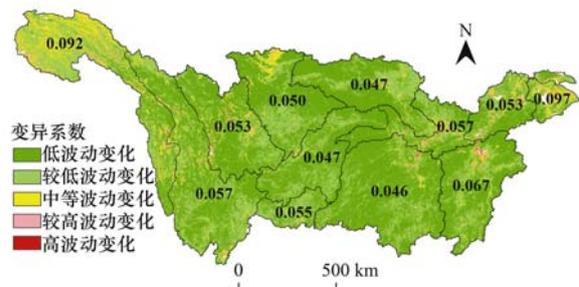


图 4 长江流域植被 NDVI 变异系数空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the coefficient of variation of NDVI in the Yangtze River basin

和太湖水系植被 NDVI 呈中等波动变化、较高波动变化和高波动变化的区域分别占其总面积的 33.83% 和 36.72%, 说明以上两个流域植被 NDVI

变化明显,波动性较大,植被覆盖稳定性较差.其余流域单元植被 NDVI 稳定性较好,平均变异系数在 0.046 ~ 0.067 之间,其中,金沙江石鼓以下、岷沱江、嘉陵江、宜宾至宜昌、乌江、汉江、宜昌至湖口和洞庭湖水系植被 NDVI 呈低波动变化和较低波动变化的区域分别占其总面积的 90% 以上.由上可知,2000 ~ 2020 年长江流域整体植被覆盖较为稳定,但位于长江流域上游的金沙江石鼓以上和长江流域下游的太湖水系植被覆盖变化较大,稳定性较差.

3.2 长江流域植被 NDVI 影响因素地理探测

3.2.1 影响因素影响力探测

由表 3 可知,海拔和气候因子(湿度指数除外)的 q 值均大于 0.40,说明以上因子是影响长江流域植被 NDVI 空间分异的主要因素.坡度、坡向、曲率、湿度指数、夜间灯光和人口密度的 q 值均在 0.1 以下,说明以上因子对植被 NDVI 空间分异的影响微弱.综上所述可知,海拔和气候因子对长江流域植被生长的影响程度较强,而坡度、坡向、曲率、湿度指数、夜间灯光和

人口密度对长江流域植被生长的影响程度较弱.

由地理探测器结果可知,人文因子、地形因子和气候因子对不同流域单元植被生长的影响表现出较大的差异.地形因子对各流域单元影响力呈现出明显的地域差异,除乌江($q = 0.02$)以外,海拔对各流域单元的 q 值均较高,而坡向对所有流域单元的 q 值均接近 0,说明海拔对各流域单元植被 NDVI 空间分异的影响较大,而坡向对植被 NDVI 空间分异的影响微弱.气候因子对金沙江石鼓以上植被 NDVI 空间分异的影响程度较高,而对其余流域单元影响程度较低.夜间灯光和人口密度对乌江、湖口以下干流和太湖水系植被 NDVI 影响较大,特别是太湖水系,夜间灯光和人口密度的 q 值分别为 0.62 和 0.45,远高于其他影响因素.综上所述可知,海拔是影响长江流域各流域单元植被生长的重要因素,而气候因子对金沙江石鼓以上植被 NDVI 的影响程度最高,人文因子对乌江、湖口以下干流和太湖水系植被 NDVI 影响最大.

表 3 长江流域及各流域单元影响因素探测 q 值

Table 3 The q values of influencing factors in the Yangtze River basin and its sub-basin

因素	A	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12
X_1	0.04	0.00	0.03	0.04	0.07	0.18	0.37	0.15	0.25	0.19	0.17	0.37	0.62
X_2	0.02	0.03	0.02	0.04	0.06	0.17	0.23	0.22	0.16	0.19	0.20	0.22	0.45
X_3	0.46	0.38	0.27	0.35	0.14	0.42	0.02	0.48	0.37	0.41	0.35	0.28	0.21
X_4	0.07	0.37	0.06	0.04	0.13	0.07	0.08	0.33	0.28	0.34	0.34	0.24	0.20
X_5	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
X_6	0.06	0.20	0.01	0.01	0.07	0.05	0.04	0.21	0.20	0.22	0.23	0.18	0.14
X_7	0.51	0.62	0.16	0.02	0.15	0.06	0.04	0.14	0.07	0.02	0.01	0.08	0.10
X_8	0.50	0.57	0.16	0.06	0.16	0.18	0.02	0.20	0.16	0.14	0.11	0.09	0.26
X_9	0.50	0.58	0.15	0.07	0.15	0.13	0.03	0.21	0.13	0.11	0.07	0.01	0.06
X_{10}	0.51	0.59	0.16	0.07	0.16	0.17	0.02	0.21	0.18	0.13	0.07	0.05	0.23
X_{11}	0.54	0.60	0.11	0.03	0.09	0.01	0.02	0.18	0.11	0.03	0.02	0.02	0.18
X_{12}	0.41	0.43	0.12	0.09	0.16	0.18	0.03	0.27	0.23	0.15	0.10	0.06	0.17
X_{13}	0.45	0.52	0.13	0.09	0.14	0.11	0.04	0.29	0.22	0.15	0.05	0.18	0.18
X_{14}	0.52	0.69	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.22	0.17	0.13	0.03	0.13	0.17
X_{15}	0.45	0.53	0.09	0.01	0.17	0.13	0.04	0.08	0.08	0.08	0.04	0.19	0.16
X_{16}	0.44	0.24	0.11	0.04	0.05	0.02	0.02	0.04	0.13	0.09	0.04	0.12	0.19
X_{17}	0.56	0.67	0.05	0.02	0.20	0.05	0.03	0.08	0.17	0.18	0.01	0.13	0.04
X_{18}	0.03	0.21	0.16	0.05	0.11	0.17	0.06	0.03	0.16	0.20	0.10	0.21	0.20

3.2.2 影响因素交互作用探测

如表 4 所示,由交互作用探测结果可知,长江流域影响因素双因子作用 q 值均大于单因子 q 值,各影响因素交互作用均表现为双因子增强或非线性增强,其中,海拔 \cap 风速的 q 值最高,为 0.68,由此可知,海拔和风速的交互作用是影响长江流域植被 NDVI 空间分异的主要因素.由表 5 可知,在流域尺度上,金沙江石鼓以上、金沙江石鼓以下、岷沱江和嘉陵江的海拔与气候因子交互作用的 q 值最大.除乌江夜间灯光 \cap 气压和夜间灯光 \cap 降水和湖口以下干流以海拔 \cap

夜间灯光和海拔 \cap 人口密度交互作用的 q 值最大以外,宜宾至宜昌、汉江、宜昌至湖口、洞庭湖水系、鄱阳湖水系和太湖水系均是夜间灯光 \cap 海拔交互作用的 q 值最大.由上可知,除乌江以外,各流域单元海拔与其余因子交互作用的 q 值最大,这也进一步说明了海拔对长江流域植被生长的影响力.

综上所述可知,长江各流域单元植被生长影响因素存在明显的地域差异,乌江和宜宾至宜昌植被 NDVI 空间分异主要受人文、地形和气候因子的共同作用,以其为过渡带,由长江流域上游至过渡带的流域单

表 4 长江流域影响因素交互作用探测

Table 4 Interaction detector of influencing factors in the Yangtze River basin

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}	
X_1	0.04																		
X_2	0.04	0.02																	
X_3	0.51	0.49	0.46																
X_4	0.10	0.09	0.55	0.07															
X_5	0.04	0.03	0.47	0.08	0.00														
X_6	0.08	0.07	0.52	0.09	0.06	0.06													
X_7	0.57	0.55	0.60	0.57	0.52	0.55	0.51												
X_8	0.56	0.54	0.58	0.57	0.51	0.55	0.53	0.50											
X_9	0.56	0.55	0.58	0.57	0.51	0.55	0.53	0.52	0.50										
X_{10}	0.57	0.55	0.59	0.57	0.52	0.56	0.53	0.52	0.52	0.51									
X_{11}	0.59	0.58	0.63	0.58	0.54	0.57	0.55	0.57	0.57	0.57	0.54								
X_{12}	0.46	0.45	0.52	0.51	0.42	0.48	0.54	0.52	0.52	0.53	0.57	0.41							
X_{13}	0.50	0.49	0.55	0.54	0.46	0.52	0.54	0.53	0.52	0.54	0.57	0.47	0.45						
X_{14}	0.57	0.55	0.68	0.54	0.52	0.53	0.62	0.63	0.63	0.63	0.62	0.63	0.63	0.52					
X_{15}	0.50	0.49	0.62	0.55	0.45	0.51	0.53	0.54	0.54	0.55	0.55	0.54	0.55	0.62	0.45				
X_{16}	0.49	0.48	0.57	0.58	0.45	0.53	0.59	0.59	0.59	0.59	0.60	0.56	0.57	0.63	0.55	0.44			
X_{17}	0.60	0.59	0.65	0.61	0.56	0.59	0.58	0.59	0.59	0.59	0.58	0.59	0.59	0.61	0.59	0.59	0.56		
X_{18}	0.06	0.05	0.60	0.14	0.03	0.11	0.59	0.60	0.60	0.60	0.57	0.59	0.60	0.56	0.50	0.51	0.61	0.03	

表 5 流域单元影响因素交互作用探测最大 q 值统计Table 5 Statistical results of the maximum q value of interaction detector of influencing factors in sub-basin of the Yangtze River basin

流域单元	交互因素	q 值
金沙江石鼓以上(A1)	$X_3 \cap X_{14}$	0.75
金沙江石鼓以下(A2)	$X_3 \cap X_{11} / X_3 \cap X_{17}$	0.35
岷沱江(A3)	$X_3 \cap X_{15}$	0.45
嘉陵江(A4)	$X_3 \cap X_{15}$	0.42
宜宾至宜昌(A5)	$X_1 \cap X_3$	0.52
乌江(A6)	$X_1 \cap X_{13} / X_1 \cap X_{15}$	0.42
汉江(A7)	$X_1 \cap X_3$	0.57
宜昌至湖口(A8)	$X_1 \cap X_3$	0.54
洞庭湖水系(A9)	$X_1 \cap X_3$	0.54
鄱阳湖水系(A10)	$X_1 \cap X_3$	0.55
湖口以下干流(A11)	$X_1 \cap X_3 / X_2 \cap X_3$	0.46
太湖水系(A12)	$X_1 \cap X_3$	0.70

元植被 NDVI 空间分异主要受地形和气候因子的共同作用,由过渡带至长江流域下游的流域单元植被 NDVI 空间分异主要受地形与人文因子的共同作用。

3.2.3 影响因素生态探测

长江流域生态探测结果如表 6 所示,58% 的因子组合对长江流域植被 NDVI 变化的解释力存在显著性差异,42% 的因子组合对长江流域植被 NDVI 变化的解释力不存在显著性差异。其中,人文因子(夜间灯光和人口密度)与除坡度以外的地形因子和除湿度指数以外的气候因子对长江流域植被 NDVI 空间分异的解释力存在显著性差异。海拔与除坡向、坡度和曲率以及温暖指数、气压、降水、相对湿度和湿度指数以外的影响因子对长江流域植被 NDVI 空间分异的解释力存在显著性差异。坡度、坡

向和曲率与除湿度指数以外的气候因子对长江流域植被 NDVI 空间分析的解释力均存在显著性差异。由此可知,人文因子和地形因子是影响长江流域植被 NDVI 空间分异的主要因子,这与影响因素探测和双因子交互探测的结果高度吻合。

基于流域单元生态探测结果表明,因子与因子间生态探测的显著性呈现明显空间异质性。金沙江石鼓以上、嘉陵江、乌江和太湖水系海拔与其他因子对其植被 NDVI 空间分异的解释力存在明显差异,而其余流域单元海拔与其余因子对其植被 NDVI 空间分异的解释力均不呈显著性差异。宜宾至宜昌、乌江、洞庭湖水系、鄱阳湖水系和太湖水系夜间灯光和人口密度与气候因子间均对植被 NDVI 空间分布的解释力不存在显著性差异,而大部分流域夜间灯光与人口密度与坡度和坡向对其植被 NDVI 空间分布的解释力存在显著性差异。以上结果与影响因素探测和双因子交互探测得到的海拔、夜间灯光和人口密度等因子与长江流域各流域单元植被 NDVI 具有较强相关性的结果一致。

4 讨论

4.1 长江流域植被 NDVI 时空演变特征

从时间尺度上看,2000~2020 年长江流域植被 NDVI 整体呈上升趋势。流域尺度上,除太湖水系外,其余流域单元植被 NDVI 均呈上升趋势,且乌江和嘉陵江植被 NDVI 上升速率高于其他流域单元,这与已有的研究结果一致^[14,16,18,32~34]。从空间尺度上看,植被 NDVI 呈上升趋势的区域主要分布在乌江、宜宾至宜昌、汉江、嘉陵江、洞庭湖水系和鄱阳湖

表 6 长江流域影响因素生态探测显著性统计¹⁾

Table 6 Statistical results of the ecological detector of influencing factors in the Yangtze River basin

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}	X_{17}	X_{18}
X_1																		
X_2	N																	
X_3	Y	Y																
X_4	Y	Y	N															
X_5	N	N	N	N														
X_6	Y	Y	N	N	Y													
X_7	Y	Y	Y	Y	Y	Y												
X_8	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N											
X_9	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N										
X_{10}	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y									
X_{11}	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y								
X_{12}	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N							
X_{13}	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	Y						
X_{14}	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	N	N	Y	Y					
X_{15}	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N				
X_{16}	Y	Y	N	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	Y	N	N	N			
X_{17}	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
X_{18}	N	N	N	N	Y	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

1) 置信水平为 95%

水系. 以上流域植被类型以阔叶林、灌丛和栽培植被为主, 植被群落较为稳定, 抵御风险的能力较强, 植被覆盖程度较高, 植被稳定性较好. 自 2000 年以来, 得益于长江流域防护林工程、岩溶地区石漠化综合治理工程、天然林保护工程和退耕还林还草工程等林业生态工程的相继实施, 以及洞庭湖湿地生态环境保护政策和鄱阳湖流域山江湖生态治理措施的实行和三峡水电站的开发和水库群的建设, 使得以上流域生态环境质量得到改善, 促进了植被群落的繁衍和演替进程, 从而提高了植被覆盖程度, 这与已有的研究结果一致^[14,16,35-37].

植被 NDVI 呈下降趋势的区域主要分布在岷沱江西部的川渝地区, 汉江、宜昌至湖口和洞庭湖水系三大流域交界处, 湖口以下干流和太湖水系. 以上地区主要位于成渝经济圈、武汉城市圈、长株潭城市群和长江三角洲经济圈, 随着经济水平的不断提高和城市化进程的日益加快, 导致以上地区建筑用地急剧扩展, 持续占用林地、草地和农用地, 使得区域植被覆盖程度下降, 植被 NDVI 呈下降趋势. 除此以外, 流域单元内高强度的人类活动和农业活动导致部分地区土壤质地变差、土壤肥力流失、土壤侵蚀和水土流失加剧, 从而导致植被 NDVI 下降, 植被稳定性较差, 这与已有的研究结果较一致^[13,16,36,38,39]. 金沙江石鼓以上植被稳定性较差, 主要由于该流域为国家最大的水电基地, 加之部分地区受流域地质状况、地貌类型、气候条件和人类活动的共同影响, 水土流失严重, 生态环境敏感且脆弱, 因此, 流域内部分地区植被 NDVI 呈

下降趋势, 植被稳定性较差, 这与已有的研究结果一致^[40,41].

4.2 长江流域植被 NDVI 影响因素分析

海拔、温度、日照时数和风速是影响长江流域整体植被生长的关键因素. 海拔变化是引起植被 NDVI 空间分异的主要原因, 长江流域海拔高度由西向东逐级递减, 逐渐由“第一级阶梯”过渡到“第三级阶梯”. 植被生长主要受区域水分、热量和光照等条件的影响, 而风速、温度和日照时数等气候因子与海拔高度息息相关. 且已有研究表明, 北半球增温能够引起植被生长季的起点的提前以及生长季的延长, 从而促进植被生长^[42], 故海拔、温度、日照时数和风速对长江流域整体植被 NDVI 空间分异影响较大. 从流域单元上看, 影响长江流域植被 NDVI 变化的影响因素存在明显地域差异. 长江流域中上游的金沙江石鼓以下、岷沱江、宜宾至宜昌、汉江、宜昌至湖口、洞庭湖水系和鄱阳湖水系植被生长主要受海拔影响, 而乌江、湖口以下干流和太湖水系植被生长主要受人类活动(夜间灯光)的影响, 这与已有的研究结果一致^[18,30,43-45]. 乌江为长江流域和珠江流域防护林工程等林业生态工程的覆盖区, 但位于乌江的贵阳及其周边城市经济发展迅速, 城区面积急剧扩张, 使得部分地区植被 NDVI 呈下降趋势. 湖口以下干流和太湖水系地处长江三角洲核心地带, 随着经济水平和城市化水平的不断提高, 城市建设面积的不断扩张, 持续占用植被资源, 地表植被覆盖锐减, 部分植被 NDVI 呈下降趋势. 夜间灯光可用于表征区域经济发展状况和人口空间分布, 由此可知, 人类

活动对以上 3 个流域单元植被 NDVI 变化影响显著,这与已有的研究结果较一致^[18,32,34]。

交互作用探测结果表明,长江流域各流域单元植被生长影响因素存在明显的地域差异,以乌江和宜宾至宜昌为过渡带,以上两个流域植被 NDVI 空间分异主要受人文、地形和气候条件的共同作用,由长江流域上游至过渡带的流域单元的植被 NDVI 空间分异主要受地形和气候条件的共同作用,由过渡带至长江流域下游的流域单元的植被 NDVI 空间分异主要受地形与人文因素的共同作用。受长江流域防护林等林业生态工程的影响,长江流域整体植被覆盖较高^[46],但长江流域上游流域海拔较高,人口稀疏,这使得地形因素和气候因素对长江流域上游植被生长影响较大^[16]。而中游各流域单元地处“第二级阶梯”到“第三级阶梯”的过渡带,地形起伏较大,气候条件多变,人类活动强度逐渐加强,因此,植被生长受人文、地形和气候条件的共同作用。而下游各流域单元植被类型主要为栽培植被,且温暖湿润的气候条件以及纵横交错的水系和星罗漫布的湖泊和水库降低了植被生长对气候变化的敏感性,加之以上各流域地势平坦,经济发达,人类活动频繁^[43~45,47],因此,长江流域下游各流域单元植被分异主要受地形和人文因子的共同影响。

5 结论

(1) 2000~2020 年长江流域植被 NDVI 呈波动上升趋势,上升斜率为 0.0021 a^{-1} 。流域尺度上,除太湖水系植被 NDVI 呈下降趋势外,其余流域单元植被 NDVI 均呈上升趋势,其中乌江和嘉陵江植被 NDVI 上升趋势最为显著。长江流域植被 NDVI 变化斜率呈现出明显的空间异质性,整体呈“中部高,两翼低”的空间分布格局。

(2) 2000~2020 年长江流域整体植被覆盖较为稳定。位于长江流域上游的金沙江石鼓以上和长江流域下游的太湖水系植被覆盖变化较大,稳定性较差,而金沙江石鼓以下、岷沱江、嘉陵江、宜宾至宜昌、乌江、汉江、宜昌至湖口和洞庭湖水系植被覆盖较为稳定。

(3) 影响因素影响力探测结果表明,日照时数、寒冷指数、风速、温度和海拔是影响长江流域植被生长的主导因素。影响因素交互作用探测结果表明,长江流域双因子作用 q 值均大于单因子 q 值,各影响因素交互作用结果表现为双因子增强或非线性增强,其中,海拔 \cap 风速的 q 值最高,为 0.68。生态探测结果表明,58% 的因子组合对长江流域植被 NDVI 变化的解释力存在显著性差异,42% 的因子组合对

长江流域植被 NDVI 变化的解释力不存在显著性差异。

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] Cheng J, Wu H B, Liu Z Y, *et al.* Vegetation feedback causes delayed ecosystem response to East Asian Summer Monsoon Rainfall during the Holocene [J]. *Nature Communications*, 2021, **12**(1), doi: 10.1038/s41467-021-22087-2.
- [3] Slater S M, Twitchett R J, Danise S, *et al.* Substantial vegetation response to Early Jurassic global warming with impacts on oceanic anoxia [J]. *Nature Geoscience*, 2019, **12**(6): 462-467.
- [4] Xu C G, McDowell N G, Fisher R A, *et al.* Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change [J]. *Nature Climate Change*, 2019, **9**(12): 948-953.
- [5] 帅爽, 张志, 吕新彪, 等. 矿山恢复治理区植被物候与健康状况遥感监测 [J]. *农业工程学报*, 2021, **37**(4): 224-234. Shuai S, Zhang Z, Lyu X B, *et al.* Remote sensing monitoring of vegetation phenological characteristics and vegetation health status in mine restoration areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37**(4): 224-234.
- [6] Forzieri G, Miralles D G, Ciais P, *et al.* Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes [J]. *Nature Climate Change*, 2020, **10**(4): 356-362.
- [7] Aalto J, Niittynen P, Riihimäki H, *et al.* Cryogenic land surface processes shape vegetation biomass patterns in northern European tundra [J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**(1), doi: 10.1038/s43247-021-00292-7.
- [8] 何宝忠, 丁建丽, 张喆, 等. 新疆植被覆盖度趋势演变实验性分析 [J]. *地理学报*, 2016, **71**(11): 1948-1966. He B Z, Ding J L, Zhang Z, *et al.* Experimental analysis of spatial and temporal dynamics of fractional vegetation cover in Xinjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(11): 1948-1966.
- [9] Macedo P M S, Oliveira P T S, Antunes M A H, *et al.* New approach for obtaining the C-factor of RUSLE considering the seasonal effect of rainfalls on vegetation cover [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2021, **9**(2): 207-216.
- [10] Zhumanova M, Mönnig C, Hergarten C, *et al.* Assessment of vegetation degradation in mountainous pastures of the Western Tien-Shan, Kyrgyzstan, using eMODIS NDVI [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **95**: 527-543.
- [11] Yan Y B, Chai Z Y, Yang X S, *et al.* The temporal and spatial changes of the ecological environment quality of the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountain and the influencing factors [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **133**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108380.
- [12] Zhe M, Zhang X Q. Time-lag effects of NDVI responses to climate change in the Yamzhog Yumco Basin, South Tibet [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **124**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107431.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Zhang W, Wang L C, Xiang F F, *et al.* Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **110**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105892.
- [16] Chen S S, Wen Z F, Zhang S L, *et al.* Effects of long-term and large-scale ecology projects on forest dynamics in Yangtze River Basin, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **496**, doi: 10.1016/J.FORECO.2021.119463.
- [17] 崔利芳, 王伦澈, 屈赛, 等. 气温、降水量和人类活动对长江流域植被 NDVI 的影响[J]. *地球科学*, 2020, **45**(6): 1905-1917.
Cui L F, Wang L C, Qu S, *et al.* Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze river basin, China[J]. *Earth Science*, 2020, **45**(6): 1905-1917.
- [18] 崔浩楠, 罗海江, 张学珍. 1982—2019 年长江经济带植被覆盖变化的时空特征[J]. *生态学杂志*, 2021, **40**(8): 2517-2529.
Cui H N, Luo H J, Zhang X Z. Temporal and spatial characteristics of green vegetation cover changes in the Yangtze River Economic Belt from 1982 to 2019[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, **40**(8): 2517-2529.
- [19] 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.
- [20] Han J J, Wang J P, Chen L, *et al.* Driving factors of desertification in Qaidam Basin, China: an 18-year analysis using the geographic detector model[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **124**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107404.
- [21] Sun Y F, Guan Q Y, Wang Q Z, *et al.* Quantitative assessment of the impact of climatic factors on phenological changes in the Qilian Mountains, China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, **499**, doi: 10.1016/j.foreco.2021.119594.
- [22] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **233**: 353-367.
- [23] Liu C L, Li W L, Wang W Y, *et al.* Quantitative spatial analysis of vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Tibetan Plateau using the Google Earth Engine [J]. *CATENA*, 2021, **206**, doi: 10.1016/J.CATENA.2021.105500.
- [24] 周明星, 李登秋, 邹建军. 基于稠密 Landsat 数据的邛崃山大熊猫栖息地植被变化研究[J]. *植物生态学报*, 2021, **45**(4): 355-369.
Zhou M X, Li D Q, Zou J J. Vegetation change of giant panda habitats in Qionglai Mountains through dense Landsat Data[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, **45**(4): 355-369.
- [25] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7621-7631.
Pan H Y, Huang P, Xu J. The spatial and temporal pattern evolution of vegetation NPP and its driving forces in middle-lower areas of the Min river based on geographical detector analyses [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7621-7631.
- [26] 谢春平, 吴显坤, 薛晓明, 等. 浙江楠适生区与气候环境关系的分析[J]. *四川农业大学学报*, 2020, **38**(3): 264-271.
Xie C P, Wu X K, Xue X M. *et al.* Analysis on relationship between suitable habitat of *Phoebe chekiangensis* and climatic environmental factors [J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2020, **38**(3): 264-271.
- [27] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, **63**(324): 1379-1389.
- [28] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta Region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [29] 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 等. 1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
Yang Y L, Yang K, Luo Y, *et al.* Effect of vegetation coverage on the temporal and spatial distribution of PM_{2.5} concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5100-5108.
- [30] 李华林, 张建军, 张耀方, 等. 基于不同赋权方法的北运河上游潜在非点源污染风险时空变化特征分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2796-2809.
Li H L, Zhang J J, Zhang Y F, *et al.* Analysis of spatial-temporal variation characteristics of potential non-point source pollution risks in the Upper Beiyun River basin using different weighting methods[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2796-2809.
- [31] 刘彦随, 李进涛. 中国县域农村贫困化分异机制的地理探测与优化决策[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1): 161-173.
Liu Y S, Li J T. Geographic detection and optimizing decision of the differentiation mechanism of rural poverty in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 161-173.
- [32] 石悦越, 银正彤, 郑文锋. 基于 MODIS 数据乌江流域植被覆盖变化与气候变化关系研究[J]. *林业资源管理*, 2017, (1): 127-134.
Shi Y Y, Yin Z T, Zheng W F. Study on the response of vegetation cover change and climate change in Wujiang River basin based on MODIS data[J]. *Forest Resources Management*, 2017, (1): 127-134.
- [33] 张婷, 薛东剑, 段金亮, 等. 2000~2019 嘉陵江流域植被覆盖时空变化特征及气候响应分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, **30**(5): 1110-1120.
Zhang T, Xue D J, Duan J L, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics and climate response analysis of vegetation coverage in Jialing River basin from 2000 to 2019[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, **30**(5): 1110-1120.
- [34] Jiang L G, Liu Y, Wu S, *et al.* Analyzing ecological environment change and associated driving factors in China based on NDVI time series data[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **129**, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2021.107933.
- [35] 刘翔位, 周启刚, 周浪, 等. 基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(5): 278-286.
Liu X W, Zhou Q G, Zhou L, *et al.* RSEI—Based dynamic monitoring of ecological quality of the soil and water conservation functional area in the Chongqing section of the three gorges reservoir area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(5): 278-286.

- [36] 张亮, 丁明军, 张华敏, 等. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J]. 自然资源学报, 2018, **33**(12): 2084-2097.
Zhang L, Ding M J, Zhang H M, *et al.* Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River basin during 1982-2015[J]. Journal of Natural Resources, 2018, **33**(12): 2084-2097.
- [37] Zhang P P, Cai Y P, Yang W, *et al.* Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation dynamics indicated by NDVI in a large dam-reservoir-river system [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120477.
- [38] Wang J Y, Delang C O, Hou G L, *et al.* Net primary production increases in the Yangtze River Basin within the latest two decades [J]. Global Ecology and Conservation, 2021, **26**, doi: 10.1016/J.GECCO.2021.E01497.
- [39] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应[J]. 生态学杂志, 2020, **39**(7): 2316-2326.
Feng L, Yang D, Huang Y Y. Vegetation NDVI characteristics and response to extreme climate in Sichuan and Chongqing from 2000 to 2017[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, **39**(7): 2316-2326.
- [40] 姜丽光, 姚治君, 王蕊, 等. 金沙江梯级水电开发区 NDVI 时空变化及其驱动因子研究[J]. 资源科学, 2014, **36**(11): 2431-2441.
Jiang L G, Yao Z J, Wang R, *et al.* Spatio-temporal variation of NDVI change and driving forces in the cascade hydropower development zone of the Jinsha River[J]. Resources Science, 2014, **36**(11): 2431-2441.
- [41] 周长艳, 王顺久, 彭骏. 金沙江流域及邻近地区空中水资源的气候特征分析[J]. 资源科学, 2010, **32**(12): 2433-2440.
Zhou C Y, Wang S J, Peng J. Climatic characteristics of water vapor resources over the Jinsha River reaches and its surroundings [J]. Resources Science, 2010, **32**(12): 2433-2440.
- [42] Xu X Y, Riley W J, Koven C D, *et al.* Earlier leaf-out warms air in the north [J]. Nature Climate Change, 2020, **10**(4): 370-375.
- [43] 刘珞丹, 李晶, 柳彩霞, 等. 2000-2015 年长江经济带植被覆盖时空变化特征及影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 330-336, 347.
Liu L D, Li J, Liu C X, *et al.* Analysis on the characteristics of temporal and spatial changes and influencing factors of vegetation coverage in the Yangtze River Economic Belt from 2000 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(6): 330-336, 347.
- [44] 潘颖, 林杰, 佟光臣, 等. 2004—2014 年太湖流域植被覆盖时空变化特征[J]. 生态与农村环境学报, 2018, **34**(1): 37-45.
Pan Y, Lin J, Tong G C, *et al.* Spatio-temporal variations of vegetation coverage in Taihu Lake Basin from 2004 to 2014 [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, **34**(1): 37-45.
- [45] 陶帅, 邝婷婷, 彭文甫, 等. 2000—2015 年长江上游 NDVI 时空变化及驱动力——以宜宾市为例[J]. 生态学报, 2020, **40**(14): 5029-5043.
Tao S, Kuang T T, Peng W F, *et al.* Analyzing the spatio-temporal variation and drivers of NDVI in upper reaches of the Yangtze River from 2000 to 2015: a case study of Yibin City [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(14): 5029-5043.
- [46] Kong R, Zhang Z X, Zhang F Y, *et al.* Increasing carbon storage in subtropical forests over the Yangtze River basin and its relations to the major ecological projects [J]. Science of the Total Environment, 2020, **709**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136163.
- [47] Yang H F, Zhong X N, Deng S Q, *et al.* Assessment of the impact of LUCC on NPP and its influencing factors in the Yangtze River basin, China [J]. CATENA, 2021, **206**, doi: 10.1016/j.catena.2021.105542.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model .....	..... PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method .....	..... WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port .....	..... XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing .....	..... ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter .....	..... WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019 .....	..... KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan .....	..... WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area .....	..... LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019 .....	..... ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain .....	..... GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an .....	..... ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatio-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data .....	..... WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze .....	..... CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors .....	..... YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period .....	..... JI Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region .....	..... NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake .....	..... HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake .....	..... WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River .....	..... ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff .....	..... ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems .....	..... CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths .....	..... WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin .....	..... LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water .....	..... PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing .....	..... MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition .....	..... HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment .....	..... REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺ MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors .....	..... LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater .....	..... YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process .....	..... LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge .....	..... GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 .....	..... XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years .....	..... CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst .....	..... HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt .....	..... ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area .....	..... SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area .....	..... LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China .....	..... WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province .....	..... XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility .....	..... ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan .....	..... LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems .....	..... SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas .....	..... MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment .....	..... LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas .....	..... XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils .....	..... WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil .....	..... XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)