

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

2000 ~ 2021 年黄土高原生态分区 NEP 时空变化及其驱动因子

周怡婷¹, 严俊霞^{1*}, 刘菊², 王琰¹

(1. 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006; 2. 山西省林业和草原科学研究院, 太原 030012)

摘要: 净生态系统生产力(NEP)是陆地生态系统碳源/汇定量评价的重要指标. 以黄土高原地区及6个生态分区(黄土高原沟壑区A1、A2副区, 黄土丘陵沟壑区B1、B2副区、沙地和农灌区(C区)和土石山区及河谷平原区(D区))为研究对象, 结合遥感、气象、地形和人类活动数据, 采用相关性分析、多元回归残差分析和地理探测器等方法, 估算区域NEP并分析其时空变化特征及气候、地形、人为因子对NEP时空变化的影响. 结果表明, 在时间尺度上, 2000~2021年, 黄土高原NEP多年平均值(以C计)为 $104.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 黄土高原及各生态分区NEP均呈增长趋势, 其中, 黄土高原沟壑区A2副区NEP年均增长率最大, 为 $9.04 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 沙地和农灌区NEP年均增长率最小, 为 $2.74 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 除沙地和农灌区为弱碳源外, 其余各生态分区均表现为碳汇. 在空间尺度上, 黄土高原年均NEP呈现东南高西北低的分布格局, 碳汇高值主要分布在黄土高原沟壑区南部, 碳源区主要分布在黄土高原沟壑区北部、沙地和农灌区的大部; NEP的空间变化有显著差异, 高增幅主要分布在A2副区中南部以及B2副区的西南部. 黄土高原及各生态分区NEP时间变化受人为主因素影响最大, 人类活动数据与NEP的相关系数均大于0.80, 且人为因素对NEP的贡献率均在50%以上; NEP的空间变化受气象因子的影响较大, 降水、太阳辐射是影响空间变化的主导因子. 总之, 黄土高原NEP的时空变化受自然因素和人类社会因素共同影响. 研究结果可为黄土高原陆地生态系统减排增汇及实现双碳目标提供参考.

关键词: 黄土高原; 生态分区; 净生态系统生产力; 相关分析; 残差分析; 地理探测器

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2806-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306059

Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021

ZHOU Yi-ting¹, YAN Jun-xia^{1*}, LIU Ju², WANG Yan¹

(1. Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 2. Shanxi Academy of Forestry and Grassland Science, Taiyuan 030012, China)

Abstract: Net ecosystem productivity (NEP) is an important index for the quantitative evaluation of carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems. Based on MOD17A3 and meteorological data, the vegetation NEP was estimated from 2000 to 2021 in the Loess Plateau (LP) and its six ecological subregions of the LP (loess sorghum gully subregions: A1, A2; loess hilly and gully subregions: B1, B2; sandy land and agricultural irrigation subregion: C; and earth-rock mountain and river valley plain subregion: D). Combined with the terrain, remote sensing, and human activity data, Theil-Sen Median trend analysis, correlation analysis, multiple regression residual analysis, and geographic detector were used, respectively, to explore the spatio-temporal characteristics of NEP and its response mechanism to climate, terrain, and human activity. The results showed that: ① On the temporal scale, from 2000 to 2021 the annual mean NEP of the LP region (in terms of C) was $104.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. The annual mean NEP for both the whole LP and each of the ecological subregions showed a significant increase trend, and the NEP of the LP increased by $6.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ during the study period. The highest growth rate of the NEP was $9.04 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, occurring in the A2 subregion of the loess sorghum gully subregions. The subregion C had the lowest growth rate of $2.74 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Except for the C subregion, all other ecological subregions (A1, A2, B1, B2, and D) were carbon sinks. ② On the spatial scale, the spatial distribution of annual NEP on the LP was significantly different, with the higher NEP distribution in the southeast of the LP and the lower in the northwest of the LP. The high carbon sink area was mainly distributed in the southern part of the loess sorghum gully subregions, and the carbon source area was mainly distributed in the northern part of the loess sorghum gully subregions and most of the C subregion. The high growth rate was mainly distributed in the central and the southern part of the A2 subregion and the southwest part of the B2 subregion. ③ Human activities had the greatest influence on the temporal variation in NEP in the LP and all the ecological subregions, with the correlation coefficient between human activity data and NEP being above 0.80, and the relative contribution rates of human factors was greater than 50%. The spatial distribution was greatly affected by meteorological factors, among which the precipitation and solar radiation were the main factors affecting the spatial changes in the NEP of the LP. The temporal and spatial variations in the NEP in the LP were influenced by natural and human social factors. To some extent, these results can provide a reference for the terrestrial ecosystem in the LP to reduce emissions and increase sinks and to achieve the goal of double carbon.

Key words: Loess Plateau(LP); ecological subregion; net ecosystem productivity; correlation analysis; residual analysis; geographic detector

工业革命以来, 化石燃料的燃烧和土地利用的变化, 使大气中温室气体特别是二氧化碳(CO_2)浓度激增^[1], 从而导致全球平均温度持续上升. 陆地生态系统是地球上重要的碳汇, 每年抵消超过30%的人为碳排放量^[2]. 净生态系统生产力(NEP)是陆地生态系统与大气之间的净碳交换, 是定量评价陆地生

态系统碳源/汇的重要指标^[3]. 在气候变化和人为干

收稿日期: 2023-06-07; 修订日期: 2023-08-07

基金项目: 山西省自然科学基金项目(20210302123449); 山西省科技创新人才团队专项资助项目(202204051001010); 国家自然科学基金项目(41977412)

作者简介: 周怡婷(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态系统碳源/汇的动态变化. E-mail: zhouyiting@163.com

* 通信作者, E-mail: yjx422@sxu.edu.cn

扰的背景下, 准确掌握陆地碳源/汇的时空变化并揭示其驱动机制对区域可持续发展和全球碳减排具有重要意义。

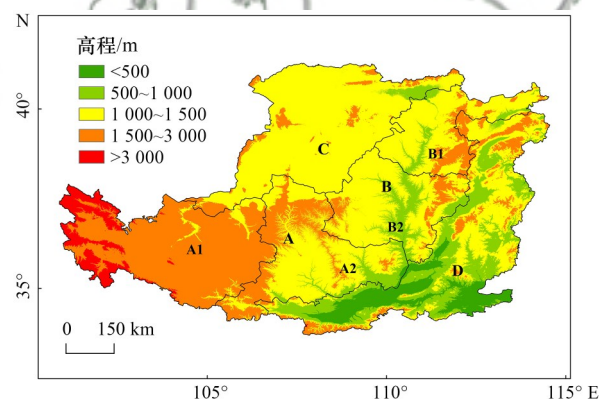
中国以其约占全球 6.5% 的陆地面积, 贡献了相当于全球陆地生态系统净 CO₂ 吸收量的 10%~31%, 表明中国陆地生态系统在全球生态系统碳汇中具有重要作用^[4]。自 2000 年以来, 中国植被 NEP 整体呈增加趋势^[5], 然而不同区域 NEP 的年际变化趋势并不相同。2000~2020 年西南地区^[6]和 2000~2015 年青海高原^[7]的 NEP 呈显著地上上升趋势, 而 2000~2020 年海南岛森林 NEP 呈现不显著地下下降趋势^[8]。区域 NEP 的时空变化是多因素共同作用的结果^[9~11]。气候变化可以驱动植被动态变化和调节土壤呼吸, 从而影响陆地生态系统的碳循环^[6~8]。一般而言, 降雨充沛和太阳辐射充足, 加之较高的气温, 有利于促进植物的光合作用, 进而增强植被的碳汇能力^[5]。人类活动(植树造林、生态修复和森林经营等)是驱动区域尺度生态系统碳源/汇时空变化的重要因素^[12, 13]。据报道, 退耕还林工程实施后黄土高原净初级生产力(net primary productivity, NPP)、NEP 及碳储量均呈增长趋势^[14]; 生态保护工程实施后三江源地区 NEP 呈显著上升趋势^[15], 碳汇功能显著增强。不同区域气候变化和人类活动对 NEP 的贡献率有很大差异^[6]。综上所述, 我国不同区域植被 NEP 变化趋势及对不同驱动因子的响应, 均存在显著的时空差异, 因此, 有必要针对区域尺度, 结合时空动态演变分析来揭示区域 NEP 变化的驱动机制。

黄土高原地域广阔, 气候类型多样, 自然地理条件复杂和空间组合变化明显, 降水和气温空间分布很不平衡, 植被覆盖存在很大的空间异质性^[16], 是世界上水土流失最严重和生态环境最脆弱的地区之一^[14, 17]。近 20 年来, 随着退耕还林/草、天然林保护和山水林田湖草等工程的实施, 该区的植被覆盖度得到极大改善, 植被的固碳能力显著提高^[18]。对生态系统碳源/汇的研究多集中于黄土高原整个区域陆地生态系统的 NPP、碳储量的研究^[19~21], 而对不同生态分区陆地生态系统碳源/汇的时空变化规律及环境因子驱动机制仍然相对缺乏。为此, 本文依据杨艳芬等^[16]的黄土高原生态分区结果, 结合遥感、气象、地形和人类活动数据, 探析 2000~2021 年黄土高原及其 6 个生态分区 NEP 的时空分布特征、变化趋势及其对不同驱动因子的响应, 量化自然和人类活动因子对 NEP 变化的贡献, 以期黄土高原减排增汇、实现双碳目标提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(33° 41' ~41° 16' N, 100° 52' ~114° 33' E)位于中国中部偏北, 总面积达 6.4×10^5 km²。属大陆性季风气候, 全年 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温 2 300~4 500 °C, 无霜期 120~250 d, 日照时数 1 900~3 200 h^[22], 年平均气温 3.6~14.3 °C, 年降水量 150~800 mm^[23], 降水自东南向西北、由山地向平地递减, 年际变异较大, 年内分布也不均匀^[16]。地势西南高、东南低, 海拔 85~3 700 m。地貌类型多样, 由丘陵、高原、平原、沙漠、草原和土石山地等组成, 其中山区、丘陵区和高塬区占 2/3 以上。土壤类型主要有黄绵土、褐土、黑垆土等。植被具有明显的分区差异, 从东南向西北依次为森林草原、典型草原和半荒漠草原。杨艳芬等^[16]依据国家发改委的分区原则和方法, 综合考虑了黄土高原水土流失治理技术、模式和生态恢复建设工程的区域性差异, 将黄土高原划分为 4 个生态分区: 黄土高塬沟壑区(A)、黄土丘陵沟壑区(B)、沙地和农灌区(C)和土石山区及河谷平原区(D)。其中黄土高塬沟壑区以六盘山为界, 划分为 A1 和 A2 两个副区; 黄土丘陵沟壑区以毛乌素沙漠南缘为界, 划分为 B1 和 B2 两个副区(图 1)。



A: 黄土高塬沟壑区, A1: 黄土高塬沟壑区 A1 副区, A2: 黄土高塬沟壑区 A2 副区; B: 黄土丘陵沟壑区, B1: 黄土丘陵沟壑区 B1 副区, B2: 黄土丘陵沟壑区 B2 副区; C: 沙地和农灌区; D: 土石山区及河谷平原区

图 1 研究区位置及高程示意

Fig. 1 Location and elevation of the study area

1.2 数据来源

本研究使用了由美国国家航空航天局数据中心(<http://adsweb.modaps.nasa.gov/>)提供的 MODIS Terra NPP 数据(MOD17A3HGF)用于 NEP 的估算, 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 1 a, 时间跨度是 2000~2021 年。

数字高程模型数据来源于由美国国家航空航天

局(NASA)和美国国家测绘局(NIMA)联合测量的SRTM产品,空间分辨率90 m.坡度(slope)和坡向(aspect)数据基于高程(ele)数据计算得到.

气温和降水量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>),时间分辨率为月度,空间分辨率为1 km^[24],月气温数据求平均值获得年平均气温(T),月降水量数据求和得到年降水量(P),时间跨度均为2000~2021年;年太阳总辐射(SR)数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),通过对逐日日照时数数据进行计算得到年太阳总辐射数据,并利用ArcGIS 10.2软件采用反距离权重插值法(IDW)将站点数据插值成栅格数据^[25],时间跨度为2000~2021年.

人类活动强度(HA)数据来自Mu等^[26]的研究,该数据从多个来源收集8类人类压力变量(即建筑环境、人口密度、夜间灯光、农田、牧场、公路、铁路和通航航道),生成年度全球人类足迹数据集来综合表示人类活动强度,空间分辨率为1 km,时间跨度为2000~2018年.

将所有数据统一投影至WGS1984/UTM 49N坐标系,空间分辨率重采样至1 km,便于进行后续数据的处理与分析.

1.3 研究方法

1.3.1 NEP估算

NEP定义为NPP与土壤异养呼吸(RH)的差值,其计算公式如下:

$$NEP = NPP - RH \quad (1)$$

如果NEP大于零,表示植被固定的碳比土壤呼吸释放的碳大,即碳汇;否则就是碳源.

根据前人的研究^[27-29],笔者对黄土高原地区土壤异养呼吸的估算模型进行了对比,最终采用Pei等^[27]建立的经验公式,该公式已被多个研究成功运用^[30,31].公式如下:

$$RH(x, t) = 0.22 \times [\exp\{0.0913T(x, t)\} + \ln\{0.3145P(x, t) + 1\}] \times 30 \times 46.5\% \quad (2)$$

式中, T 和 P 分别为像元 x 在 t 月的平均温度($^{\circ}\text{C}$)和总降水量(mm).

将每年的月度RH数据相加得到年RH,后用年NPP减去RH得到年NEP.

1.3.2 NEP变化趋势分析

采用Theil-Sen中值趋势分析方法来探讨黄土高原NEP的变化趋势,其计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{NEP_j - NEP_i}{j - i}\right) \quad (3)$$

式中, β 为NEP变化趋势; NEP_i 和 NEP_j 分别表示第 i 年和第 j 年NEP的时间序列值(本研究中 $2\,000 \leq i <$

$j \leq 2\,021$). $\beta > 0$ 表示研究期内NEP变化呈增加趋势, $\beta < 0$ 表示研究期内NEP变化呈减少趋势.

采用Mann-Kendall方法对NEP变化趋势进行显著性检验.对于标准值 Z 大于0,则序列呈上升趋势;若小于0,则序列呈下降趋势.当 Z 的绝对值大于等于1.64、1.96和2.58时则说明该时间序列分别通过了置信水平90%、95%和99%的显著性检验.

1.3.3 皮尔逊相关分析

利用相关性系数和显著性检验来揭示各驱动因子与NEP时空变化相关性的强弱.

1.3.4 多元回归残差分析

利用多元回归残差分析分离气候变化和人类活动对NEP变化的贡献.通过建立年均气温、年降水量和年太阳总辐射与NEP的回归方程预测气候变化对NEP的影响(NEP_{cc});NEP观测值(NEP_{obs})与 NEP_{cc} 之间的差值,即 NEP_{HA} ,表示人类活动对NEP的影响.

$$NEP_{cc} = a \times T + b \times P + c \times SR + d \quad (4)$$

$$NEP_{HA} = NEP_{obs} - NEP_{cc} \quad (5)$$

式中, NEP_{cc} 和 NEP_{obs} 分别表示基于回归模型的NEP预测值和NEP观测值; a 、 b 、 c 和 d 为模型参数; T 、 P 和 SR 分别为年均气温($^{\circ}\text{C}$)、年降水量(mm)和年太阳总辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); NEP_{HA} 为残差.

利用一元线性回归法计算2000~2021年的 NEP_{cc} 和 NEP_{HA} 的变化趋势率,分别表示在气候变化和人类活动影响下的NEP变化趋势.趋势率为正表示气候变化或人类活动可促进NEP的增加;反之,表示会导致NEP下降.根据表1对NEP变化的主要驱动因素进行区分,计算气候变化和人类活动对NEP变化的贡献率.

1.3.5 地理探测器模型

地理探测器是一种揭示空间异质性、基于4个模块化驱动因素对响应变量影响^[32]的空间统计方法.本研究中主要使用因子探测和交互探测来分析黄土高原NEP空间差异的驱动机制.因子探测主要是衡量驱动因素对响应变量空间变异的解释能力,用 q 值来表示.

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (6)$$

式中, SSW 和 SST 分别表示层内方差之和和全区总方差; $h = 1, 2, 3, \dots, L$ 为依赖或独立因素的分层; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区NEP值的方差; $0 \leq q \leq 1$.

用交互探测来判断两个驱动因素的解釋能力是

表 1 NEP 变化的驱动因素判定标准及贡献率计算方法¹⁾

Table 1 Criteria for determining the driving factors of NEP changes and calculation methods for contribution rate

slope(NEP _{obs})	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率/%	
		slope(NEP _{CC})	slope(NEP _{HA})	气候变化	人类活动
>0	CC 和 HA	>0	>0	slope(NEP _{CC})/slope(NEP _{obs})	slope(NEP _{HA})/slope(NEP _{obs})
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC 和 HA	<0	<0	slope(NEP _{CC})/slope(NEP _{obs})	slope(NEP _{HA})/slope(NEP _{obs})
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

1) NEP_{obs} 为 NEP 观测值; NEP_{CC} 为气候变化对 NEP 变化影响量; NEP_{HA} 为人为因素对 NEP 变化影响量; CC 为气候变化; HA 为人为因素

增强、减弱或相互独立. 方法是对两个独立因素 X_1 、 X_2 的 q 值, 以及 X_1 和 X_2 交互探测的 q 值进行比较^[32].

基于之前的研究^[14,33,34], 并考虑到具体的数据可用性, 分别选取了气象因子(T 、 P 、 SR)、地形因子(ele 、 $slope$ 、 $aspect$)和人为因子(HA)这 7 个潜在因子进行相关性和地理探测器分析. 其中地理探测器在要求离散自变量的前提下, 根据 q 统计值的最大值原则, 采用最优离散方法对连续自变量进行重新分类, 本研究基于 R Studio 软件中的“GD”包进行分类.

2 结果与分析

2.1 黄土高原 NEP 年际变化

2000~2021 年黄土高原年均 NEP 值(以 C 计, 下同)2001 年最低为 $7.42 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 2018 年最高为 $171.81 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 平均值为 $104.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ [图 2(a)]; 整体呈显著增长趋势($P < 0.05$), 年均增长率

为 $6.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 22 年间, 黄土高原碳源面积($\text{NEP} < 0$)占比呈波动下降趋势, 其中 2001 年占比最大. 而随着 NEP 的增加, 2021 年碳汇区域($\text{NEP} > 0$)的面积百分比达到 77%, 与 2000 年相比增加了 27%[图 2(b)].

6 个生态分区的年均 NEP 均呈显著增长趋势, 但增长速度不同(图 3). A2 副区 NEP 年均值和年变化率均居首位, 分别为 $186.84 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $9.04 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, C 区 NEP 年均值和年变化率均最小, 分别为 $-30.41 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $2.74 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 就 NEP 年均值而言, B 区和 C 区均小于黄土高原整个区域的平均水平; 而除 A1 副区和 C 区外, 其余各生态分区变化率均大于黄土高原的变化率. 各生态分区最大值主要集中在 2018 年和 2019 年, 最小值除 A1 副区外均在 2001 年. 其中, 2018 年 A2 副区 NEP 值最大为 $288.18 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 2001 年 C 区 NEP 值最小为 $-80.09 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 整体来看除 C 区为弱碳源, 其余各分区均为显著的碳汇.

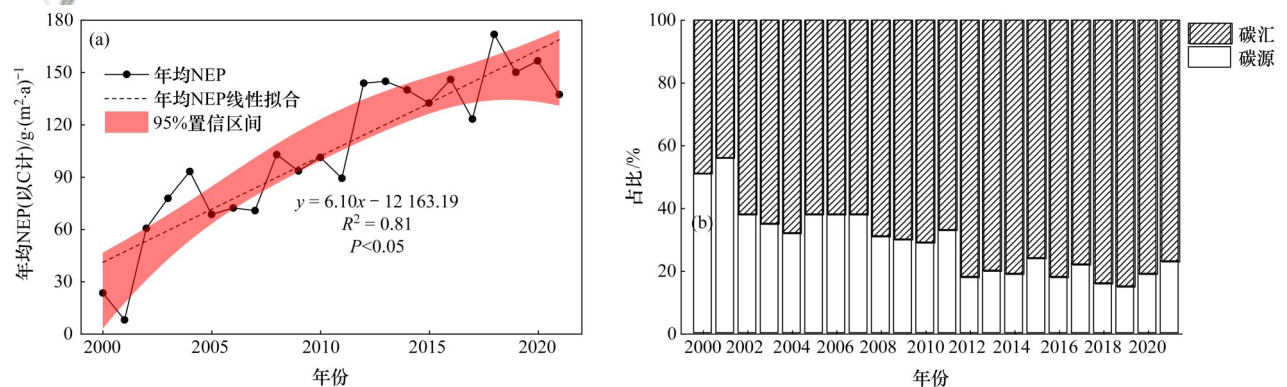


图 2 2000~2021 年黄土高原 NEP 及碳源/汇年际变化

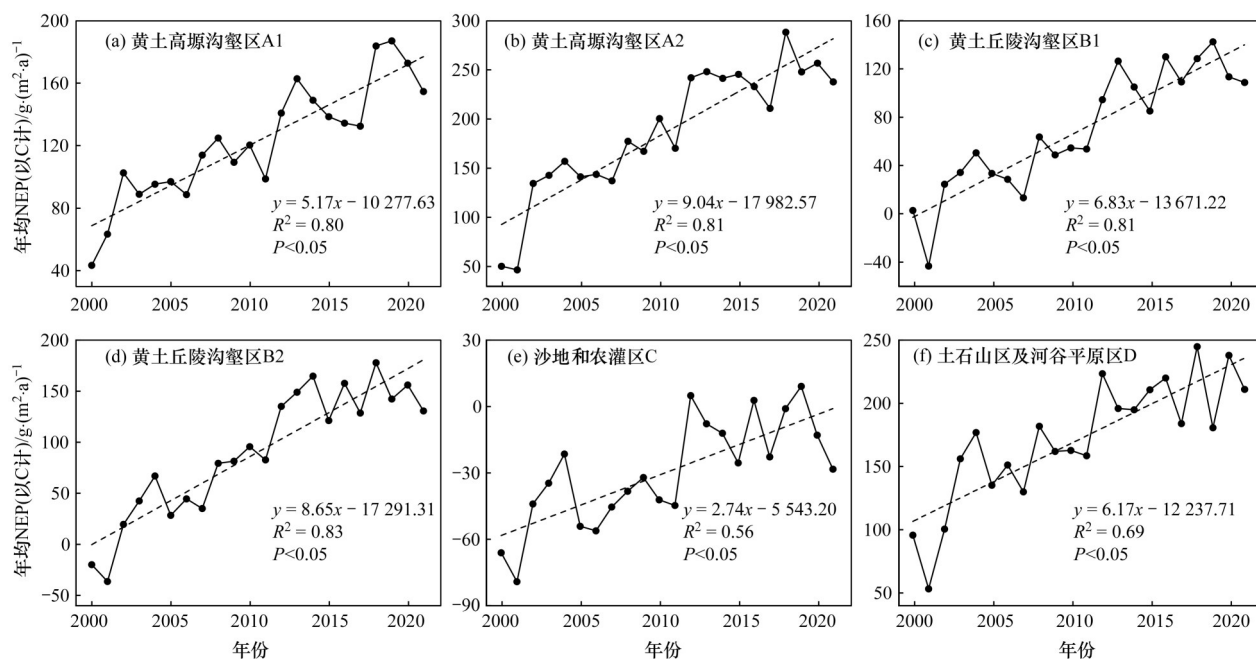
Fig. 2 Interannual changes in NEP and carbon source and sink in the Loess Plateau from 2000 to 2021

2.2 黄土高原 NEP 空间格局及其变化

黄土高原 NEP 整体呈现东南高西北低的空间分布格局(图 4). $\text{NEP} < 0$ 的面积占总面积的 26.56%, 主要分布在 C 区大部分地区, A 区北部和 B 区西北部也有分布; $\text{NEP} > 0$ 的面积占 73.44%, 其中 NEP 高值区 [$> 300 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 占 7.45%, 主要分布在 A2

副区西南部以及 A1 副区南部边缘地区.

NEP 空间变化格局与其空间分布格局相似, 呈现由东南向西北递减的趋势[图 5(a)]. 2000~2021 年, 黄土高原固碳能力以增长为主, 面积占比达 98.55%, 显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)增加的面积占全区域的 89.41%, 其中, NEP 的微增幅 [$2.5 \sim$



折线表示不同生态分区年均NEP变化值;虚线表示不同生态分区年均NEP线性拟合趋势

图3 2000~2021年不同生态分区年均NEP年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation trend of average annual NEP in different ecological subregions from 2000 to 2021

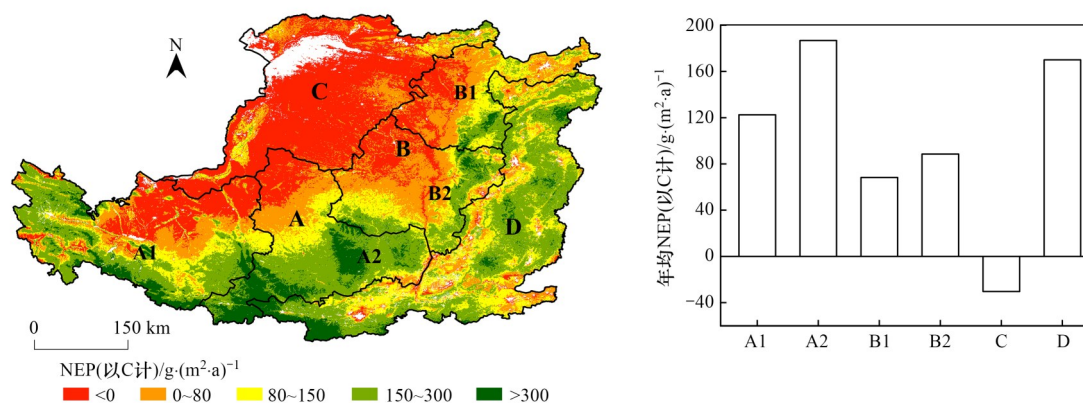


图4 2000~2021年黄土高原及其生态分区平均NEP空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean NEP in the Loess Plateau and its ecological subregions from 2000 to 2021

$5\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 、中增幅 $[5\sim10\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 和高增幅 $[>10\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 面积占比分别为22.67%、47.28%和13.12%，高增幅主要分布在A2副区中南部以及B2副区的西南部(如陕西延安、宝鸡，甘肃庆阳和平凉等地)。负增长区域面积仅占1.45%，零星分布在C区、D区以及A1副区等部分地区(图5)。

2.3 驱动因子分析

2.3.1 驱动因子对黄土高原NEP年际变化的影响

黄土高原全区及各生态分区NEP的年际变化与HA均呈极显著正相关($P < 0.01$)，相关系数均在0.80以上；除A2副区和D区外，全区及余生态分区的NEP与年降水量的年际变化相关性均达到了显著($P < 0.05$)或者极显著水平($P < 0.01$)；全区及各生态分区NEP的年际变化与年均气温和年太阳总辐

射相关性均未达到显著水平($P > 0.05$)(图6)。残差分析表明，气候因素和人类活动对NEP年际变化的贡献率分别为37.33%和62.67%，表明人类活动是引起NEP年际变化的主导因子(图7)。黄土高原约19.37%的区域受气候因素的主导(贡献率 $>50\%$)，主要分布在C区北部、A1副区北部以及D区东北部[图7(a)]。人类活动对NEP变化的贡献率在79.81%的区域占主导，其中贡献率大于75%的地区占区域面积的1/4，集中分布在研究区中部和南部[图7(b)]。在6个分区中，人类活动对NEP增长贡献率最高，贡献率均在50%以上，而气候因子贡献率在20%~45%之间。其中人类活动对A2副区贡献率最大(76.35%)，对C区贡献率最小(53.88%)，相应C区气候因素引起NEP增长的贡献率最大(46.12%)，A2

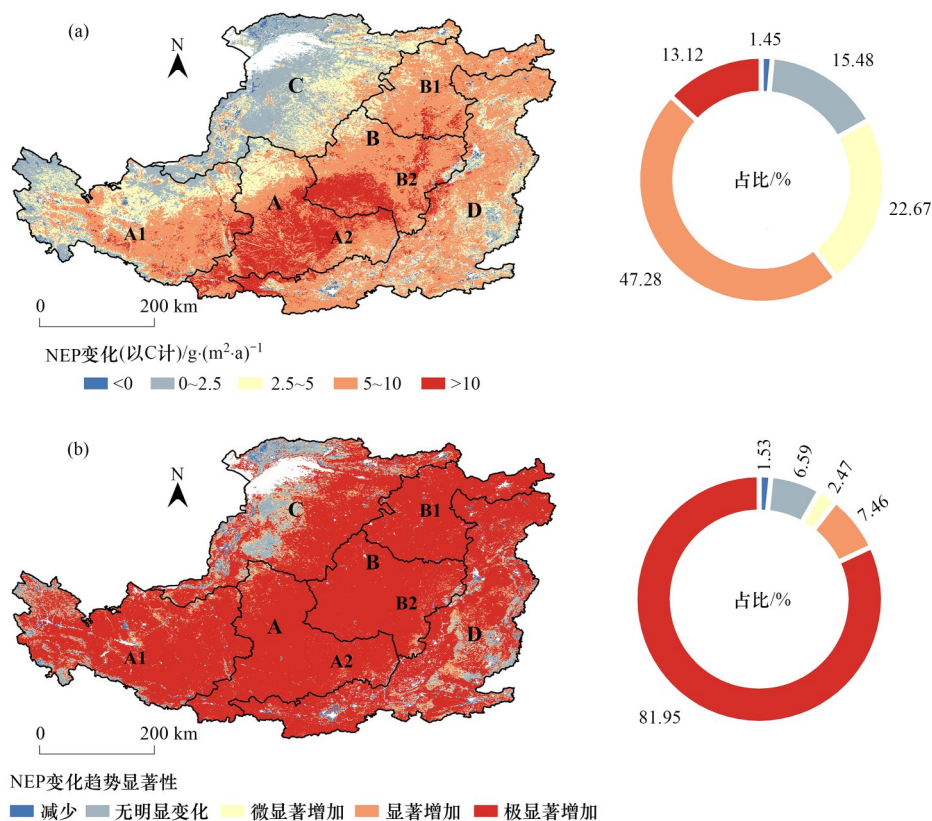
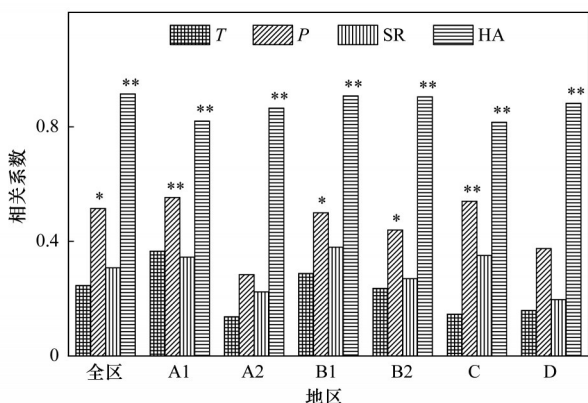


图5 2000~2021年黄土高原NEP变化趋势和显著性水平空间分布与面积占比

Fig. 5 Spatial distribution and area proportion of NEP change trend and significance test in Loess Plateau from 2000 to 2021

副区最小(23.65%)。



*表示显著相关($P < 0.05$); **表示极显著相关($P < 0.01$)

图6 黄土高原及各生态分区NEP的年际变化与环境因子年际变化的相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between the interannual variation in NEP and the interannual variation in environmental factors in the Loess Plateau and its ecological subregions

2.3.2 驱动因子对黄土高原NEP空间分异性的影响

因子的独立效应方面, 相关分析和因子探测均表明 $P(r = 0.72, q = 0.54)$ 和 $SR(r = -0.56, q = 0.37)$ 是影响黄土高原NEP空间格局的主要驱动因子(图8), 其中SR和T与NEP呈负相关, 而HA和aspect对NEP的解释力相对较弱. 各生态分区的主要影响

因子不同, A区、B1副区、B2副区、C区、D区分别是P、T、P和SR、SR、ele(图8). 整体来看, 气象因素是黄土高原及各分区NEP空间变化的主要影响因素, 地形和人类活动的解释力相对较弱.

为了量化两因子的交互作用, 进一步做了交互探测分析, 表2中列出了影响黄土高原全区和各生态分区NEP空间变化的主要影响因素(P、T、SR、ele)之间及其与其他影响因子(HA、slope、aspect)交互作用的 q 值. 结果表明, 成对因子的 q 值大于单个因子的 q 值或它们的总和, 说明两因子交互作用后对NEP空间变化的解释力更强. 黄土高原 $P \cap T$ 和 $P \cap ele$ 交互作用的 q 值最高, 均为0.72. A1副区、B1副区和D区 $P \cap T$ 的交互解释力最强, q 值分别为0.77、0.86和0.56, A2副区 $SR \cap T$ 交互解释力最强, q 值为0.89, B2副区 $P \cap ele$ 解释力最强, q 值为0.82, 而C区 $T \cap HA$ 交互作用 q 值最高, 为0.60(表2).

3 讨论

3.1 时间尺度NEP变化分析

以往研究表明, 自1999年开始实施退耕还林/草工程以来, 黄土高原地区植被覆盖度明显提高^[35~37]. 刘国彬等^[35]报道了黄土高原2017年的林草

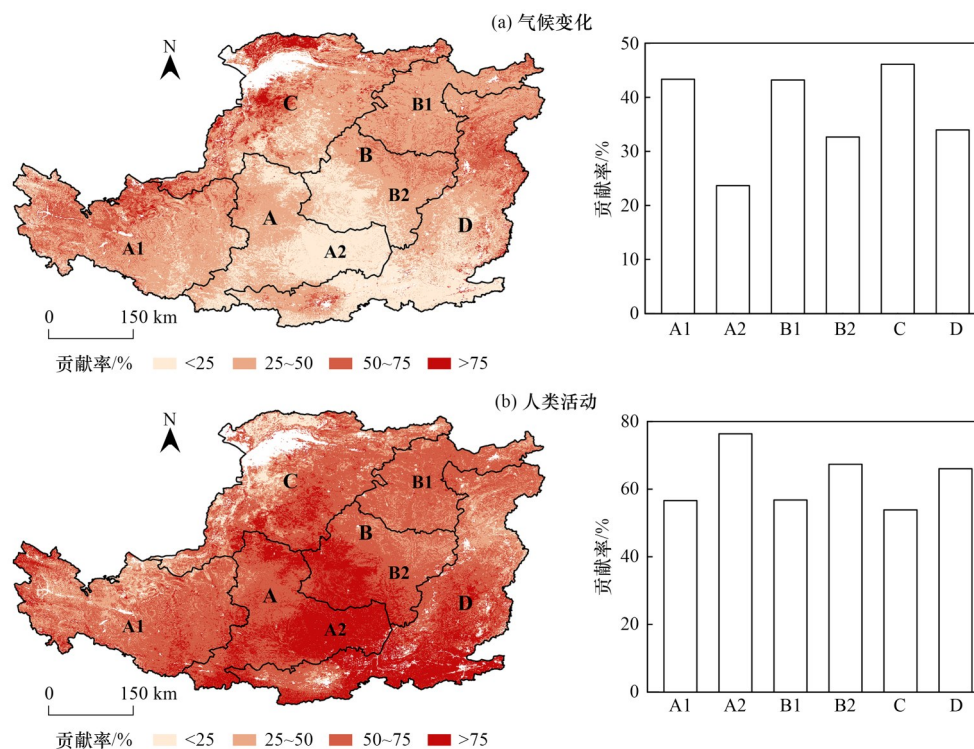


图7 气候变化和人类活动对黄土高原及各生态分区NEP增加的贡献率

Fig. 7 Contribution rates of climate change and human activities to the increase in NEP in the Loess Plateau and its ecological subregions

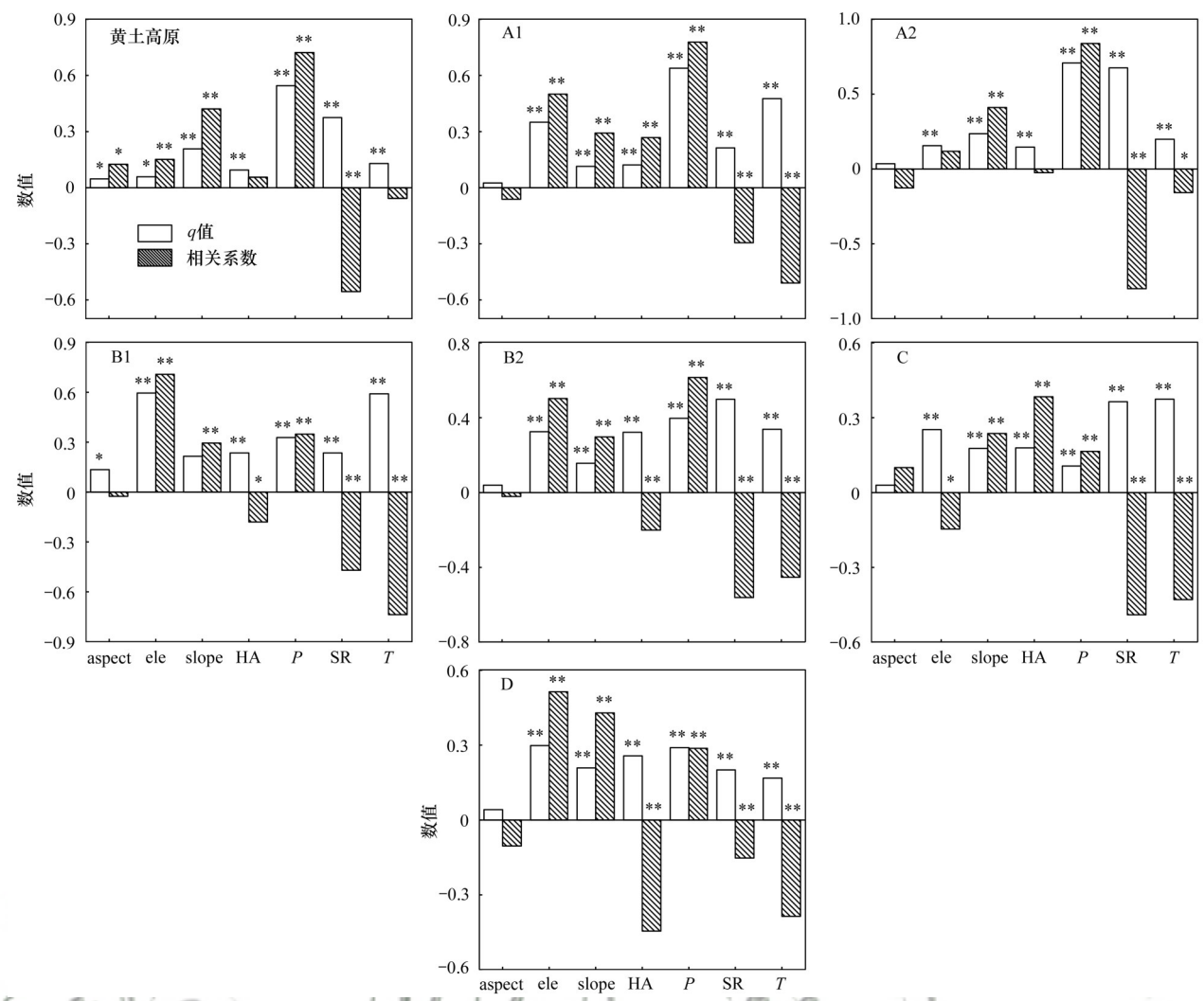
覆盖率比1999年提高了33.6%，水土保持林草及封禁治理面积达到24万 km^2 以上；王逸男等^[36]报道了2000年至2020年黄土高原植被覆盖度由0.39增加到0.61，且2017年后提升速度加快。国家政策和相关生态恢复措施等人为因素是引起黄土高原植被覆盖度增加的主要原因，2000~2020年人类活动对黄土高原植被覆盖度变化的贡献率为65.22%，气候变化为34.78%^[37]。植被恢复、退耕还林/草和森林经营等措施能够通过植物光合作用将大气中的 CO_2 固定在植物和土壤中，从而提升了黄土高原生态系统的固碳能力^[38]。张佑铭等^[39]报道了1990~2015年黄土高原植被的NPP与植被固碳总体呈增加趋势，年均NPP增速为 $2.74 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ；杨丹等^[19]发现2000~2015年黄土高原植被NPP的平均增速为 $3.62 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。本研究结果表明，2000~2021年黄土高原全区年均NEP呈显著增长趋势($P < 0.05$)，增长速率为 $6.10 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ，人类活动是引起黄土高原NEP年际变化的主要因素，贡献率为62.67%，这与Feng等^[14]的研究结果一致。

6个生态分区NEP均呈增长趋势，但增长速率有所差异。A区整体表现为显著的碳汇区，碳汇增速也较快，这与该区高植被覆盖率有关^[40]；而A2副区NEP增长速率最快，这是因为A2副区温度、降水等自然条件优越^[16]，且是固沟保塬、退耕还草的主要区域^[14]，加之坡耕地整治和小流域综合治理等一系

列生态修复工程的实施，土壤侵蚀明显减弱，植被以及区域生态环境得到了极大改善^[41]。B区碳汇量相对较低，这可能是由于早期该区过度放牧等不合理的土地利用，使生态环境遭到严重破坏，但在退耕还林/草等生态工程的支持下，碳储量共计增加 $5.27 \times 10^4 \text{ t}$ ，还林还草的碳汇贡献率超过50%，NEP增长速率加快，植被覆盖度明显提高，取得了显著的经济和生态效益^[42]。C区是黄土高原主要的弱碳源区域，气候干旱、降水稀少，不合理的水资源利用导致地表植被减少，植被的光合能力下降，植被生产力受到限制。该地区相较于其他分区，更容易受到气候变化的干扰，整体碳汇增长率较低^[40]，且该区受人类活动影响较大，长期的过牧滥牧造成严重的草原退化和沙化，通过轮牧、禁牧和休牧等措施的实施^[43]，以及生态工程的建设，使得该地生态治理目标基本实现^[44]。D区气候条件优越，林地广布，植被覆盖率高^[16]，属于显著的碳汇区。该区也是重要的农业区，且聚集了西安、郑州和太原等大型城市，区域经济活动频繁，受人类活动影响强度较大，近年来实施的山水林田湖草沙保护和修复工程，增强了生态系统的固碳能力，使得NEP年际变化率较高^[45]。

3.2 空间尺度NEP变化分析

空间尺度上，相关分析和因子探测结果均表明，年降水量和年太阳总辐射是影响黄土高原NEP



*表示显著相关($P < 0.05$); **表示极显著相关($P < 0.01$)

图8 黄土高原NEP的空间分布与驱动因子的相关系数和因子探测 q 值

Fig. 8 Correlation coefficient and factor detection q value between NEP spatial distribution and driving factors in the Loess Plateau

表2 黄土高原及其生态分区交互探测结果

Table 2 Results of interactive detection of Loess Plateau and its ecological subregions

交互因子	全区	A1副区	A2副区	B1副区	B2副区	C区	D区
$P \cap \text{aspect}$	0.67	0.72	0.71	0.66	0.53	0.31	0.32
$P \cap \text{ele}$	0.72	0.75	0.83	0.78	0.82	0.54	0.55
$P \cap \text{slope}$	0.63	0.74	0.78	0.49	0.52	0.33	0.32
$P \cap \text{HA}$	0.65	0.74	0.84	0.53	0.63	0.34	0.44
$P \cap \text{SR}$	0.64	0.71	0.76	0.60	0.66	0.47	0.39
$P \cap T$	0.72	0.77	0.87	0.86	0.74	0.50	0.56
$\text{SR} \cap \text{aspect}$	0.48	0.34	0.69	0.44	0.62	0.35	0.32
$\text{SR} \cap \text{ele}$	0.66	0.65	0.87	0.74	0.79	0.46	0.50
$\text{SR} \cap \text{slope}$	0.52	0.34	0.80	0.41	0.56	0.38	0.32
$\text{SR} \cap \text{HA}$	0.52	0.38	0.80	0.50	0.73	0.51	0.41
$\text{SR} \cap T$	0.63	0.70	0.89	0.74	0.68	0.44	0.48
$T \cap \text{aspect}$	0.26	0.60	0.27	0.66	0.34	0.46	0.26
$T \cap \text{ele}$	0.26	0.51	0.27	0.68	0.50	0.56	0.36
$T \cap \text{slope}$	0.37	0.60	0.38	0.58	0.50	0.45	0.39
$T \cap \text{HA}$	0.25	0.68	0.37	0.69	0.51	0.60	0.36
$\text{ele} \cap \text{aspect}$	0.25	0.44	0.22	0.64	0.50	0.34	0.32
$\text{ele} \cap \text{slope}$	0.31	0.44	0.43	0.63	0.54	0.37	0.38
$\text{ele} \cap \text{HA}$	0.17	0.59	0.40	0.68	0.54	0.39	0.37

空间分异的主要驱动因子,与之前大多数学者的研究结果相一致^[30,33].黄土高原年降水量均呈东南高西北低的空间格局^[46],与NEP空间分布高度一致.水分是NEP变化的主要限制因子,降水的增加促进浅根植物的发育,进而促进NEP的增加^[47];而黄土高原太阳辐射空间上自东南向西北递增,与NEP空间分布相反.热量的提高加大了区域的水分蒸散,使土壤水分降低、植物受到干旱胁迫,光合能力下降,生态系统生产力受到制约,进而抑制了植被的碳吸收和干物质积累^[48].交互探测的结果也证明了这一点,黄土高原全区及6个生态分区 $P \cap SR$ 的 q 值均大于单个因子的 q 值或大于两个因子 q 值的和(表2),表明年降水量和年太阳总辐射共同作用时会增加对NEP的解释能力.此外,B区和D区与人类活动呈负相关关系,这可能是该区域人口集聚效应强,城乡建设用地急剧增长占用了大量的耕地,土地利用格局发生变化,且煤炭开采等人类干扰对NEP的增长产生了负面效应^[49].除B2副区和C区外,黄土高原全区和其他分区的 $P \cap T$ 或 $SR \cap T$ 的 q 统计值最高,表明气候因素是引起黄土高原NEP空间变化的主要原因.

4 结论

(1)2000~2021年黄土高原全区及各分区年均NEP均呈显著增长趋势,年均增长率为 $2.74 \sim 9.04 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,A2副区最大,C区最小.2021年77%的区域为碳汇,与2000年相比碳汇面积增加了27%,除C区为弱碳源外,其余各分区均为显著的碳汇.

(2)黄土高原年均NEP呈现东南高西北低的空间分布格局.2000~2021年,98.55%的区域固碳能力增长,A2副区中南部以及B2副区西南部增幅较大.

(3)人类活动是影响黄土高原NEP时间变化的主要因素,对NEP年际变化的贡献率为62.67%,气候变化的贡献率为37.33%;气候因素是影响黄土高原NEP空间变化的主要驱动因子.

参考文献:

- [1] Princiotta F. Global climate change and the mitigation challenge [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2009, **59** (10): 1194-1211.
- [2] Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, et al. Global carbon budget 2020 [J]. Earth System Science Data, 2020, **12**(4): 3269-3340.
- [3] Erb K H, Kastner T, Plutzer C, et al. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass [J]. Nature, 2018, **553**(7686): 73-76.
- [4] Piao S L, He Y, Wang X H, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: methods, progress and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2022, **65**(4): 641-651.
- [5] 赵宁,周蕾,庄杰,等.中国陆地生态系统碳源/汇整合分析[J].生态学报,2021,**41**(19): 7648-7658.
- [6] Zhao N, Zhou L, Zhuang J, et al. Integration analysis of the carbon sources and sinks in terrestrial ecosystems, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(19): 7648-7658.
- [7] 徐勇,黄雯婷,郭振东,等.2000-2020年我国西南地区植被NEP时空变化及其驱动因素的相对贡献[J].环境科学研究,2023,**36**(3): 557-570.
- [8] Xu Y, Huang W T, Guo Z D, et al. Spatio-temporal variation of vegetation net ecosystem productivity and relative contribution of driving forces in southwest China from 2000 to 2020 [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, **36**(3): 557-570.
- [9] 刘凤,曾永年.2000-2015年青海高原植被碳源/汇时空格局及变化[J].生态学报,2021,**41**(14): 5792-5803.
- [10] Liu F, Zeng Y N. Analysis of the spatio-temporal variation of vegetation carbon source/sink in Qinghai Plateau from 2000-2015 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(14): 5792-5803.
- [11] 刘应帅,余瑞,郑彬彬,等.海南岛森林植被NEP季节性时空变化规律及气候驱动因素分析[J].热带生物学报,2022,**13**(2): 166-176.
- [12] Liu Y S, Yu R, Zheng B B, et al. Analysis of seasonal spatial and temporal variation patterns of forest vegetation NEP and climate drivers in Hainan Island [J]. Journal of Tropical Biology, 2022, **13**(2): 166-176.
- [13] Wei D, Qi Y H, Ma Y M, et al. Plant uptake of CO₂ outpaces losses from permafrost and plant respiration on the Tibetan Plateau [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, **118** (33), doi: 10.1073/pnas.2015283118.
- [14] Zhang J J, Hao X M, Hao H C, et al. Climate change decreased net ecosystem productivity in the arid region of central Asia [J]. Remote Sensing, 2021, **13**(21), doi: 10.3390/rs13214449.
- [15] Keenan T F, Prentice I C, Canadell J G, et al. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake [J]. Nature Communications, 2016, **7**, doi: 10.1038/ncomms13428.
- [16] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. Nature, 2009, **458**(7241): 1009-1013.
- [17] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, **115**(16): 4039-4044.
- [18] Feng X M, Fu B J, Lu N, et al. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau [J]. Scientific Reports, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep02846.
- [19] 张楨祺,蔡惠文,张平平,等.基于GEE遥感云平台的三江源植被碳源/汇时空变化研究[J].自然资源遥感,2023,**35**(1): 231-242.
- [20] Zhang Z Q, Cai H W, Zhang P P, et al. A GEE-based study on the temporal and spatial variations in the carbon source/sink function of vegetation in the Three-River Headwaters region [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, **35**(1): 231-242.
- [21] 杨艳芬,王兵,王国梁,等.黄土高原生态分区及概况[J].生态学报,2019,**39**(20): 7389-7397.
- [22] Yang Y F, Wang B, Wang G L, et al. Ecological regionalization and overview of the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(20): 7389-7397.
- [23] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" Program on the Loess Plateau in China [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, **119**

- (12): 2261-2275.
- [18] 师贺雄. 长江、黄河中上游地区退耕还林工程生态效益特征及价值化研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
Shi H X. Study on ecological effect characteristics and valuing physical account from Grain for Green Project in regions containing the upper and middle reaches of China's Yangtze and Yellow River [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2016.
- [19] 杨丹, 王晓峰. 黄土高原气候和人类活动对植被 NPP 变化的影响[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(2): 584-593.
Yang D, Wang X F. Contribution of climatic change and human activities to changes in net primary productivity in the Loess Plateau [J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(2): 584-593.
- [20] 刘欢欢, 陈印, 刘悦, 等. 基于随机森林模型的黄土高原草地净初级生产力时空格局及未来演变趋势模拟[J]. 干旱区研究, 2023, **40**(1): 123-131.
Liu H H, Chen Y, Liu Y, *et al.* Simulation of spatial pattern and future trends of grassland net primary productivity in the Loess Plateau based on random forest model [J]. Arid Zone Research, 2023, **40**(1): 123-131.
- [21] 李妙宇, 上官周平, 邓蕾. 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素[J]. 生态学报, 2021, **41**(17): 6786-6799.
Li M Y, Shanguan Z P, Deng L. Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(17): 6786-6799.
- [22] 王一贺, 赵允格, 李林, 等. 黄土高原不同降雨量带退耕地植被-生物结皮的分布格局[J]. 生态学报, 2016, **36**(2): 377-386.
Wang Y H, Zhao Y G, Li L, *et al.* Distribution patterns and spatial variability of vegetation and biocrusts in revegetated lands in different rainfall zones of the Loess Plateau region, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, **36**(2): 377-386.
- [23] 韩红珠. 黄土高原植被物候和净初级生产力(NPP)的关系及其对气候变化的响应[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020.
- [24] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, *et al.* 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017 [J]. Earth System Science Data, 2019, **11**(4): 1931-1946.
- [25] 朱玉果, 杜灵通, 谢应忠, 等. 不同气象插值方法精度评估及对草地 NPP 估算的影响[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(6): 160-167.
Zhu Y G, Du L T, Xie Y Z, *et al.* Evaluation on accuracy of three meteorological interpolation methods and their impacts on grassland NPP estimation [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(6): 160-167.
- [26] Mu H W, Li X C, Wen Y N, *et al.* A global record of annual terrestrial human footprint dataset from 2000 to 2018 [J]. Scientific Data, 2022, **9**(1), doi: 10.1038/s41597-022-01284-8.
- [27] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, *et al.* Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2009, **51**(5): 521-526.
- [28] 张梅, 黄贤金, 揣小伟, 等. 中国净生态系统生产力空间分布及变化趋势研究[J]. 地理与地理信息科学, 2020, **36**(2): 69-74.
Zhang M, Huang X J, Chuai X W, *et al.* Spatial distribution and changing trends of net ecosystem productivity in China [J]. Geography and Geo-Information Science, 2020, **36**(2): 69-74.
- [29] 谢薇, 陈书涛, 胡正华. 中国陆地生态系统土壤异养呼吸变异的影响因素[J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 334-340.
Xie W, Chen S T, Hu Z H. Factors influencing the variability in soil heterotrophic respiration from terrestrial ecosystem in China [J]. Environmental Science, 2014, **35**(1): 334-340.
- [30] 王菲, 曹永强, 周姝含, 等. 黄河流域生态功能区植被碳汇估算及其气候影响要素[J]. 生态学报, 2023, **43**(6): 2501-2514.
Wang F, Cao Y Q, Zhou S H, *et al.* Estimation of vegetation carbon sink in the Yellow River Basin ecological function area and analysis of its main meteorological elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(6): 2501-2514.
- [31] 冶晓娟, 王永辉, 潘红忠, 等. 青海省植被 NEP 时空变化及驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2022, **39**(5): 1673-1683.
Ye X J, Wang Y H, Pan H Z, *et al.* Spatial-temporal variation and driving factors of vegetation net ecosystem productivity in Qinghai Province [J]. Arid Zone Research, 2022, **39**(5): 1673-1683.
- [32] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators, 2016, **67**: 250-256.
- [33] 韩玉, 丁素婷, 杨太保. 山西南部中条山生态系统碳储量时空分布及驱动因素[J]. 中国环境科学, 2023, **43**(3): 1298-1306.
Han Y, Ding S T, Yang T B. Spatial and temporal distribution and driving factors of carbon storage in Zhongtiao Mountain ecosystem in southern Shanxi Province [J]. China Environmental Science, 2023, **43**(3): 1298-1306.
- [34] 杨艳, 周德成, 宫兆宁, 等. 基于植被生产力的黄土高原地区生态脆弱性及其控制因子分析[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(10): 1951-1958.
Yang Y, Zhou D C, Gong Z N, *et al.* Ecological vulnerability and its drivers of the Loess Plateau based on vegetation productivity [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(10): 1951-1958.
- [35] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 等. 黄土高原生态工程的生态成效[J]. 中国科学院院刊, 2017, **32**(1): 11-19.
Liu G B, Shanguan Z P, Yao W Y, *et al.* Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, **32**(1): 11-19.
- [36] 王逸男, 孔祥兵, 赵春敬, 等. 2000-2020年黄土高原植被覆盖度时空格局变化分析[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(3): 130-137.
Wang Y N, Kong X B, Zhao C J, *et al.* Change of vegetation coverage in the Loess Plateau from 2000 to 2020 and its spatiotemporal pattern analysis [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, **36**(3): 130-137.
- [37] Fan X Y, Gao P, Tian B Q, *et al.* Spatio-temporal patterns of NDVI and its influencing factors based on the ESTARFM in the Loess Plateau of China [J]. Remote Sensing, 2023, **15**(10), doi: 10.3390/rs15102553.
- [38] 杨阳, 张萍萍, 吴凡, 等. 黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策[J]. 生态学报, 2023, **43**(21): 9071-9081.
Yang Y, Zhang P P, Wu F, *et al.* The significance and countermeasures of vegetation construction on the Loess Plateau to carbon neutrality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **43**(21): 9071-9081.
- [39] 张佑铭, 郎梦凡, 刘梦云, 等. 土地利用转变与海拔高度协同作用黄土高原植被固碳变化特征[J]. 生态学报, 2022, **42**(10): 3897-3908.
Zhang Y M, Lang M F, Liu M Y, *et al.* Vegetation carbon sequestration in the Loess Plateau under the synergistic effects of land cover change and elevations [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(10): 3897-3908.
- [40] 何亮. 黄土高原植被覆盖变化特征及驱动力分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
He L. Analysis on the variation characteristics and driving forces of vegetation cover in the Loess Plateau [D]. Hohhot: Inner Mongolia

- Agricultural University, 2021.
- [41] 沙小燕, 李魁, 王文龙, 等. 黄土高原沟壑区草地沟头立壁土壤抗冲性特征[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(1): 133-140.
Sha X Y, Li K, Wang W L, *et al.* Characteristics of soil anti-scourability in gully head wall of grass-covering on the gullied Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(1): 133-140.
- [42] 姚楠, 刘广全, 姚顺波, 等. 基于 InVEST 模型的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草工程对生态系统碳储量的影响评估[J]. 水土保持通报, 2022, **42**(5): 329-336.
Yao N, Liu G Q, Yao S B, *et al.* Evaluating on effect of conversion from farmland to forest and grassland porject on ecosystem carbon storage in loess hilly-gully region based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, **42**(5): 329-336.
- [43] 姜亚东, 刘鑫, 郑颖, 等. 内蒙古草地资源退化现状及生态修复探索[J]. 草原与草业, 2023, **35**(1): 57-61.
Jiang Y D, Liu X, Zheng Y, *et al.* Degradation status of grassland resources and exploration of ecological restoration in Inner Mongolia [J]. Grassland and Prataculture, 2023, **35**(1): 57-61.
- [44] 王岳, 刘学敏, 哈斯额尔敦. 荒漠化治理“经济-生态-社会”效益耦合协调度时空分异及其驱动因素——以毛乌素沙地为例[J]. 资源科学, 2022, **44**(6): 1224-1237.
Wang Y, Liu X M, Hasi E E D. Spatiotemporal differentiation and driving factors of coupling coordination degree of economic-ecological-social benefits from desertification control in the Mu Us Sandy Land[J]. Resources Science, 2022, **44**(6): 1224-1237.
- [45] 庄少豪. 黄土高原生态系统服务功能对植被恢复的响应关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Zhuang S H. Study on the response relationship of ecosystem service funtion of Loess Plateau to vegetation restortion [D]. Xian: Xi'an University of Technology, 2020.
- [46] 王麒翔, 范晓辉, 王孟本. 近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征[J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5512-5523.
Wang Q X, Fan X H, Wang M B. Precipitation trends during 1961—2010 in the Loess Plateau region of China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(19): 5512-5523.
- [47] Chen H, Zhu Q A, Peng C H, *et al.* The impacts of climate change and human activities on biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 2013, **19**(10): 2940-2955.
- [48] Gottfried M, Pauli H, Futschik A, *et al.* Continent-wide response of mountain vegetation to climate change [J]. Nature Climate Change, 2012, **2**(2): 111-115.
- [49] 张赫, 彭千芮, 王睿, 等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, **40**(24): 8988-8998.
Zhang H, Peng Q R, Wang R, *et al.* Spatiotemporal patterns and factors influencing county carbon sinks in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(24): 8988-8998.



CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)