

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征

陈其永, 郜允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年9月

第43卷 第9期
Vol.43 No.9

目次

2000~2018年我国大气重金属沉降通量时空变化特征	陈其永, 郇允兵, 倪润祥, 潘瑜春, 阎跃观, 杨晶, 刘孝阳, 顾晓鹤(4413)
面向二/三维城市形态指标的PM _{2.5} 浓度调控模拟	李莎, 邹滨, 刘宁, 冯徽徽, 陈军, 张鸿辉(4425)
减排背景下成都大气PM _{2.5} 碳质组分特征	陈璐瑶, 于阳春, 黄小娟, 董贵明, 张军科(4438)
青岛秋冬季PM ₁ 中金属元素污染特征及健康风险评估	刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 马子轸, 陶文鑫, 王娇, 薛莲, 彭倩倩, 杜金花, 赵娇娇, 彭亮, 孙英杰(4448)
港口地区大气PM _{2.5} 中多环芳烃污染特征及来源分析	王鹏程, 杨凌霄, 别淑君, 黄琦, 齐安安, 虞雄, 王滢铭, 徐鹏, 张天琪, 王文兴(4458)
天津市冬季道路颗粒物粒径分布及来源解析	张国涛, 殷宝辉, 白雯宇, 郭丽瑶, 王智宇, 张楠, 郑镇森, 张利文, 杨文, 韩斌, 白志鹏(4467)
北京市生物源一次气溶胶浓度变化特征及影响因素	梁林林, 刘畅, 刘旭艳, 徐婉筠, 张根, 程红兵, 刘雨思(4475)
北京市城区夏季VOCs变化特征分析与来源解析	孟祥来, 孙扬, 廖婷婷, 张琛, 张成影(4484)
东莞工业集中区夏季臭氧污染与非污染期间VOCs组分特征及其来源	周振, 肖林海, 费蕾蕾, 余纬, 林满, 黄筠筠, 张智胜, 陶俊(4497)
生活垃圾填埋场恶臭污染的时空变化与膜阻隔效果	何品晶, 李健晨, 吕凡, 章骅, 邵立明(4506)
不同年份太湖水域全氟化合物健康风险源解析对比	武婷, 孙善伟, 樊境朴, 鲁富蕾, 郭昌胜, 徐建(4513)
沱江流域典型及新兴全氟/多氟化合物的污染特征及来源解析	宋娇娇, 汪艺梅, 孙静, 方淑红(4522)
白洋淀不同类型水体表层沉积物重金属的赋存形态及风险	许梦雅, 张超, 单保庆, 刘操(4532)
喹诺酮类抗生素在城市典型水环境中的分配系数及其主要环境影响因子	剧泽佳, 付雨, 赵鑫宇, 陈慧, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4543)
石家庄地下水中喹诺酮类抗生素生态风险及其与环境因子的相关性	陈慧, 剧泽佳, 赵鑫宇, 付雨, 崔建升, 张璐璐(4556)
不同淹水环境下湖泊沉积物DOM的特征与来源	陈佳, 李忠武, 金昌盛, 文佳骏, 聂小东, 王磊(4566)
晋城市沁河流域秋季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	高梦蝶, 李艳粉, 李艳利, 孙昂, 田爽, 张春晖, 耿亚平, 李林霞(4576)
不同配置绿色屋顶径流水质特征及综合评价	章孙逊, 张守红, 闫婧, 王任重远, 杨航(4587)
紫外光化过硫酸盐降解磷酸氯喹	李阳, 许玻琨, 邓琳, 罗伟(4597)
微气泡臭氧氧化预处理实际制药废水去除SS和有机物性能	刘春, 陈蕊, 张静, 杨旭, 陈晓轩, 郭延凯, 武明泽, 庞勃(4608)
废水排放对近海环境中抗生素抗性基因和微生物群落的影响	陈嘉瑜, 苏志国, 姚鹏城, 黄备, 张永明, 温东辉(4616)
生物炭和秸秆还田对微咸水滴灌棉田土壤真菌群落结构多样性的影响	郭晓雯, 陈静, 鲁晓宇, 李远, 陶一凡, 闵伟(4625)
有机物料投入对喀斯特地区土壤磷素赋存形态与含 $phoD$ 基因细菌群落的影响	夏鑫, 乔航, 孙琪, 刘坤平, 陈香碧, 何寻阳, 胡亚军, 苏以荣(4636)
煤矿矿区复垦植被类型对土壤微生物功能基因和酶活的影响	宁岳伟, 刘勇, 张红, 李君剑(4647)
生物炭施用对黄壤土壤养分及酶活性的影响	袁访, 李开钰, 杨慧, 邓承佳, 梁红, 宋理洪(4655)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤细菌群落多样性变化	孙华方, 李希来, 金立群, 赵玉蓉, 李成一, 张静, 宋梓涵, 苏晓雪, 刘凯(4662)
模拟氮沉降对三江平原小叶章湿地土壤微生物碳源利用能力的影响	翁晓虹, 隋心, 李梦莎, 刘赢男, 张荣涛, 杨立宾(4674)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素空间分布特征及其与微生物群落相关性	赵鑫宇, 剧泽佳, 陈慧, 付雨, 宋圆梦, 赵波, 张纪媛, 卢梦洪, 崔建升, 张璐璐(4684)
典型氧化还原环境中微塑料表面的微生物群落组成特征与构建机制	龚志伟, 马杰, 苏趋, 林亚楠, 董鑫磊, 周立昌, 王宗平, 郭刚(4697)
作物秸秆材料处理养殖废水中氮的周年去除效果及其对氮循环微生物丰度的影响	刘铭羽, 夏梦华, 蒋磊, 彭健, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 孟岑, 曾睿, 王栋, 李裕元, 吴金水(4706)
不同外碳源对尾水极限脱氮性能及微生物群落结构的影响	王伟, 赵中原, 张鑫, 由志鹏, 黄子晋, 彭永臻(4717)
总氮提标改造工程的微生物群落结构分析	李海松, 王柯丹, 陈晓蕾, 阎登科, 许子聪, 胡培基(4727)
IFAS工艺处理南方低碳源污水的泥膜微生物互作规律分析	赫俊国, 江伟勋, 何卓义, 刘新平, 吴世华, 储昭瑞, 冯杰(4736)
黄土高原土地利用方式对微塑料丰度和形态分布的影响	郝永丽, 胡亚鲜, 白晓雄, 郭胜利(4748)
南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价	王玉, 辛存林, 于爽, 薛红蕾, 曾鹏, 孙平安, 刘凡(4756)
兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析	张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(4767)
石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 郑国砥, 陈同斌, 刘杰(4779)
典型城市土壤中重金属锑(Sb)的含量分布特征及风险评价	沈城, 叶文娟, 钱诗颖, 吴健, 朱旭东, 王敏(4791)
有色金属矿业城市典型村镇土壤重金属污染评价及来源解析	汪峰, 黄言欢, 李如忠, 吴鸿飞(4800)
柠檬酸及刈割强化象草修复镉污染土壤的效应	唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 周航, 曾鹏, 廖柏寒(4810)
稻田干湿过程甲基化效率变化与关键影响因素分析	张玥, 李令仪, 文炯, 曾希柏, 苏世鸣(4820)
外源茉莉酸对水稻幼苗根系砷积累及抗逆应答效应	李颜, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠(4831)
秸秆还田配施化肥对土壤养分及冬小麦产量的影响	宋佳杰, 徐郁阳, 白金泽, 于琦, 程伯豪, 冯永忠, 任广鑫(4839)
冬季绿肥对黄土高原旱作春玉米农田土壤温室气体排放的影响	张少宏, 王俊, 方震文, 付鑫(4848)
庞泉沟自然保护区土壤呼吸空间分异性影响因素探测	李晓敏, 严俊霞, 杜自强, 王琰(4858)
小型养殖塘水体中CH ₄ 、CO ₂ 和N ₂ O浓度的时空变化特征及影响因素	石婕, 张弥, 邱吉丽, 万梓文, 赵若男, 谢燕红, 陈明健, 赵佳玉, 肖薇, 刘寿东(4867)
丁基黄药对选矿区土壤吸附铅镉的影响	胡志浩, 郭朝晖, 冉洪珍, 肖细元, 彭驰, 李钰滢(4878)
秸秆生物炭吸附对乙酰氨基酚的机制及其位能分布特征	商岑尧, 顾若婷, 张强, 谢慧芳, 王冰玉(4888)
黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析	张良侠, 樊江文, 张海燕, 周德成(4902)
植物促生菌在重金属生物修复中的作用机制及应用	马莹, 王玥, 石孝均, 陈新平, 李振轮(4911)
《环境科学》征订启事(4512)	《环境科学》征稿简则(4735)
信息(4696, 4790, 4887)	

黄土高原地区生态脆弱性时空变化及其驱动因子分析

张良侠¹, 樊江文², 张海燕², 周德成^{1*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 黄土高原是我国生态系统最脆弱的地区之一, 科学评估其生态脆弱性是制定有效环境保护和管理措施的前提。然而, 过去研究多关注某一小区域的生态脆弱性, 不能反映该地区生态脆弱性的整体特征。基于“暴露-敏感性-适应力”模型框架, 结合层次分析、空间主成分分析和地理探测器等方法评估了黄土高原地区 2000~2015 年生态脆弱性的时空变化特征及其驱动因子。结果表明, 黄土高原地区生态脆弱性整体较高, 并呈现出从东南到西北递增的趋势, 且不同土地利用类型脆弱性差异大; 2000~2015 年生态脆弱性呈先增后降趋势, 整体呈微弱降低趋势, 其中约 64% 地区的脆弱性发生了变化; 植被覆盖度和降水是控制生态脆弱性时空变化的主要因子, 且所有指标因子间均存在明显的交互作用。说明气候变化和人类活动可能有助于降低黄土高原地区的生态脆弱性, 但其作用有限。

关键词: 生态脆弱性; 时空变化; 空间主成分分析; 地理探测器; 黄土高原

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)09-4902-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110220

Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau

ZHANG Liang-xia¹, FAN Jiang-wen², ZHANG Hai-yan², ZHOU De-cheng^{1*}

(1. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The Loess Plateau is one of the most eco-fragile regions in China, and therefore the scientific evaluation of its ecological vulnerability provides a premise for the effective implication of ecological protection and management practices. However, previous studies have mainly focused on the ecological vulnerability in a small region, which cannot reflect the overall picture of the ecological vulnerability in the Loess Plateau. Based on the “exposure-sensitivity-adaptation” framework, this study investigated the spatial-temporal patterns and their driving forces of the ecological vulnerability in the Loess Plateau from 2000 to 2015 through a combined use of the analytic hierarchy process, spatial principal component analysis, and Geodetector analysis. The results showed that the ecological vulnerability was overall at a moderate to high level, and the vulnerability was clearly higher in the northwestern part of the Loess Plateau than that in the southeastern counterparts. Additionally, the ecological vulnerability differed greatly by land use type. The ecological vulnerability decreased after an increase from 2000 to 2015 and in general decreased slightly throughout the study period. Therein, approximately 64% of the total land area experienced an upward or downward trend in the vulnerability. Vegetation coverage and precipitation were the two main factors contributing to the spatial-temporal variability in the ecological vulnerability, and there were significant interactions among all the used indicators. This study suggests that climate change and human activities may help reduce the ecological vulnerability over the Loess Plateau, although their contributions are limited.

Key words: ecological vulnerability; spatial-temporal variations; spatial principal component analysis; Geodetector; Loess Plateau

快速加剧的气候变化和人类活动已大幅改变区域和全球生态环境^[1]。毁林、土壤退化、荒漠化和生物多样性损失等已成为当今世界面临的最重要环境问题, 严重威胁生态系统服务的提供, 特别是在生态脆弱地区。综合评估环境变化是制定可持续发展计划和采取有效环境保护和管理措施的前提^[2]。生态脆弱性作为生态系统的一种特殊属性, 能综合反映一个生态系统在面对外来干扰的不利影响时, 却没有能力抵抗不利影响的程度以及生态环境遭受影响的破坏风险, 因此成为近年来国内外研究的热点^[3~7]。为了评估生态脆弱性, 已有研究基于不同原理和目的发展了一系列评估模型框架, 包括“压力-敏感性-恢复力”^[8]、“暴露-敏感性-适应力”^[9~12]、“抵抗力-暴露-敏感性”和“压力-状态-响应”^[13~15]等。虽然目前尚缺乏统一的评估模型, 但这些研究均强调了生态脆弱性的极大

空间异质性和从区域尺度发展因地制宜评估指标体系的重要性^[3]。

黄土高原作为我国生态系统最脆弱的地区之一, 在气候变化(如干旱)和人类活动的(如过度开垦和放牧)影响下, 其生态系统严重退化(特别是水土流失), 已经威胁区域的可持续发展^[16, 17]。为了改善该地区的生态环境状况, 我国自 1999 年开始实施了大规模生态恢复工程。有研究表明, 生态工程的实施极大提高了该地区植被的覆盖度和碳吸收能力^[18], 但是否能够降低其生态系统的脆弱性尚不清楚。少数研究虽然评估了黄土高原区域内不同地区

收稿日期: 2021-10-28; 修订日期: 2022-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971276, 41601196); 国家重点研发计划项目(2021YFB2600102, 2017YFA0604804); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23060405); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0608)

作者简介: 张良侠(1986~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为典型生态脆弱区生态系统综合评估, E-mail: zhanglx@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhoudc@nuist.edu.cn

的脆弱性,但所采用的的指标体系、评估模型和空间尺度等均不同,且结果存在一定分歧,不能有效反映黄土高原地区生态脆弱性的整体变化趋势。例如,Hou 等^[19]的研究基于土地利用、降雨和人口等 12 个因子,从县级尺度评估了陕西北部生态脆弱性的变化,结果发现过去 15 年生态脆弱性逐渐降低;陈佳等^[20]的研究基于“暴露-敏感性-适应力”模型,从像元尺度评估了榆林市社会-生态系统的脆弱性,结果发现 2000~2011 年间脆弱性明显降低,但空间差异大;傅微等^[21]的研究从景观的角度评估了陕北黄土高原的生态风险,结果发现研究区的景观生态风险在 2000~2015 年期间整体以增加趋势为主;Li 等^[22]的研究从乡村尺度评估了山西省静乐县的生态脆弱性,结果发现 2005~2015 年研究区高度脆弱区的面积出现减少态势。因此,亟需采用统一的评估模型和指标体系,对整个黄土高原区生态脆弱性的时空变化特征进行评估。

本文以黄土高原为研究区,基于“暴露-敏感性-适应力”模型框架,采用指示气候、水土流失、土地利用、生态环境和社会经济等状况的 13 个指标因子,结合层次分析、空间主成分分析和地理探测器等方法系统评估了黄土高原地区的生态脆弱性。本

文通过揭示黄土高原地区生态脆弱性空间分布特征,及其控制因子和 2000~2015 年黄土高原生态脆弱性的变化趋势、空间分布及其驱动因子,以期为进一步的区域生态系统保护和管理提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(33°43′~41°16′N, 100°54′~114°33′E)位于我国黄河流域中部,跨青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南这 7 省,总面积约 64 万 km²[图 1(a)]。区域内地势西北高、东南低,海拔差异超过 3 000 m。该区属暖温带大陆性季风气候,年均气温 3.6~14.3℃,年均降水量 300~800 mm。降水量自西北向东南逐渐增多。土地利用类型以草地为主,面积占比 41.3%,其次是耕地和林地,分别占比 32.1%和 15.2%[图 1(b)]。建设用地和水体仅占研究区总面积的 4.6%,其它均属于未利用土地。该区人口约有 1 亿,且以农业人口居多,属于国家扶贫开发、水土保持和生态治理的重点地区。干旱的气候背景、严重的水土流失和相对落后的经济发展导致该地区生态环境脆弱,属于我国典型的生态脆弱区。

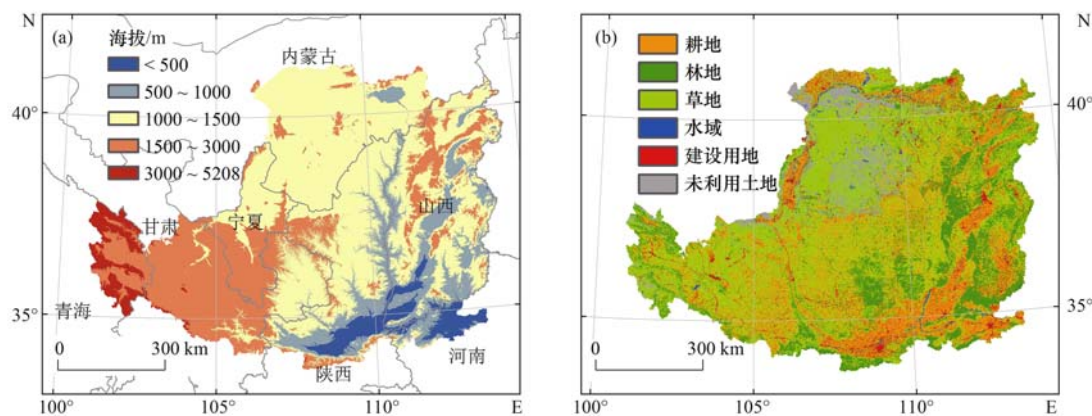


图 1 黄土高原海拔与 2015 年土地利用空间分布示意

Fig. 1 Spatial distributions of the elevation and land use in 2015 in the Loess Plateau

1.2 指标体系构建

本文基于“暴露-敏感性-适应力”的生态脆弱性评价概念框架^[5,11,12,17,20],结合黄土高原地区气候干旱、地形破碎和土壤侵蚀严重等主要生态问题,同时考虑数据的时效性、可获取性和易操作性,最终选取 13 个评价指标(表 1)。其中,暴露代表了生态系统经历外在环境、压力或风险干扰和胁迫的程度,采用气候状况、水土流失和人为干扰来反映。敏感性代表了生态系统容易受到胁迫的正面或负面影响的程度,由生态环境、土地利用和生态系统服务来反映。适应能力指生态系统面对外来不利影响时

的内在自我调节能力或外界干预下的恢复潜力,由经济和社会发展指标来反映。各具体指标的生态学意义详见表 1。依据各指标对黄土高原区生态脆弱性的影响,将评价指标分为正相关指标和负相关指标。

1.3 数据来源与预处理

本文采用的数据包括气象、遥感、社会经济和其他数据,数据来源和预处理如下。

1.3.1 气象数据

气象数据主要有 2000、2005 和 2015 年日均气温、月均相对湿度和年降水量,基于研究区及其周

表 1 黄土高原生态脆弱性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecological vulnerability in the Loess Plateau

准则层	指标层	指标项	生态学意义	指标性质 ¹⁾
暴露	气候状况	年降水量(X1)	气候的湿润程度	负
		湿润度指数(X2)	气候的湿润程度	负
		大于 10℃ 积温(X3)	地表植被的生长发育进程	负
	水土流失	水蚀模数(X4)	土壤侵蚀状况	正
		风蚀模数(X5)	土壤侵蚀状况	正
	人为干扰	人口密度(X6)	人口作用于土地和水资源的压力	正
敏感性	生态环境	年最大 NDVI(X7)	地表植被覆盖状况	负
		坡度(X8)	地形地貌状况	正
		起伏度(X9)	地形地貌状况	正
	土地利用	香农多样性指数(X10)	景观异质性	负
	生态系统服务	水源涵养量(X11)	地表植被削弱降雨侵蚀力和改善土壤结构等作用	负
适应力	经济发展	人均 GDP(X12)	该地区的经济发展水平(其值越高,人们应对风险的能力越强)	负
	社会发展	公路密度(X13)	该地区与市场及其他地方接触的能力(其值越高,越有利于农牧产品的运输以及旅游业的发展)	负

1) “正”表示指标与生态脆弱性呈正相关,“负”表示指标与生态脆弱性呈负相关

围 148 个气象站点的观测数据(由国家气象局网站 <http://data.cma.cn/> 下载获取),利用 ANUSPLIN 插值软件,结合数字高程模型(数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM),经过空间插值获取得到.湿润度指数采用伊万诺夫湿润度计算公式,由年降水量与年蒸发力的比值计算得到^[23].

1.3.2 遥感数据

遥感数据主要为归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI),该数据由美国地质调查局网站(<https://lpdaac.usgs.gov>)提供的 MODIS 16d 合成产品(MOD13A2)获取,空间分辨率为 1 km.年最大 NDVI 采用最大值合成法(maximum value composite syntheses, MVC)提取得到.

1.3.3 社会经济数据

社会经济数据包括 GDP、人口密度和道路空间分布,其中 GDP 和人口密度(空间分辨率为 1 km)由中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)下载获取,道路分布数据通过对 2000 年、2005 年和 2015 年中国交通地图册^[24~26]的矢量化获取得到.

1.3.4 其他数据

其他数据包括水蚀模数、风蚀模数、水源涵养量、香农多样性指数、坡度和起伏度.水蚀模数采用修正的通用土壤流失方程(RUSLE)估算^[27,28].风蚀模数由修正风蚀方程(RWEQ)估算^[29,30].水源涵养量采用降水贮存量法,基于降水量和植被覆盖度计算得到^[31].香农多样性指数基于研究区 2000 年、2005 年和 2015 年土地利用数据,利用 Fragstats 4.2 软件计算得到,其中土地利用数据由中国科学院资源环境科学数据中心获取(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 1 km.坡度和起伏度由数字高

程模型计算得到.

1.4 生态脆弱性模型构建

1.4.1 生态脆弱性指标数据标准化

为了消除各指标数据量纲不一致的影响,本研究采用极差标准化方法^[13,19]对所有脆弱性评价指标原始数据进行标准化处理.考虑到脆弱性评价正负相关指标对生态脆弱性影响作用不同,采取了不同的标准化处理方法,具体计算公式如下:

正相关指标:

$$X_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (1)$$

负相关指标:

$$X_i = (I_{\max} - I_i) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (2)$$

式中, I_i 和 X_i 分别表示某一评价指标原始和标准化后数据; $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 表示该评价指标的最小和最大值. X_i 值越大,说明该指标对生态脆弱性影响越显著,反之则越小.

1.4.2 生态脆弱性评估模型构建

目前定义各指标因子权重主要分为主观(如层次分析法)^[2,14,32,33]和客观(主成分分析)^[15,19,34]两种方法,前者结果受专家的主观判断影响极大,而后者往往会高估人类因子的权重.因此本文采用层次分析和空间主成分分析相结合的方法定义各因子的权重.首先,利用层次分析法对生态脆弱性评价准则层(暴露、敏感性和适应力)进行权重赋值.本文参考已有研究^[35,36],结合所选指标,建立了黄土高原生态脆弱性评价准则层的判断矩阵,进而机选得到暴露、敏感性和适应力的相应权重(表 2).每个准则层下的所有指标标准化后的数据均相应地乘以该准则层的权重再进行后续的主成分分析,以实现用较少的综合指标最大限度地保留原来较多变量所反映的信息^[19].本文基于空间主成分分析获取的累计贡献率

大于 85% 的前 4 个主成分结果,计算出研究区生态脆弱性指数(ecological vulnerability index, EVI):

$$EVI = r_1Y_1 + r_2Y_2 + r_3Y_3 + r_4Y_4 \quad (3)$$

式中, Y 和 r 分别表示各主成分及对应的贡献率, EVI 的值越高,生态系统越脆弱.

表 2 黄土高原生态脆弱性评价准则层判断矩阵和权重

Table 2 Judgment matrix and relative weights of the criterion layers for the ecological vulnerability assessment in the Loess Plateau

生态脆弱性	暴露	敏感性	适应力	权重
暴露	1			0.428 6
敏感性	1	1		0.428 6
适应力	1/3	1/3	1	0.142 9

本研究根据 EVI 的数据直方图分布和标准差,结合自然断点分类法,确定黄土高原地区 EVI 分级标准,进而将生态脆弱性划分为微度($EVI < 0.59$)、轻度($0.59 \leq EVI < 0.67$)、中度($0.67 \leq EVI < 0.75$)、重度($0.75 \leq EVI < 0.84$)和极度($EVI \geq 0.84$)这 5 个等级.相比其他分类方法,自然断点分类法能使各个类之间的差异最大化^[37],能更加客观地得到生态脆弱性分级结果^[38].

1.5 驱动因子分析

本文采用地理探测器^[39]分析黄土高原 2000 年、2005 年和 2015 年生态脆弱性空间分布的驱动因子,该方法的主要优势在于可以探测数值型数据和定性数据,并且可以探测两因子的交互作用.地理探测器通过计算 q 统计值识别各单因子对生态脆弱性的影响及不同因子间交互作用的强弱、方向和性质^[39].首先,选取 EVI 作为因变量,选取生态脆弱性的 13 个评价指标作为自变量因子(经标准化处理及乘以权重之后的数据),在 $15\text{ km} \times 15\text{ km}$ 格网尺度,统计 EVI 和各自变量因子平均值.其次,利用自

然断点法将各自变量因子分为 5 级,由数值量转变为类型量.最后,利用地理探测器计算 q 统计值.此外,本文还利用皮尔逊相关系数^[40]和多元逐步线性回归^[41],分析了 2000 ~ 2015 年生态脆弱性变化与主要驱动因子变化的关系.

2 结果与分析

2.1 2000 ~ 2015 年黄土高原生态脆弱性空间分布及其变化特征

整体上,黄土高原区生态系统脆弱性较高,脆弱性等级中度以上的面积占比超过 60%,且空间差异大,呈现出从东南到西北递增的趋势[图 2(a) ~ 2(c)和图 3(a)].微度脆弱和轻度脆弱区主要分布在黄土高原的东南部地区,如渭河和黄河流域构成的河谷平原区以及太行山区.重度和极度脆弱区主要分布在黄土高原的西北区域,如鄂尔多斯高原北部.而且,不同土地利用类型的脆弱性差异较大[图 3(b)].草地和水体的脆弱性以“中度-重度-极度”为主,三者面积占比超过 58%;耕地和建设用地则以“轻度-中度-重度”为主,三者面积占比超过 79%;林地以“微度-轻度-中度”为主,三者面积占比超过 85%;未利用土地则以重度和极度为主,面积占比超过 89%.

2000 ~ 2015 年,黄土高原区整体生态脆弱性呈现先增加再下降趋势,区域平均 EVI 值由 2000 年的 0.72 先增加到 2005 年的 0.76,接着下降到 2015 年的 0.71.但是,不同等级脆弱区占比波动较大.具体而言,微度脆弱区面积先降后增,极度脆弱区面积先增后降,重度脆弱区面积持续下降,而轻度和中度波动较小[图 3(a)].从空间分布来看[图 2(d) ~ 2(f)],

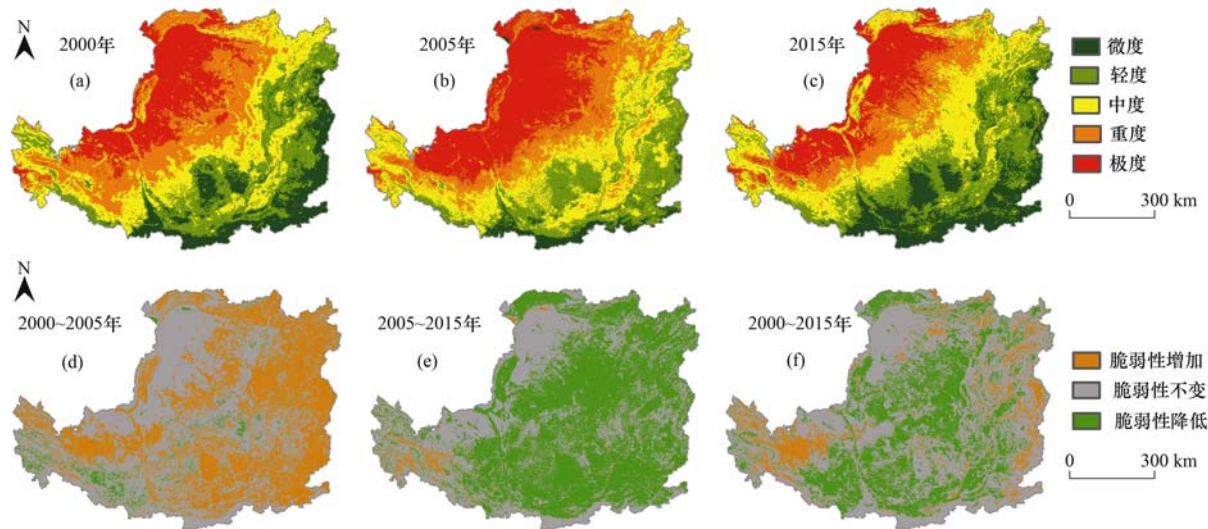
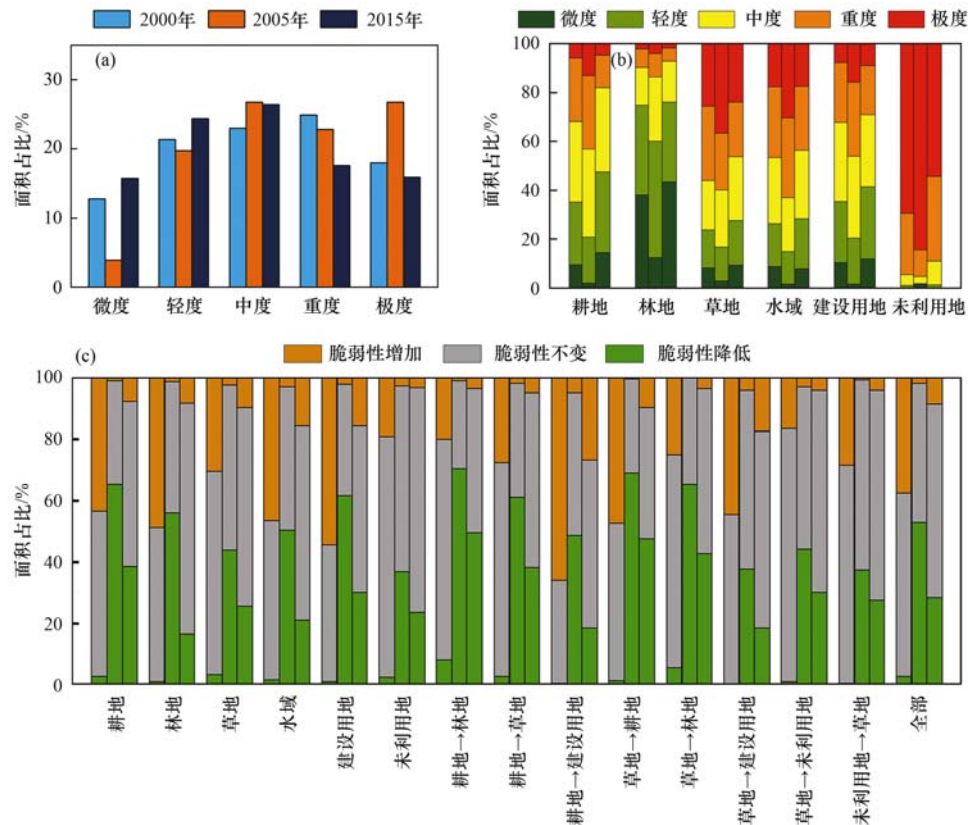


图 2 黄土高原生态脆弱性时空变化特征

Fig. 2 Spatial and temporal variations in the ecological vulnerability in the Loess Plateau

约 36% 地区的脆弱性相对比较稳定,主要分布在鄂尔多斯高原和六盘山山区的西北部与渭河河谷平原区的南部,其它地区的脆弱性变化较频繁. 不同土地利用及其变化类型的脆弱性在 2000 ~ 2015 年均呈先增后降态势,但其脆弱性发生变化的面积占比不同

[图 3(c)]. 其中,耕地、林地和建设用地的脆弱性先增和后减的面积占比均较大,而耕地转换为林地、耕地转换为草地和草地转换为林地的脆弱性先增的面积占比明显小于后降的面积占比. 值得注意的是,生态脆弱性变化大多表现为相邻等级间的转变.



(a) 表示 2000、2005 和 2015 年整个研究区不同脆弱性等级面积占比; (b) 表示 2000 (左柱)、2005 (中柱) 和 2015 年 (右柱) 不同土地利用类型各生态脆弱性等级面积占比; (c) 表示 2000 ~ 2005 (左柱)、2005 ~ 2015 (中柱) 和 2000 ~ 2015 年 (右柱) 不同土地利用变化的生态脆弱性变化趋势

图 3 黄土高原生态脆弱性不同等级与变化趋势面积占比

Fig. 3 Area percentages of the ecological vulnerability in different levels and change trends

2.2 黄土高原生态脆弱性时空变化的驱动因子分析

基于地理探测器的因子探测结果表明,黄土高

原区各指标对生态脆弱性空间分布的影响力较稳定 (表 3). 其中, q 值排名前 3 位的始终为 $NDVI_{max}$ 、年降水量和湿润度指数,且其 q 值(>0.66)远高于

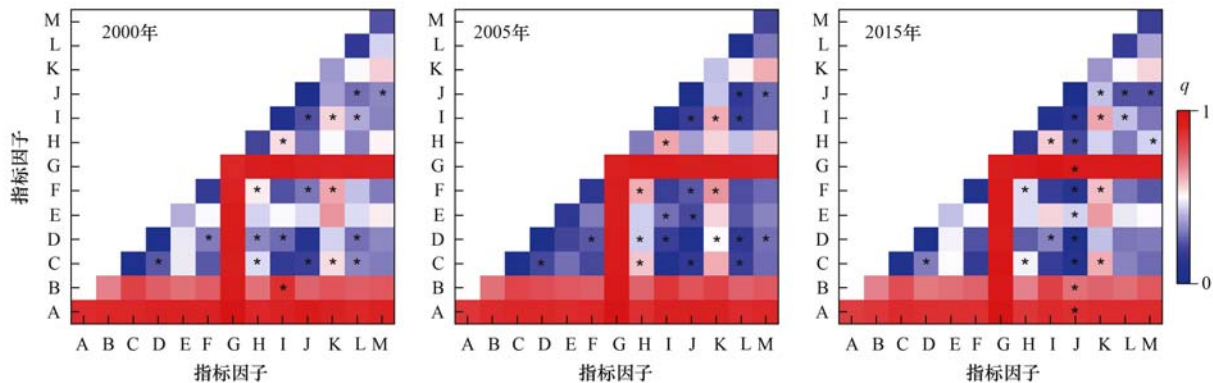
表 3 黄土高原生态脆弱性因子探测 q 值

Table 3 The q values of the factor detection for the ecological vulnerability in the Loess Plateau

指标	2000 年			2005 年			2015 年			2000 ~ 2015 年	
	q	q 排序	P	q	q 排序	P	q	q 排序	P	q 均值	q 均值排序
X1	0.83	2	0.00	0.81	2	0.00	0.79	2	0.00	0.81	2
X2	0.66	3	0.00	0.69	3	0.00	0.66	3	0.00	0.67	3
X3	0.12	11	0.00	0.12	9	0.00	0.14	11	0.00	0.13	11
X4	0.11	12	0.00	0.08	12	0.00	0.12	12	0.00	0.10	12
X5	0.42	4	0.00	0.2	7	0.00	0.43	4	0.00	0.35	5
X6	0.22	8	0.00	0.2	8	0.00	0.17	9	0.00	0.20	8
X7	0.84	1	0.00	0.86	1	0.00	0.87	1	0.00	0.86	1
X8	0.25	7	0.00	0.34	5	0.00	0.21	8	0.00	0.27	6
X9	0.14	10	0.00	0.12	11	0.00	0.16	10	0.00	0.14	10
X10	0.08	13	0.00	0.06	13	0.00	0.01	13	1.00	0.05	13
X11	0.38	5	0.00	0.43	4	0.00	0.37	5	0.00	0.39	4
X12	0.21	9	0.00	0.12	10	0.00	0.23	7	0.00	0.19	9
X13	0.28	6	0.00	0.25	6	0.00	0.24	6	0.00	0.26	7

其他指标. 相对而言,起伏度、大于 10℃ 积温、水蚀模数和香农多样性指数的影响较小, q 值小于 0.14. 而且,不同指标因子之间存在明显的交互作用,主要表现为线性和非线性增强作用(图 4). 其中,NDVI_{max} 和年降水量线性交互作用对黄土高原生态脆弱性具有最强的解释力,2000、2005 和 2015 年的联合解释力分别达 0.93、0.93 和 0.95. 此外,

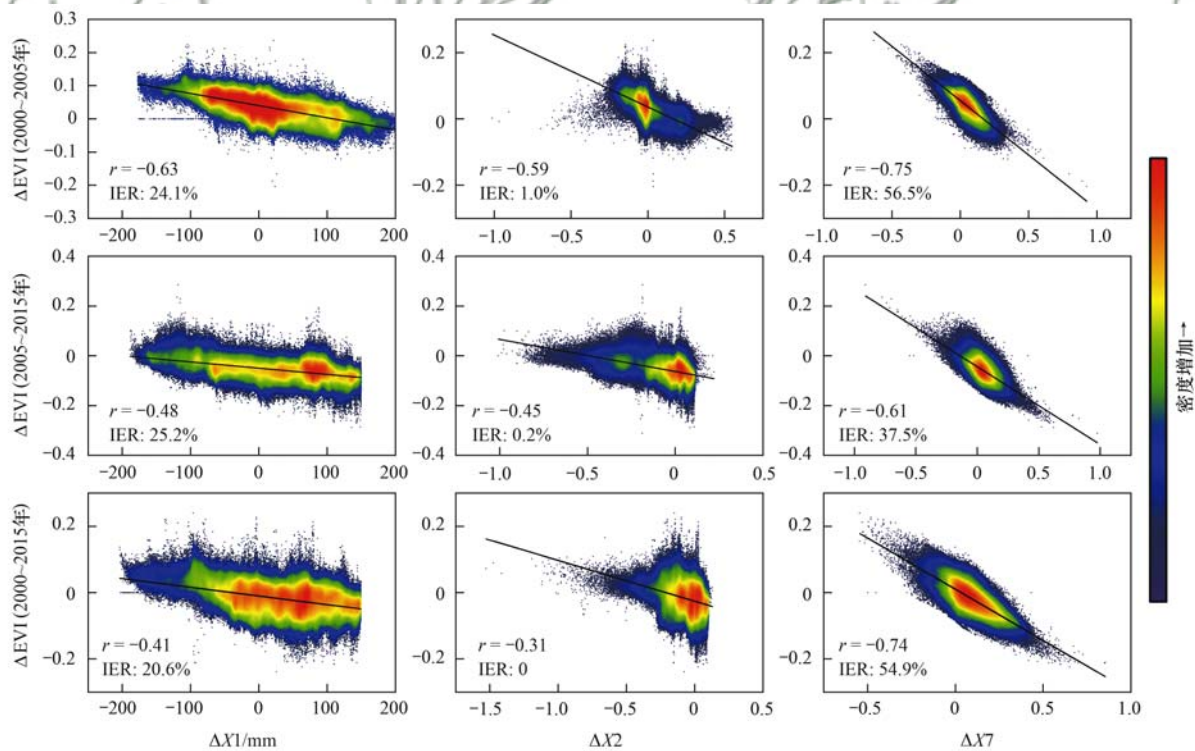
单因子解释力较弱因子与解释力较强因子间多表现为非线性交互作用. 从年际变化来看,黄土高原生态脆弱性变化均主要受植被变化的控制,其独立解释率为 37.5%~56.5%,其次是降水量,二者共同解释率达 62.7%~80.6%(图 5). 有趣的是,湿润度指数对生态脆弱性变化的影响几乎可以忽略,其独立解释率小于 1.0%.



* 表示非线性增强交互作用,其他表示双因子增强交互作用,所有相关关系均在 0.05 水平上显著; A 表示 X1, B 表示 X2, C 表示 X3, D 表示 X4, E 表示 X5, F 表示 X6, G 表示 X7, H 表示 X8, I 表示 X9, J 表示 X10, K 表示 X11, L 表示 X12, M 表示 X13

图 4 黄土高原生态脆弱性空间分布与驱动因子的关系

Fig. 4 Driving forces of the spatial variations in the ecological vulnerability in the Loess Plateau



ΔEVI 表示生态脆弱性指数变化, ΔX1 表示年降水量变化, ΔX2 表示湿润度指数变化, ΔX7 表示年最大 NDVI 变化,

IER 表示基于多元逐步线性回归计算得到的各因子的独立解释率

图 5 黄土高原生态脆弱性时间变异与主要驱动因子的关系

Fig. 5 Driving forces of the temporal variations in the ecological vulnerability in the Loess Plateau

3 讨论

本研究发现黄土高原生态系统整体上处于中高脆弱性水平,这与过去关于黄土高原部分区域的脆

弱性评估结果一致^[19,20,22,35],并与 Zhao 等^[38] 关于全国尺度的评估结果一致. 这主要是因为黄土高原大部分地区属于干旱和半干旱气候,植被条件相对较差,对气候变化极为敏感^[18,42,43]. 但不同区域生态

脆弱性异质性极大,东南大部分地区属于轻度和微度脆弱,这与 Hou 等^[19]在陕西延安的发现一致。此外,本研究发现不同土地利用类型脆弱性差异大,未利用地脆弱性最高,林地脆弱性最低,这与张学渊等^[15]在西北干旱区的观测结果一致。然而本文发现草地的脆弱性整体相对较高,这与张学渊等^[15]的研究结果矛盾。研究尺度和区域差异是导致结果分歧的主要原因,脆弱性的等级通常是基于研究区内脆弱性的相对大小划分,自然导致不同区域和尺度的研究结果可比性较差。这再次强调整体评估黄土高原区域生态脆弱性的重要性。

从时间变化趋势来看,本文结果表明黄土高原地区的生态脆弱性呈降低态势,这与 Hou 等^[19]在陕西延安和 Li 等^[22]在山西省静乐县的评估结果一致,并与 Li 等^[8]在我国北方防风固沙带观测的结果一致。特别是本文发现耕地转换为林草地的脆弱性降低态势明显大于其他土地利用及其变化类型,这说明气候变化和退耕还林还草生态恢复工程促进了研究区生态脆弱性的降低。近年来,黄土高原降水的增加和大规模生态恢复工程的实施,导致植被覆盖度显著增加^[18,42],从而降低生态系统的脆弱性。值得注意的是,本文发现在生态恢复工程实施初期,生态脆弱性呈现微弱增加态势,可能是因为新种植树木尚处于幼苗阶段,加上工程实施过程对地表覆被的破坏作用,致使初期植被覆盖度降低^[44,45]。

从控制因子来看,本文发现植被覆盖度和降雨是控制黄土高原生态系统脆弱性的主要因子,与 Li 等^[22]和陈枫等^[35]的研究结果高度一致。黄土高原处于半湿润区、半干旱区和干旱区的过渡带,植被生长对水分条件更为敏感。年降水量高的区域,如黄土高原区的东南部,植被覆盖好,属于微度和轻度脆弱;而黄土高原的西北部,年降水量较低,植被条件差,容易发生水土流失等一系列环境问题^[16]。

相较于已有研究,本文采用的层次分析、空间主成分分析和地理探测器相结合的方法,能更有效地反映大尺度区域生态脆弱性的时空变化特征以及定量分析各驱动因子对生态脆弱性的贡献率。本文研究结果强调了生态恢复工程在降低生态脆弱性方面的作用,但其效应具有滞后性和局限性,应建立生态恢复的长期机制。然而,本研究仍存在一些不确定性。一方面,受数据限制,本文研究时段相对较短,且没有考虑其他人为活动(如牲畜数量)对生态脆弱性的影响。另一方面,研究区域、尺度和方法差异对研究结果影响可能较大。例如,本文结果与陈佳等^[20]在榆林市所观测到的脆弱性显著下降态势和傅微等^[21]在陕北黄土高原所观测到的脆弱性增加

态势矛盾,且与张学渊等^[15]在西北干旱区所观测到的主要驱动因子(土壤有机质含量和地形是主要因子)不同。未来需加强不同尺度和方法的对比研究,进而识别脆弱性评估的最优尺度和评估指标体系。

4 结论

(1)黄土高原区生态系统脆弱性整体较高,且不同地区和不同土地利用类型脆弱性差异大,主要表现为西北地区明显高于东南地区,草地高于耕地和林地。

(2)2000~2015年黄土高原区生态脆弱性呈先增后降趋势,整体呈微弱降低态势,其中,近2/3地区的脆弱性发生了变化,且不同土地利用及其变化类型的脆弱性变化趋势差异大,耕地转换为林草地和草地转换为林地的脆弱性降低趋势更为明显。

(3)植被覆盖度和降水是控制黄土高原地区生态脆弱性时空变化的主要因子,且所有指标因子之间均存在明显的增强交互作用。

(4)生态恢复工程虽然有助于降低黄土高原地区的生态脆弱性,但其效应具有滞后性和局限性,应建立生态恢复的长期机制。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Nguyen A K, Liou Y A, Li M H, et al. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection[J]. Ecological Indicators, 2016, **69**: 100-117.
- [3] Beroya-Eitner M A. Ecological vulnerability indicators [J]. Ecological Indicators, 2016, **60**: 329-334.
- [4] De Lange H J, Sala S, Vighi M, et al. Ecological vulnerability in risk assessment—a review and perspectives[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(18): 3871-3879.
- [5] 余中元, 李波, 张新时. 社会生态系统及脆弱性驱动机制分析[J]. 生态学报, 2014, **34**(7): 1870-1879.
Yu Z Y, Li B, Zhang X S. Social ecological system and vulnerability driving mechanism analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, **34**(7): 1870-1879.
- [6] 刘宇, 兰双双, 张永祥, 等. 基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4236-4244.
Liu Y, Lan S S, Zhang Y X, et al. Spatio-temporal evolution of groundwater vulnerability based on spatial autocorrelation [J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4236-4244.
- [7] Jin Y, Li A N, Bian J H, et al. Spatiotemporal analysis of ecological vulnerability along Bangladesh-China-India-Myanmar economic corridor through a grid level prototype model [J]. Ecological Indicators, 2021, **120**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106933.
- [8] Li X F, Song L N, Xie Z B, et al. Assessment of ecological vulnerability on northern sand prevention belt of China based on the ecological pressure-sensitivity-resilience model [J]. Sustainability, 2021, **13**, doi: 10.3390/su13116078.

- [9] Li X L, Philp J, Cremades R, *et al.* Agricultural vulnerability over the Chinese Loess Plateau in response to climate change: exposure, sensitivity, and adaptive capacity[J]. *Ambio*, 2016, **45**(3): 350-360.
- [10] 贾元童, 崔晓勇, 刘月仙, 等. 内蒙古自治区干旱脆弱性评价[J]. *生态学报*, 2020, **40**(24): 9070-9082.
Jia Y T, Cui X Y, Liu Y X, *et al.* Drought vulnerability assessment in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(24): 9070-9082.
- [11] Dossou J F, Li X X, Sadek M, *et al.* Hybrid model for ecological vulnerability assessment in Benin[J]. *Scientific Reports*, 2021, **11**(1), doi: 10.1038/s41598-021-81742-2.
- [12] Gupta A K, Negi M, Nandy S, *et al.* Mapping socio-environmental vulnerability to climate change in different altitude zones in the Indian Himalayas[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **109**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105787.
- [13] Xue L Q, Wang J, Zhang L C, *et al.* Spatiotemporal analysis of ecological vulnerability and management in the Tarim River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 876-888.
- [14] Hu X J, Ma C M, Huang P, *et al.* Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection—a case of Weifang City, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **125**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107464.
- [15] 张学渊, 魏伟, 周亮, 等. 西北干旱区生态脆弱性时空演变分析[J]. *生态学报*, 2021, **41**(12): 4707-4719.
Zhang X Y, Wei W, Zhou L, *et al.* Analysis on spatio-temporal evolution of ecological vulnerability in arid areas of Northwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(12): 4707-4719.
- [16] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7398-7409.
Li Z S, Yang L, Wang G L, *et al.* The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: present situations, problems, and counter-solutions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7398-7409.
- [17] 刘晓华, 魏天兴. 高通量测序分析黄土高原退耕还林区土壤细菌群落特征[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4489-4499.
Liu X H, Wei T X. High-throughput sequencing analysis of soil bacterial community in the Grain for Green Project areas of the Loess Plateau[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4489-4499.
- [18] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, *et al.* Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, **209-210**: 87-99.
- [19] Hou K, Li X X, Zhang J. GIS analysis of changes in ecological vulnerability using a SPCA model in the Loess Plateau of northern Shaanxi, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, **12**(4): 4292-4305.
- [20] 陈佳, 杨新军, 尹莎, 等. 基于 VSD 框架的半干旱地区社会——生态系统脆弱性演化与模拟[J]. *地理学报*, 2016, **71**(7): 1172-1188.
Chen J, Yang X J, Yin S, *et al.* The vulnerability evolution and simulation of the social-ecological systems in the semi-arid area based on the VSD framework[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7): 1172-1188.
- [21] 傅微, 吕一河, 傅伯杰, 等. 陕北黄土高原典型人类活动影响下景观生态风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(3): 290-299.
Fu W, Lü Y H, Fu B J, *et al.* Landscape ecological risk assessment under the influence of typical human activities in Loess Plateau, northern Shaanxi[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(3): 290-299.
- [22] Li Q, Shi X Y, Wu Q Q. Effects of protection and restoration on reducing ecological vulnerability[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **761**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143180.
- [23] 中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 全国畜牧兽医总站. 中国草地资源[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
Department of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, National Animal Husbandry and Veterinary Station. Rangeland resources of China[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.
- [24] 广东省地图出版社. 新编中国交通地图册[M]. 广州: 广东省地图出版社, 2001.
- [25] 湖南省地图出版社. 新编中国交通地图册[M]. 长沙: 湖南省地图出版社, 2006.
- [26] 人民交通出版社. 中国交通地图册 2016[M]. 北京: 人民交通出版社, 2016.
- [27] Renard K G, Foster G R, Weesies G A. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)[R]. Washington: United States Government Printing, 1997.
- [28] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, *et al.* Changes in multiple ecosystem services between 2000 and 2013 and their driving factors in the Grazing Withdrawal Program, China[J]. *Ecological Engineering*, 2018, **116**, doi: 10.1016/j.ecoleng.2018.02.028.
- [29] Fryrear D W, Bilbro J D, Saleh A, *et al.* RWEQ: improved wind erosion technology[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, **55**(2): 183-189.
- [30] Zhang H Y, Fan J W, Cao W, *et al.* Response of wind erosion dynamics to climate change and human activity in Inner Mongolia, China during 1990 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **639**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.082.
- [31] 赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. *生态学报*, 2004, **24**(6): 1101-1110.
Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, *et al.* Ecosystem services and their valuation of China grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(6): 1101-1110.
- [32] Wang X D, Zhong X H, Liu S Z, *et al.* Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan Plateau: Development and application of a new method[J]. *Journal of Arid Environments*, 2008, **72**(10): 1929-1939.
- [33] Hou K, Tao W D, Wang L M, *et al.* Study on hierarchical transformation mechanisms of regional ecological vulnerability and its applicability[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **114**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106343.
- [34] Xia M, Jia K, Zhao W W, *et al.* Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **123**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.107274.
- [35] 陈枫, 李泽红, 董锁成, 等. 基于 VSD 模型的黄土高原丘陵沟壑区县域生态脆弱性评价——以甘肃省临洮县为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, **32**(11): 74-80.
Chen F, Li Z H, Dong S C, *et al.* Evaluation of ecological vulnerability in gully-hilly region of Loess Plateau based on VSD model—A case of Lintao county[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, **32**(11): 74-80.

- [36] 周梦云, 蔡永立, 张瑞峰, 等. 宁夏贺兰山国家级自然保护区建立前后区域生态脆弱性时空格局变化研究[J]. 生态科学, 2019, **38**(5): 78-85.
- Zhou M Y, Cai Y L, Zhang R F, *et al.* The tempo-spatial pattern of regional ecological vulnerability before and after the establishment of National Nature Reserve in Helan Mountain of Ningxia[J]. Ecological Science, 2019, **38**(5): 78-85.
- [37] Liu D, Cao C X, Dubovyk O, *et al.* Using fuzzy analytic hierarchy process for spatio-temporal analysis of eco-environmental vulnerability change during 1990- 2010 in Sanjiangyuan region, China [J]. Ecological Indicators, 2017, **73**: 612-625.
- [38] Zhao J C, Ji G X, Tian Y, *et al.* Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method [J]. Ecological Indicators, 2018, **91**: 410-422.
- [39] 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.
- [40] Zhou M G, Huang Y G, Li G L. Changes in the concentration of air pollutants before and after the COVID-19 blockade period and their correlation with vegetation coverage [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, **28**(18): 23405-23419.
- [41] Sun Z H, Mao Z, Yang L Y, *et al.* Impacts of climate change and afforestation on vegetation dynamic in the Mu Us Desert, China[J]. Ecological Indicators, 2021, **129**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108020.
- [42] 史晓亮, 王馨爽. 黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应[J]. 水土保持研究, 2018, **25**(4): 189-194.
- Shi X L, Wang X S. Spatial and temporal variation of vegetation coverage and its response to climate change in the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, **25**(4): 189-194.
- [43] 韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 等. 黄土高原地区两种土地利用方式 CO₂ 和 N₂O 排放特征 [J]. 环境科学, 2019, **40**(11): 5164-5172.
- Han J L, Hao S, Liu Z J, *et al.* Characteristics of CO₂ and N₂O emissions under two land use types in the Loess Plateau of China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(11): 5164-5172.
- [44] Zhou D C, Zhao S Q, Liu S G, *et al.* Modeling the effects of the sloping land conversion program on terrestrial ecosystem carbon dynamics in the Loess Plateau: a case study with Ansai County, Shaanxi province, China[J]. Ecological Modelling, 2014, **288**: 47-54.
- [45] Zhou D C, Zhao S Q, Zhu C. The Grain for Green Project induced land cover change in the Loess Plateau: a case study with Ansai county, Shanxi province, China [J]. Ecological Indicators, 2012, **23**: 88-94.

CONTENTS

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Heavy Metal in Atmospheric Deposition in China from 2000 to 2018	CHEN Qi-yong, GAO Yun-bing, NI Run-xiang, <i>et al.</i> (4413)
Simulation of PM _{2.5} Concentration Based on Optimized Indexes of 2D/3D Urban Form	LI Sha, ZOU Bin, LIU Ning, <i>et al.</i> (4425)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengdu Under the Background of Emission Reduction	CHEN Lu-yao, YU Yang-chun, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (4438)
Characteristics and Health Risk Assessment of Trace Elements in Atmospheric PM ₁ During Autumn and Winter in Qingdao	LIU Zi-yang, ZHANG Yi-sheng, ZHANG Hou-yong, <i>et al.</i> (4448)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric PM _{2.5} -bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Port Area	WANG Peng-cheng, YANG Ling-xiao, BIE Shu-jun, <i>et al.</i> (4458)
Size Distribution and Source Apportionment of Road Particles During Winter in Tianjin	ZHANG Guo-tao, YIN Bao-hui, BAI Wen-yu, <i>et al.</i> (4467)
Characteristics and Impact Factors of Number Concentration of Primary Biological Aerosol Particles in Beijing	LIANG Lin-lin, LIU Chang, LIU Xu-yan, <i>et al.</i> (4475)
Characteristic Analysis and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Beijing in Summer	MENG Xiang-lai, SUN Yang, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (4484)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in a Typical Industrial Area in Dongguan During Periods of Ozone and Non-ozone Pollution in Summer	ZHOU Zhen, XIAO Lin-hai, FEI Lei-lei, <i>et al.</i> (4497)
Temporal and Spatial Variation in Odor Pollution and Membrane Barrier Effect in Municipal Solid Waste Landfill	HE Pin-jing, LI Jian-chen, LÜ Fan, <i>et al.</i> (4506)
Comparison of Health Risk from Sources of Perfluoroalkyl Substances in Taihu Lake for Different Years	WU Ting, SUN Shan-wei, FAN Jing-pu, <i>et al.</i> (4513)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Typical and Emerging Per- and Polyfluoroalkylated Substances in Tuojiang River Basin	SONG Jiao-jiao, WANG Yi-mei, SUN Jing, <i>et al.</i> (4522)
Speciation and Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Different Types of Water Bodies in Baiyangdian Lake	XU Meng-ya, ZHANG Chao, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4532)
Distribution Coefficient of QNs in Urban Typical Water and Its Main Environmental Influencing Factors	JU Ze-jia, FU Yu, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4543)
Ecological Risk Assessment of Quinolones Antibiotics and the Correlation Analysis Between QNs and Physical-Chemical Parameters in Groundwater, Shijiazhuang City	CHEN Hui, JU Ze-jia, ZHAO Xin-yu, <i>et al.</i> (4556)
Characteristics and Sources of DOM in Lake Sediments Under Different Inundation Environments	CHEN Jia, LI Zhong-wu, JIN Chang-sheng, <i>et al.</i> (4566)
Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Autumn in Qinhe River Basin of Jincheng Region	GAO Meng-die, LI Yan-fen, LI Yan-li, <i>et al.</i> (4576)
Integrated Assessment of Runoff Quality from Green Roofs with Different Configurations	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, <i>et al.</i> (4587)
Degradation of Chloroquine Phosphate by UV-activated Persulfate	LI Yang, XU Bo-hui, DENG Lin, <i>et al.</i> (4597)
Removal Performance of Suspended Solid (SS) and Organic Compounds in the Pre-treatment of Actual Pharmaceutical Wastewater by Microbubble Ozonation	LIU Chun, CHEN Rui, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (4608)
Effects of Wastewater Discharge on Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in a Coastal Area	CHEN Jia-yu, SU Zhi-guo, YAO Peng-cheng, <i>et al.</i> (4616)
Effects of Biochar and Straw Returning on Soil Fungal Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Brackish Water Irrigation	GUO Xiao-wen, CHEN Jing, LU Xiao-yu, <i>et al.</i> (4625)
Effects of Organic Materials on Phosphorus Fractions and <i>phoD</i> -harboring Bacterial Community in Karst Soil	XIA Xin, QIAO Hang, SUN Qi, <i>et al.</i> (4636)
Effects of Different Vegetation Types on Soil Microbial Functional Genes and Enzyme Activities in Reclaimed Coal Mine	NING Yue-wei, LIU Yong, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (4647)
Effects of Biochar Application on Yellow Soil Nutrients and Enzyme Activities	YUAN Fang, LI Kai-yu, YANG Hui, <i>et al.</i> (4655)
Changes in Soil Bacterial Community Diversity in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Area of the Yellow River	SUN Hua-fang, LI Xi-lai, JIN Li-qun, <i>et al.</i> (4662)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Microbial Carbon Metabolism in <i>Calamagrostis angustifolia</i> Wetland in Sanjiang Plain	WENG Xiao-hong, SUI Xin, LI Meng-sha, <i>et al.</i> (4674)
Spatial Distribution of Quinolone Antibiotics and Its Correlation Relationship with Microbial Community in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, JU Ze-jia, CHEN Hui, <i>et al.</i> (4684)
Composition Characteristics and Construction Mechanism of Microbial Community on Microplastic Surface in Typical Redox Environments	GONG Zhi-wei, MA Jie, SU Qu, <i>et al.</i> (4697)
Annual Nitrogen Removal Efficiency and Change in Abundance of Nitrogen Cycling Microorganisms in Swine Wastewater Treated by Crop Straw Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, JIANG Lei, <i>et al.</i> (4706)
Effects of External Carbon Sources on Ultimate Nitrogen Removal Performance and Microbial Community in Secondary Effluent Treating Process	WANG Wei, ZHAO Zhong-yuan, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4717)
Microbial Community Structure of Activated Sludge for Total Nitrogen Upgrading Project	LI Hai-song, WANG Ke-dan, CHEN Xiao-lei, <i>et al.</i> (4727)
Analysis of Microbial Interaction Law of Mud Membrane in IFAS Process for Treating Low Carbon Source Sewage in South China	HE Jun-guo, JIANG Wei-xun, HE Zhuo-yi, <i>et al.</i> (4736)
Abundances and Morphology Patterns of Microplastics Under Different Land Use Types on the Loess Plateau	HAO Yong-li, HU Ya-xian, BAI Xiao-xiong, <i>et al.</i> (4748)
Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risk in Soils of Southern Hilly Areas	WANG Yu, XIN Cun-lin, YU Shi, <i>et al.</i> (4756)
Risk Assessment and Attribution Analysis of "Five Toxic" Heavy Metals in Cultivated Land in Lanzhou	ZHANG Li-rui, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i> (4767)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils and Crops in Luancheng, Shijiazhuang City	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (4779)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antimony in Typical Urban Soil	SHEN Cheng, YE Wen-juan, QIAN Shi-ying, <i>et al.</i> (4791)
Contamination Assessment and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Typical Villages and Towns in a Nonferrous Metal Mining City	WANG Feng, HUANG Yan-huan, LI Ru-zhong, <i>et al.</i> (4800)
Effect of Citric Acid and Mowing on Enhancing the Remediation of Cadmium Contaminated Soil by Napier Grass (<i>Pennisetum purpureum</i> Schum)	TANG Qi, WU Gang-fan, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4810)
Arsenic Methylation Efficiency Changes During Paddy Soil Drying and Its Key Influencing Factors Analysis	ZHANG Yue, LI Ling-yi, WEN Jiong, <i>et al.</i> (4820)
Effects of Exogenous Jasmonic Acid on Arsenic Accumulation and Response to Stress in Roots of Rice Seedlings	LI Yan, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i> (4831)
Effects of Straw Returning and Fertilizer Application on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield	SONG Jia-jie, XU Xi-yang, BAI Jin-ze, <i>et al.</i> (4839)
Effect of Winter Cover Cropping on Soil Greenhouse Gas Emissions in a Dryland Spring Maize Field on the Loess Plateau of China	ZHANG Shao-hong, WANG Jun, FANG Zhen-wen, <i>et al.</i> (4848)
Detection of Influencing Factors of Spatial Variability of Soil Respiration in Pangqiangou Nature Reserve	LI Xiao-min, YAN Jun-xia, DU Zi-qiang, <i>et al.</i> (4858)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Concentrations and the Influencing Factors in Small Aquaculture Pond	SHI Jie, ZHANG Mi, QIU Ji-li, <i>et al.</i> (4867)
Effect of Butyl Xanthate on Pb ²⁺ and Cd ²⁺ Adsorption by Soil Around a Dressing Plant	HU Zhi-hao, GUO Zhao-hui, RAN Hong-zhen, <i>et al.</i> (4878)
Sorption Mechanism and Site Energy Distribution of Acetaminophen on Straw-derived Biochar	SHANG Cen-yao, GU Ruo-ting, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4888)
Spatial-temporal Variations and Their Driving Forces of the Ecological Vulnerability in the Loess Plateau	ZHANG Liang-xia, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, <i>et al.</i> (4902)
Mechanism and Application of Plant Growth-Promoting Bacteria in Heavy Metal Bioremediation	MA Ying, WANG Yue, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4911)