

目次

河北南部城市臭氧和 VOCs 的污染特征及传输贡献	赵江伟, 聂赛赛, 于玉洁, 王帅, 崔建升, 王玮, 任晓伟, 朱烁 (4775)
基于卫星和地面监测的河西走廊 O ₃ 浓度时空分布及潜在源区分析	李锦超, 曹春, 方锋, 唐千惠, 梁朕月 (4785)
海南岛臭氧污染时空变化及敏感性特征	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文帅 (4799)
华东地区对流层 O ₃ 和前体物 HCHO 及 NO ₂ 的时空特征	王晓雯, 刘昊霞, 王扬, 宋宜凯 (4809)
2006~2020 年广东省大气甲醛排放演变特征	明桂英, 朱曼妮, 沙青娥, 张雪驰, 饶思杰, 陈诚, 刘慧琳, 郑君瑜 (4819)
淄博市涂装行业 VOCs 排放水平及减排潜力	黄玥润, 杨文, 王秀艳, 王雨燕, 程颖, 王帅 (4832)
西安市城市降尘和土壤尘 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 中碳组分特征	沈利娟, 王红磊, 孙杰娟, 刘诗云, 刘焕武, 赵天良 (4843)
长江流域径流模拟及其对极端降雨的响应	高爽, 凌超普, 汤水荣, 王心亮, 王慧勇, 孟磊, 颜晓元 (4853)
黄河流域内蒙古段水化学同位素特征及水体转化关系	裴森森, 段利民, 苗平, 潘浩, 崔彩琪, 张波, 籍健勋, 罗艳云, 刘廷玺 (4863)
古堆泉域岩溶地下水水化学特征及成因	唐春雷, 申豪勇, 赵春红, 王志恒, 谢浩, 赵一, 梁永平 (4874)
华北平原典型城市(石家庄)地下水重金属污染源解析与健康风险评价	陈慧, 赵鑫宇, 常帅, 宋圆梦, 卢梦淇, 赵波, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4884)
湖南东江湖表层沉积物重金属的空间分布、形态及生态风险	张同亮, 衣丽霞, 黎常成, 袁首枢, 豆奕轩, 田胜艳, 林尚璇 (4896)
太湖水华前表层水 CDOM 的光谱特征与来源解析	王永强, 卢少勇, 黄蔚, 韩镇阳, 国晓春 (4906)
白洋淀典型水域 COD 的组成及各组分贡献	李琦, 张超, 张文强, 温胜芳, 单保庆, 季恺悦 (4915)
白洋淀典型抗生素的源解析及其特定源风险评估	宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 赵鑫宇, 陈慧, 陈昊达, 高赛, 王琳静, 崔建升, 张璐璐 (4927)
雅鲁藏布江中游河流生态系统健康状态对水环境因子的响应	李晓东, 杨清, 刘惠秋, 巢欣, 杨胜烟, 巴桑 (4941)
鄱阳湖典型河湖交汇区浮游植物现状分析	于新平, 陈宇炜, 刘金福, 王俊颖, 徐光锋, 邹浩月, 陈楠, 夏雨 (4954)
不同黑臭程度下城市河道浮游植物群落结构、多样性和功能群	张琪琪, 曾劼, 尹卓, 冯杰, 刘静, 修宇鑫, 刘国, 许春阳 (4965)
反硝化脱氮对太湖蓝藻水华态势的影响	李昌杰, 许海, 詹旭, 张铮惠, 朱梦圆, 邹伟, 肖曼, 倪子怡, 朱慧 (4977)
密云水库入库河流微生物群落演替对氮素形态转化的影响	辛苑, 张耀方, 李添雨, 叶芝茜, 申佩弘, 魏源送, 高超龙, 舒舒兴, 张俊亚 (4985)
城市尾水氮代谢过程中芽孢杆菌对微藻作用机制	赵志瑞, 马超, 颜嘉晨, 李书缘, 李晴, 胡紫如, 呼庆, 刘硕, 万敬敏 (4996)
高效异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Glutamicibacter</i> sp. WS1 低温下对多种氮源的脱氮特性及氮代谢机制	魏淑惠, 罗晓, 吕鹏翼, 马文凯, 苏金卫, 李伟, 崔建升 (5006)
大环内酯类抗生素在饮用水处理过程中的污染特征及其氯化反应机制	岑霞, 程思宇, 石宗民, 谢卓鸿, 张凌菱, 杨滨, 应光国 (5017)
不同堆肥工艺处理的城市污水污泥对滨海湿地土壤中养分释放特征和潜力的影响	贾培寅, 王馨, 花玉婷, 姜志翔 (5025)
淮河流域安徽段水体和沉积物微塑料赋存特征及风险评估	张海强, 高良敏, 葛娟, 赵兴兰, 张振, 慕明, 邱宇辉 (5036)
黄河三角洲湿地表层沉积物中微塑料的分布、来源和风险评估	耿娜, 赵广明, 张大海, 袁红明, 李先国 (5046)
固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估	马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢 (5055)
鄱阳湖湿地淹水与非淹水状态下微塑料表面细菌群落分布特征	赵俊凯, 陈旭, 胡婷婷, 廖轶颖, 邹龙, 简敏菲, 刘淑丽 (5063)
聚苯乙烯微塑料对铜绿假单胞菌生物膜形成和结构变化的影响	陶辉, 于多, 杨兰, 陈泽扬, 周灵沁, 罗雲鑫 (5071)
聚苯乙烯微塑料对小白菜生长、生理生化及冠层温度特性的影响	郭冰林, 丰晨晨, 陈悦, 林迪, 李岚涛 (5080)
聚乙烯与磺胺二甲嘧啶复合胁迫对大豆种子萌发及幼苗生长生理特征的影响	赵肖琼, 张恒慧, 赵润枝, 张新梅 (5092)
离子类型、强度和铁氧化物影响下微塑料的迁移行为及模型计算	张然, 于可飞, 黄磊, 陈雅丽, 马杰, 翁莉萍, 李永涛 (5102)
土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响	徐文彬, 饶良懿 (5114)
有机碳流失对土壤侵蚀的响应及其驱动因素: 基于 Meta 分析	刘小岚, 黄金权, 齐瑜洁, 李威闻, 刘纪根, 陈燕飞, 高绣纺 (5125)
平衡施肥与秸秆覆盖对紫色土坡耕地养分及其化学计量的影响	张高宁, 徐绮雯, 何丙辉, 李天阳, 冯梦蝶, 梁珂 (5135)
稀土-重金属共污染土壤中真菌群落结构特征及主导影响因素	罗颖, 李敬伟, 袁浩, 包智华 (5145)
周年轮作休耕对土壤 AMF 群落和团聚体稳定性的影响	鲁泽让, 夏梓泰, 芦美, 赵吉霞, 李永梅, 王自林, 范茂攀 (5154)
华北平原典型城市土壤微生物群落时空变化规律及其驱动因子	赵鑫宇, 陈慧, 常帅, 宋圆梦, 赵波, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐 (5164)
高量秸秆还田配施芽孢杆菌对沙化土壤细菌群落及肥力的影响	聂扬眉, 步连燕, 陈文峰, 安德荣, 韦革宏, 王红雷 (5176)
基于大田试验的铅镉复合污染土壤中甜糯玉米低积累特性	唐乐斌, 李龙, 宋波, 董心月, 韦美溜 (5186)
不同阻控措施对生菜中镉铅累积及品质的影响	周洪印, 李嘉琦, 包立, 夏运生, 王晟, 吴龙华, 张乃明 (5196)
纳米氧化铜对镉胁迫下小油菜生理生化和重金属累积的影响	王诗琪, 孙约兵, 黄青青, 徐应明, 董如苗, 孟庆尧 (5204)
不同污染区巨菌草生物炭内源污染物分布及其生物毒性	刘莉雅, 崔红标, 刘笑生, 张雪, 董婷婷, 章腾, 周静 (5214)
CuFeO ₂ 改性生物炭对四环素的吸附特性	刘国成, 张新旺, 信帅帅, 王倩文, 阎清华, 周成智, 辛言君 (5222)
基于 Meta 分析的全氟化合物对鱼类生态毒性效应	陆宏, 周锦阳, 杨帆, 王蓓莉, 程治文, 申哲民, 袁涛 (5231)
基于 PMF 模型的县域尺度土壤重金属来源分析及风险评估	郑永立, 温汉辉, 蔡立梅, 罗杰, 汤端阳, 武妙, 李慧, 李鼎 (5242)
基于 PMF-PCA/APCS 与 PERI 的菏泽油田牡丹种植区表层土壤重金属潜在来源识别及生态风险评估	赵庆令, 李清彩, 安茂国, 于林松, 万鑫, 曹付恒, 韩文撑, 陈娟, 王天鸽 (5253)
重庆市煤矸山周边农产品镉健康风险评估及土壤环境基准值推导	马杰, 余泽蕾, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 刘萍, 徐敏 (5264)
安徽典型硫铁矿集中开采区土壤重金属污染特征及来源解析	贾晗, 刘军省, 王晓光, 鞠林雪, 何鑫, 周建伟, 张羲 (5275)
湘东北典型河源区土壤重金属分布特征、来源解析及潜在生态风险评估	杨振宇, 廖超林, 邹炎, 谢伍晋, 陈晓威, 张驭飞 (5288)
不同含量外源镉在红壤中的变化特征	周子阳, 庞瑞, 宋波 (5299)
CO ₂ 泡沫混凝土碳封存潜力分析	张源, 他旭鹏, 覃述兵, 郝佑民 (5308)
综合环境社会经济指标的优先污染物筛选方法研究: 以电子废物拆解为例	陈源, 蔡震, 李金惠 (5316)
《环境科学》征订启事(4808) 《环境科学》征稿简则(4831) 信息(4842, 5124, 5153)	

土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统服务的影响

徐文彬^{1,2}, 饶良懿^{1,2*}

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

摘要: 土地利用和气候变化是驱动生态系统服务变化的重要因素, 了解其背后的影响机制对提升生态系统服务至关重要。目前农牧交错带生态系统服务变化和驱动因素的研究较为薄弱。以我国典型农牧交错带内蒙古奈曼旗为研究区, 基于 InVEST 模型、修正风蚀方程(RWEQ)和修正通用土壤流失方程(RUSLE)评估该区 2005 年和 2015 年的产水服务、防风固沙服务和土壤保持服务, 并运用贡献率公式、地理探测器和皮尔逊相关系数等方法分析土地利用和气候变化对这 3 项生态系统服务的影响。结果表明: ①2005~2015 年奈曼旗产水服务和土壤保持服务整体呈上升趋势, 分别增加 22.41% 和 6.74%, 防风固沙服务则下降了 66.24%。②产水服务和防风固沙服务变化主要受气候变化的影响, 土壤保持服务变化主要受土地利用变化的影响。③实际蒸散变化和土地利用变化是影响产水服务变化空间分异性的主要因子, 其解释力分别为 94.50% 和 50.05%; 实际蒸散变化和土地沙化程度是影响防风固沙服务变化空间分异性的主要影响因子, 其解释力分别为 19.84% 和 16.15%。④奈曼旗各项生态系统服务之间相关性较弱, 只有防风固沙-产水服务呈现弱显著的协同关系。根据研究结果, 建议在沙区适当提高灌草植被比例; 在牧区实行必要的封禁管理; 在农田引进滴灌等节水技术; 而城镇则应当继续将生态保护和修复摆在优先位置。

关键词: 生态系统服务; 土地利用变化; 气候变化; 农牧交错带; 内蒙古奈曼旗

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)09-5114-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202210002

Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone

XU Wen-bin^{1,2}, RAO Liang-yi^{1,2*}

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

Abstract: Land use and climate change are the most important factors driving the change in ecosystem services (ESs). It is critical to understand the mechanisms behind such changes for improving ESs. However, there is still a lack of accurate understanding of change and dominant influencing factors of ESs in the agro-pastoral ecotone. This study took Naiman Banner, a typical farming pastoral ecotone in China, as the case study area. Based on the InVEST model, the revised wind erosion equation (RWEQ) and the revised universal soil loss equation (RUSLE) were used to calculate water yield, soil retention, and windbreak and sand-fixing in Naiman Banner in 2005 and 2015. Finally, the impacts of land use and climate change on these three ecosystem services were analyzed by using contribution rate formula, Pearson correlation coefficient, and geodetector methods. The results indicate that: ① from 2005 to 2015, water yield and soil retention in Naiman Banner showed an overall upward trend, increasing by 22.41% and 6.74%, respectively, and windbreak and sand-fixing decreased by 66.24%. ② The change in water yield and windbreak and sand-fixing was mainly affected by climate change, and the change in soil retention was mainly affected by land use change. ③ Actual evapotranspiration change and land use change were the main factors affecting the spatial differentiation of water yield, with the explanatory powers of 94.50% and 50.05%, respectively. The main factors influencing the spatial differentiation of windbreak and sand-fixing were actual evapotranspiration change and land desertification degree, with the explanatory power of 19.84% and 16.15%, respectively. ④ The correlation of ESs in Naiman Banner was weak, and only windbreak and sand-fixing and water yield showed a weak significant synergy. Based on the results, we recommend that managers increase the proportion of grassland in sandy areas, implement closed management in pastoral areas, and introduce drip irrigation and other water-saving technologies in farmland, and ecological protection should continue to be given priority in city.

Key words: ecosystem services; land use change; climate change; agro-pastoral ecotone; Naiman Banner of Inner Mongolia

生态系统服务是指人类从生态系统中获得的各种直接和间接利益, 主要包括有形的物质产品供给和无形的服务提供两方面^[1,2]。生态系统服务作为衔接生态系统和社会系统之间的纽带^[3], 其相关研究发展迅速, 相关的科学问题受到地理学^[4]、生态学^[5]和经济学^[6]等许多领域内的学者关注。随着社会的发展, 人类对自然资源的过度开采以及不合理利用导致生态环境的退化变得越来越严重, 从而生态系统提供生态系统服务的能力也正以前所未有的速度在下降^[7-9]。根据 2005 年联合国公布的千年生态系统评估报告显示, 全球 24 项生态系统服务中有

15 项正在退化, 且未来这一趋势还会加剧^[10]。因此, 为减少由生态环境变化引起的生态系统服务的负面影响, 有必要监测和评估生态系统的时空变化, 并探究其背后的驱动机制, 从而通过对生态系统的保护和管理来加强生态系统服务的供给。

有研究发现, 土地利用和气候变化是导致生态系统变化的主要驱动力^[11,12]。作为生态系统的载

收稿日期: 2022-10-01; 修订日期: 2022-11-23

基金项目: 中建股份科技研发计划项目(CSCEC-2020-Z-5); 国家重点研发计划项目(2017YFC050670202)

作者简介: 徐文彬(1997~), 男, 硕士, 主要研究方向为生态系统服务评价, E-mail: 2044272657@qq.com

* 通信作者, E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

体,土地利用变化影响生态系统服务主要有面积变化、方式变化和空间格局变化这3种表现形式,它通过影响土壤侵蚀、能量交换、水循环和碳氮循环等生态过程来改变生态系统服务的供应,从而对生态系统服务的供需匹配关系产生影响^[13~16]。气候变化决定了生态系统服务的时空分布,它通过直接或间接改变水文过程、水分能量分布和二氧化碳浓度等来影响生态系统服务^[17~19]。同时,土地利用和气候之间还会相互影响。例如,气候会影响植被的长势从而对土地利用产生影响,而植被也会通过释放更多的二氧化碳和改变地面反射率来对气候产生影响^[20,21]。现在已有许多研究对土地利用和气候变化综合影响下的生态系统服务变化进行分析,例如,Peng等^[22]对喀斯特地貌不同区域内土地利用和气候变化对生态系统服务的影响进行比较;李文静等^[23]分析了土地利用和气候变化对北三河流域水源供给的影响;温旭丁等^[24]探究港珠澳大湾区植被净初级生产力对土地利用和气候变化的响应。当前对农牧交错带生态系统服务的研究主要集中在生态系统服务价值、时空变化和相互关系等方面。例如,张建宁等^[25]研究了农牧交错带中耕地变化对生态系统服务价值的影响;仲俊涛等^[26]分析了宁夏盐池农牧交错带中封禁草地的碳储存、水源涵养和土壤保持的生态系统服务空间权衡与协同关系。目前很少有人针对影响农牧交错带生态系统服务变化的驱动因素进行探索研究。因此,为了制定合理有效的生态系统管理和土地利用策略,迫切需要研究和探讨土地利用和气候变化对农牧交错带生态系统的影响及其驱动机制。

内蒙古奈曼旗是我国农牧交错带的典型地区,也是科尔沁沙地最具代表性的地区之一。在气候变化和人类活动的双重影响下,奈曼旗脆弱的生态环境面临严峻挑战。以往对奈曼旗生态系统服务的研究主要集中在生态补偿和生态系统服务价值等方面^[27,28],而生态系统服务驱动机制未见分析。因此本研究基于InVEST模型、修正风蚀方程(RWEQ)和修正通用土壤流失方程(RUSLE)评估了奈曼旗2005年和2015年产水服务、防风固沙服务和土壤保持服务,并运用贡献率公式、地理探测器和皮尔逊相关系数等方法分析了土地利用和气候变化对这3种生态系统服务的影响,以期为该区域生态系统管理和可持续的绿色发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

奈曼旗位于内蒙古自治区通辽市西南端,下辖

8个镇、4个苏木和两个乡,它的经纬度范围介于东经120°19′~121°35′和北纬42°14′~43°32′之间,总面积约8 138 km²(图1)。奈曼旗属于典型的温带大陆性季风气候,年内降水分布不均,降水主要集中在每年的5~10月,约占全年总降水量的70%,年平均降水量340~370 mm,年平均气温6.0~6.5℃。土壤主要以栗钙土、黑钙土和栗褐土为主,但是因为长期的风蚀作用已有许多地区开始退化为风沙土。

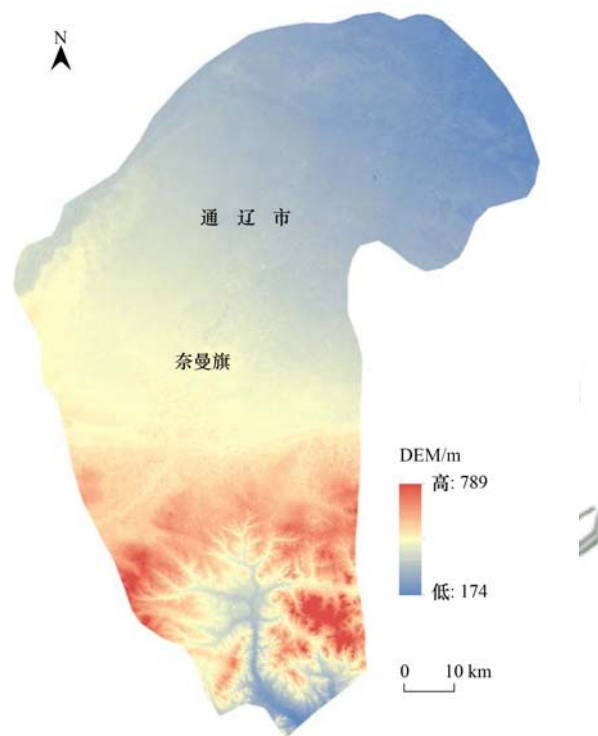


图1 研究区地理位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

本研究所需数据来源详情见表1,其中,气象数据主要包括降水、温度和风速这3类,由于奈曼旗内气象站点较少,为提高数据精度,将范围扩大到相邻省市,共选取10个站点。同时为防止单年极值的情况出现,分别以2003~2007年和2013~2017年气候数据的均值作为2005年和2015年的气候数据。此外,将所有栅格数据空间分辨率统一为30 m×30 m,投影坐标系统一为WGS_1984_UTM_Zone_51N。

1.3 生态系统服务指标

奈曼旗位于科尔沁沙地腹地,风沙灾害严重。因此,在考虑当地条件、评估方法的可行性和数据的可用性后,本研究选择产水量、土壤保持和防风固沙这3项生态系统服务作为分析对象,主要公式如表2所示。

1.3.1 产水量

产水量在农业灌溉、改善生态和人民的生产生

表 1 数据来源介绍¹⁾

Table 1 Introduction of data sources

数据名称	数据类型	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
气象数据	TXT	d	— ¹⁾	国家气象科学数据中心 (http://data.cma.cn/)
土地利用数据	TIFF	a	30 m × 30 m	一站式地球科学大数据实时计算平台 (https://engine.piesat.cn/)
土壤数据	TIFF		1 km × 1 km	联合国粮农组织的世界土壤数据库 (https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/)
DEM	IMG		30 m × 30 m	地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/search)
NDVI	TIFF	a	30 m × 30 m	国家科技资源共享服务平台 (http://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=60f68d757e28174f0e7d8d49), 参考文献[29]
沙地分布数据	SHP		— ¹⁾	国家科技资源共享服务平台 (http://www.nesdc.org.cn/sdo/detail?id=60f68d757e28174f0e7d8d49), 参考文献[30]

1) “—”表示原始数据类型非栅格数据,在对数据进一步处理后才能得到需要的空间分辨率

活中发挥着关键作用. 本研究使用 InVEST 模型中的 Water Yield 模块,此模块根据水量平衡原理和 Budyko 曲线估算研究区的产水量. 其计算原理为:将流域内所有降水减去实际蒸散损失的部分作为产水量,并假设其经过汇流全部到达分水岭出口. 详细操作方法参看《InVEST 模型使用手册》^[31].

1.3.2 防风固沙

土壤风蚀是造成干旱区半干旱区土地荒漠化和土壤退化的主要原因,奈曼旗受风沙危害严重,不但导致土壤退化、土地生产力降低还会影响农业生产

和食物安全. 目前修正风蚀方程(RWEQ)使用最为广泛,本文参考邢丽珠等^[32]和彭婉月等^[33]的研究来衡量奈曼旗的防风固沙量.

1.3.3 土壤保持

土壤保持是生态系统防止和缓解土壤侵蚀的能力. 通用土壤流失方程是现在应用最广泛的计算土壤保持量的模型之一. 经过几十年的发展和改进,通用土壤流失方程不断更新. 本研究使用《生态保护红线划定指南》^[34]中的修正通用土壤流失方程(RUSLE)来评估奈曼旗的土壤保持量.

表 2 生态系统服务评估方法

Table 2 Assessment method of ecosystem services

生态系统服务类型	主要公式	参数说明
产水量	$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right]P(x)$	式中, $Y(x)$ 表示像元 x 的年产水量, mm; $AET(x)$ 表示像元 x 的年实际蒸散量, mm; $P(x)$ 表示像元 x 的年降水量, mm
防风固沙	$SR = S_{L潜} - S_L$	式中, SR 表示防风固沙量, $kg \cdot m^{-2}$; $S_{L潜}$ 表示潜在风力侵蚀量, $kg \cdot m^{-2}$; S_L 表示实际风力侵蚀量, $kg \cdot m^{-2}$
土壤保持	$A_e = A_p - A_r$	式中, A_e 表示土壤保持量, $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$; A_p 表示潜在土壤侵蚀量, $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$; A_r 表示实际土壤侵蚀量, $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$

1.4 生态系统服务变化主导因素识别

土地利用和气候变化对生态系统服务的影响可分为 3 种:①仅由土地利用变化引起的影响;②仅由气候变化引起的影响;③土地利用和气候变化的综合影响. 因此,可以通过计算这两个因素单独影响的贡献率,而贡献率较大的因素被认定为生态系统服务变化的主导因素. 计算公式如下:

$$\Delta ES_{cli} = ES_{cli} - ES_1 \tag{1}$$

$$\Delta ES_{lu} = ES_{lu} - ES_1 \tag{2}$$

$$R_{cli} = \frac{|\Delta ES_{cli}|}{|\Delta ES_{cli}| + |\Delta ES_{lu}|} \tag{3}$$

$$R_{lu} = \frac{|\Delta ES_{lu}|}{|\Delta ES_{cli}| + |\Delta ES_{lu}|} \tag{4}$$

式中, ES_1 表示 2005 年的生态系统服务; ES_{cli} 表示由 2015 年的气候数据和 2005 年的土地利用数据模拟的生态系统服务; ES_{lu} 表示由 2015 年的土地利用

数据和 2005 年的气候数据模拟的生态系统服务; ΔES_{cli} 表示气候变化引起的生态系统服务变化; ΔES_{lu} 表示土地利用变化引起的生态系统服务变化; R_{cli} 表示气候变化的贡献率, R_{lu} 表示土地利用变化的贡献率.

1.5 空间分异性主导因素识别

地理探测器可探测各种土地利用因子和气候类因子对产水量、防风固沙量和土壤保持量变化的影响. 本研究依据实际情况和软件运行结果,土地利用类因子选取 DEM、土地沙化程度、NDVI 变化、土地利用变化和地形起伏度这 5 项因子,气候类因子选取潜在蒸散变化、实际蒸散变化、年降水量变化、年均温度变化、最低温度变化和最高温度变化这 6 项因子.

地理探测器主要包括因子探测器、风险探测器、生态探测器和交互作用探测器这 4 个模块^[35].

本研究中使用其中的因子探测器和风险探测器。因子探测器用于探测每个自变量对各生态系统服务变化空间分异性的解释能力,用 q 值表示, q 越大表明该自变量对空间分异性的贡献越大。

$$q = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (5)$$

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

式中, q 表示自变量能够解释 $(100 \times q)\%$ 的防风固沙服务功能的空间分异性; SSW 表示不同层内方差之和; SST 表示全区总方差; h 表示自变量的分层状况; L 表示层数; N_h 和 N 表示 h 层内单元数和全区单元数; σ_h^2 和 σ^2 表示 h 层内防风固沙服务功能的方差和全区防风固沙服务功能的方差。

风险探测器可以通过各层级间的差异显著性(置信水平95%)探测所有影响因子引起各生态系统服务变化最大的区域,一般使用 t 检验来验证:

$$t_{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{Y}_{h=1} - \bar{Y}_{h=2}}{\left[\frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{\text{Var}(\bar{Y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{1/2}} \quad (7)$$

式中, $\bar{Y}_h$ 表示 h 层内的属性均值; n_h 表示子区域 h 内样本数量; Var 表示方差。

1.6 权衡与协同关系

生态系统服务之间存在着彼此制约的权衡关系或同步改变的协同关系。探究生态系统服务之间的权衡与协同关系,能够更好地把握生态系统服务的变化趋势,对于理解生态系统服务间的相互作用机制具有重要意义。本研究使用皮尔逊相关系数来分析奈曼旗生态系统服务变化之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务变化

在降水、温度和地形等自然因素和各种人为因素的共同影响下,3项生态系统服务在2005年和2015年间呈现不同的时空格局(图2)。奈曼旗产水量呈现南部、中部高,北部、中南部低的空间分布格局,最高值主要集中在中部的建筑用地附近,最低值主要分布在水域附近。从统计分析来看,2005年产水量平均值为88.84 mm,最大值为226.54 mm;2015年产水量平均值为108.75 mm,最大值为257.53 mm,增幅22.41%,产水深度增加范围在0~100 mm之间。但是,产水量的增加并不意味着原本匮乏的水资源变得充裕,由于降水集中,人类的不合理利用和生态环境破坏等因素,水资源现状依旧不容乐观。

防风固沙量呈现由南向北逐渐减小的趋势。从

时间上看,防风固沙量从2005年的 7.08×10^6 t减少到2015年的 2.39×10^6 t,减小了66.24%。2005年防风固沙量平均值为 $0.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值为 $2.11 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$;2015年防风固沙量平均值为 $0.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,最大值为 $1.13 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

土壤保持量呈现由南部向中部,由东北向西南逐渐减小的空间格局。土壤保持能力较高的土地一般为林地、灌丛和草地。2005年土壤保持量平均值为 $24.77 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,最大值为 $15359.47 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$;2015年土壤保持量平均值为 $26.44 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,最大值为 $15171.29 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,增幅6.74%。

2.2 生态系统服务变化的主导因素

2.2.1 产水量

土地利用和气候变化对产水量变化的影响如图3所示,通过比较2005年和2015年土地利用和气候变化对产水量的贡献率,可以找出驱动产水量变化的主要因素。以土地利用变化为主要贡献因子的土地共有 542.67 km^2 ,约占发生土地利用变化总面积的31.03%;以气候变化为主要贡献因子的土地共有 1206.33 km^2 ,约占发生土地利用变化总面积的68.97%,说明奈曼旗产水量变化主要受气候变化的控制。同时可以发现,土地利用变化对产水量的贡献率较低,贡献率主要为0%~20%,贡献率较高的地区主要集中在奈曼旗的西北部和中部。土地利用变化对产水量变化正影响的地区主要集中在中部和北部部分地区,而负影响地区主要分布在西北部。气候变化对产水量的贡献率较高,贡献率主要为80%~100%,贡献率高值区遍布奈曼旗全境,且全部为正影响。

2.2.2 防风固沙量

土地利用和气候变化对防风固沙量变化的影响如图4所示,通过比较2005年和2015年土地利用和气候变化对防风固沙量的贡献率,可以找出驱动防风固沙量变化的主要因素。共有 245.49 km^2 的面积是以土地利用变化为主要贡献因子,约占发生土地利用变化总面积的14.16%;以气候变化为主要贡献因子的土地共有 1488.36 km^2 ,约占发生土地利用变化总面积的85.84%,这说明奈曼旗防风固沙量的变化主要受气候变化的控制。土地利用变化对防风固沙量的贡献率较低,贡献率主要为0%~20%,贡献率较高的地区主要集中在奈曼旗的西北部和中部。土地利用变化对防风固沙量变化正影响的地区主要分布在中部和南部,负影响的地区主要散落在奈曼旗北部。气候变化对防风固沙量的贡献率较高,贡献率主要为80%~100%,贡献率高值区

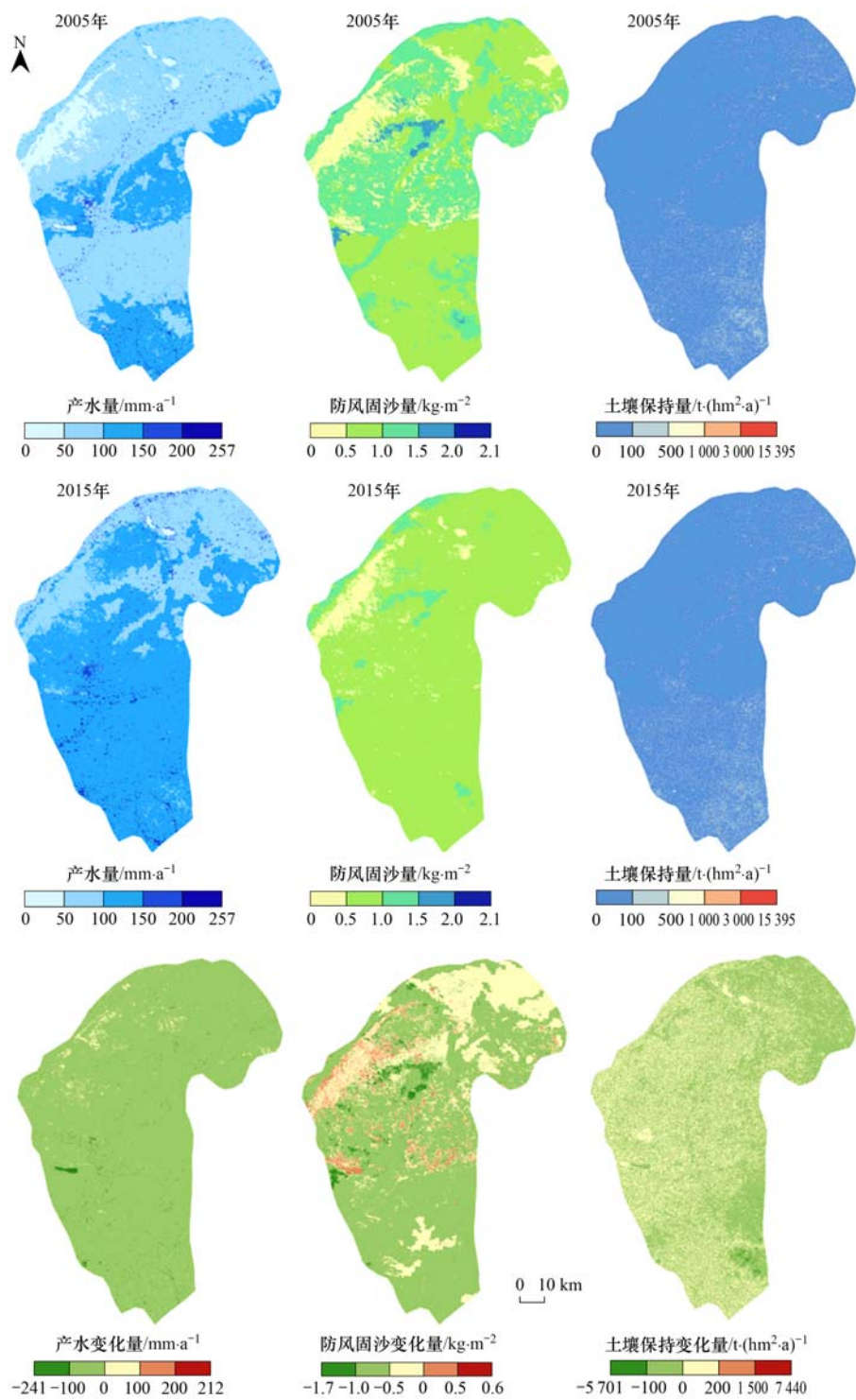


图2 2005年和2015年产水量、防风固沙和土壤保持的空间分布及变化

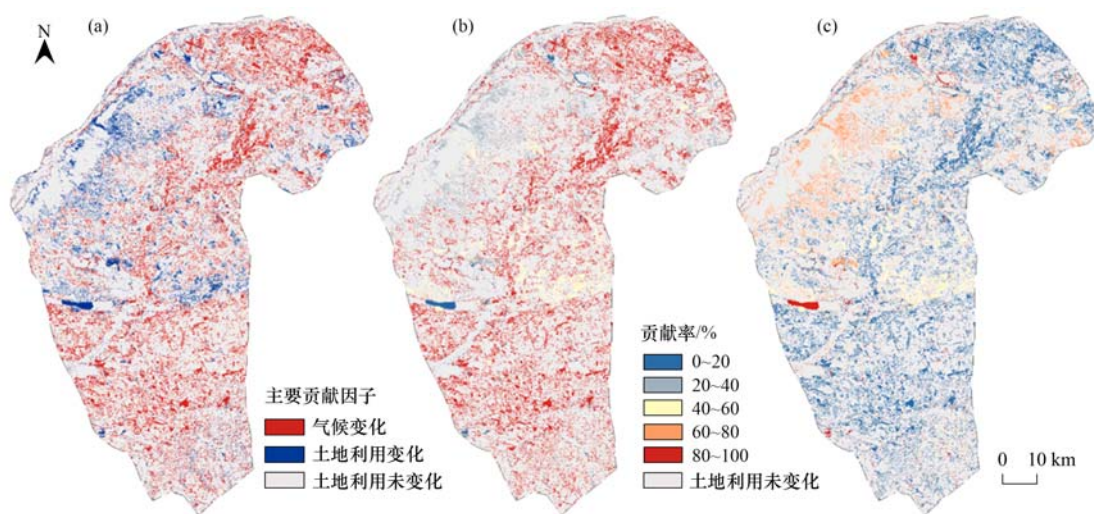
Fig. 2 Changes in spatial distribution of water yield, windbreak, and sand-fixing and soil retention in 2005 and 2015

遍布奈曼旗全境,且全部为负影响。

2.2.3 土壤保持量

土地利用和气候变化对土壤保持量变化的影响如图5所示,通过比较2005年和2015年土地利用和气候变化对土壤保持量的贡献率,可以找出驱动土壤保持量变化的主要因素。以气候变化为主要贡献因子的土地共有250.06 km²,约占发生土地利用变化总面积的25.87%;以土地利用变化为主要贡

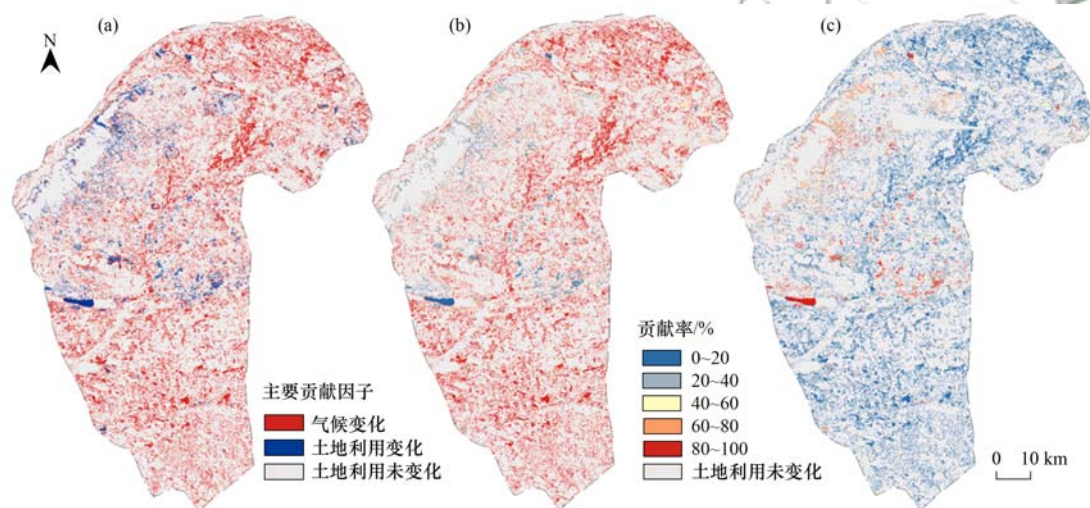
献因子的土地共有716.55 km²,约占发生土地利用变化总面积的74.13%,这说明奈曼旗土壤保持量的变化主要受土地利用变化的控制。气候变化对土壤保持量的贡献率较低,贡献率主要为0%~20%,贡献率较高的地区主要分布在奈曼旗的西南部和西北部。土地利用变化对土壤保持量的贡献率较高,贡献率主要为80%~100%,贡献率较高的地区主要分布在除奈曼旗西南部之外的地区。土地利用变化



(a)产水量变化的主导因素; (b)气候变化对产水量变化的贡献率; (c)土地利用变化对产水量变化的贡献率

图3 气候变化和土地利用变化对产水量影响的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of impacts of climate change and land use change on water yield change



(a)防风固沙变化的主导因素; (b)气候变化对防风固沙变化的贡献率; (c)土地利用变化对防风固沙变化的贡献率

图4 气候变化和土地利用变化对防风固沙影响的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of impacts of climate change and land use change on windbreak and sand-fixing change

对土壤保持量变化主要为正影响,影响区域均匀地分布在奈曼旗各处。

2.3 生态系统服务空间分异性主导因素识别

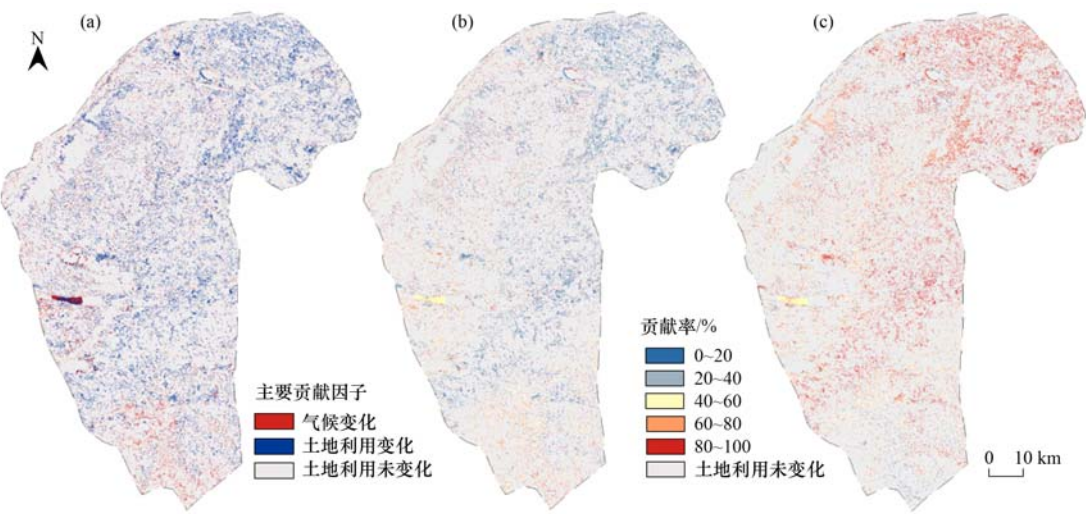
利用因子探测器探究不同影响因子对产水量变化、防风固沙量变化和土壤保持量变化空间分异性的解释力(图6)。结果表明,各因子对产水量变化和防风固沙量变化有着显著影响,而土壤保持量变化的空间分异性受这些因子的影响十分有限。产水量变化的空间分异性主要受实际蒸散变化和土地利用变化的影响,其解释力分别为94.50%和50.05%。防风固沙量变化的空间分异性主要受实际蒸散和土地沙化程度的影响,其解释力分别为19.84%和16.15%。

风险探测器可以探测各因子影响生态系统服务变化最大的区域,由于所有因子对土壤保持量变化的空间分异性影响都较低,所以这里不对其进行讨

论。由土地利用变化引起的产水量变化的高值区主要集中在荒地、草地、农田和水域转变为建筑用地的地区,而由土地沙化程度引起的防风固沙量变化的高值区主要集中在固定沙地上。

2.4 生态系统服务之间的关系

厘清生态系统服务之间的权衡与协同关系,能够为理解生态系统服务之间的相互作用机制以及后续生态系统管理提供理论基础。本研究分别计算2005年和2015年的产水量、防风固沙量和土壤保持量之间的皮尔逊相关系数,以此来确定各生态系统服务之间的相互关系。由表3可知,奈曼旗的防风固沙-产水服务呈现弱显著的正相关关系,说明防风固沙和产水量是弱显著的协同关系。而土壤保持-产水服务和土壤保持-防风固沙服务虽然也存在着协同或权衡关系,但是二者之间的影响力十分有限。



(a) 土壤保持量变化的主导因素; (b) 气候变化对土壤保持量变化的贡献率; (c) 土地利用变化对土壤保持量变化的贡献率

图 5 气候变化和土地利用变化对土壤保持量影响的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of impacts of climate change and land use change on soil retention change

表 3 生态系统服务间的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients between different ecosystem services

生态系统服务	2005 年			2015 年		
	产水量	防风固沙	土壤保持	产水量	防风固沙	土壤保持
产水量	—	0.421 **	0.049 **	—	0.228 **	0.059 **
防风固沙	—	—	0.004 **	—	—	-0.039 **
土壤保持	—	—	—	—	—	—

1) ** 表示在 0.01 水平相关性显著

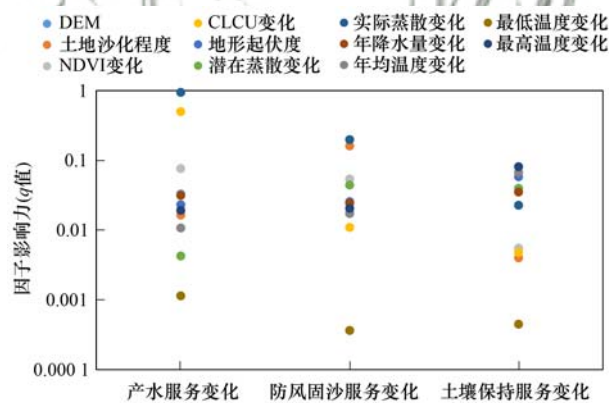


图 6 奈曼旗各影响因子对生态系统服务空间分异性的影响程度

Fig. 6 Influence of different driving factors on spatial stratified heterogeneity of ecosystem service in Naiman Banner

3 讨论

量化区域生态系统服务变化和空间分异性的影响因素并揭示其主要驱动因子有助于管理者们有针对性地实施生态优化和调控措施^[36]. 本研究在分析 2005 年和 2015 年奈曼旗产水服务、防风固沙服务和土壤保持服务时空变化的基础上,探究土地利用和气候变化对生态系统服务变化和空间分异性的影响机制,为生态系统服务优化提供了定量依据,也为类似研究提供了参考. 本研究的模型模拟结果与其他奈曼旗或临近地区的研究结果一致. 例如李鑫

等^[37]的研究表明京津冀北部 2000 ~ 2019 年平均产水深度为 60 ~ 120 mm,在本研究中 2005 ~ 2015 年奈曼旗平均产水深度为 88 ~ 108 mm; 王耕等^[38]的研究表明辽西北地区 2020 年单位面积防风固沙量为 0.26 kg·m⁻²,本研究中 2015 年奈曼旗单位面积防风固沙量为 0.29 kg·m⁻²; 金海珍等^[39]的研究表明科尔沁沙地东南部 2000 ~ 2018 年平均土壤保持量为 26.30 t·(hm²·a)⁻¹,本研究中 2015 年奈曼旗平均土壤保持量为 26.44 t·(hm²·a)⁻¹.

土地利用和气候变化是引起生态系统服务变化的主要影响因素,其对生态系统服务的影响主要有正影响和负影响两种^[22]. 土地利用对产水量、防风固沙量和土壤保持量正影响的主要原因是因为植被覆盖度低的荒地和水域转变为植被覆盖度高的农田和草地的缘故; 而负影响主要是生态环境破坏导致科尔沁沙地蔓延、草地退化为荒地所造成的. 气候变化对产水量和土壤保持量主要为正影响,这是因为奈曼旗降水量的整体增加,从 2005 年的 367.79 mm 增加到 2015 年的 392.45 mm,增幅 6.70%; 而气候变化对防风固沙量主要为负影响,这是因为近 60 年间科尔沁沙地无论是年平均风速还是四季平均风速都呈显著下降的趋势^[40],从而在根本上减小了风蚀,所以防风固沙量也就随之减小. 需要指出的

是,防风固沙量的减小并不意味着防风固沙能力的降低,相反,奈曼旗近些年通过实施一系列诸如三北防护林、退耕(牧)还林还草、国家造林补贴、森林植被恢复和重点区域绿化等林业生态工程建设,使得植被覆盖度增加、生态环境得到改善,最终防风固沙能力得到了加强。

奈曼旗产水量的空间分异性主要受土地利用变化和实际蒸散变化的影响。这与戴尔阜等^[41]、丁浩浩等^[42]和黄欣等^[43]研究的结果一致,不过在他们的研究中降水量对产水量的影响十分显著,而在本研究中降水量变化对产水量变化的空间分异性只有 5.23% 的解释力。这可能是因为 2005~2015 年奈曼旗土地利用的转化十分频繁,尤其是对产水量影响最大的建筑用地和水域,在这 10 年间共有 183.59 km² 的面积发生转化,占土地利用变化总面积的 10.46%。同时,建筑用地等土地利用变化是根据人类生产生活需要建造的,位置相对集中。而降水量的变化在空间分布上却相对比较均匀,而且奈曼旗在 2005~2015 年降水变化较小,仅增加了 21.96 mm,所以才会出现降水量变化对产水量变化的空间分异性影响较低的现象。防风固沙量的空间分异性主要受实际蒸散变化和土地沙化程度的影响,这同王晓峰等^[44]研究的结果一致,这是因为实际蒸散量变化与降水、温度和土地利用类型变化有着很高的相关性;而不同的土地沙化程度,土壤的含水量和养分等理化性质也会有区别,这些区别会导致土壤抗风蚀能力有所差异,进而导致防风固沙量的空间分异性。根据风险探测器显示,由土地利用变化和实际蒸散变化引起产水量变化的高值区主要集中在建筑用地附近,这与前人研究的结果一致^[45~47]。这是因为建筑用地会增加不透水面积,导致降水下渗受阻,从而大大增加产水量。由土地沙化程度不同引起的防风固沙服务高值区主要集中在固定沙丘附近,这是因为固定沙地地表稳定,风沙活动不明显,所以防风固沙量较高。

2005~2015 年随着奈曼旗生态环境建设和社会经济的快速发展,奈曼旗自然环境好转、植被覆盖率增加、沙地蔓延得到抑制。在未来的城镇建设和生态保护措施实施过程中势必会对生态系统服务产生新的影响,因此,笔者建议:①对于西北部沙地为主的区域可适当提高灌草植被的比例,这样既能发挥防风固沙、保持水土等作用,也可以减少蒸散,避免水资源的浪费。②对于北部草地为主的区域可在破坏严重的地方实行封禁管理,在牧区制定合理的放牧制度,从而实现畜草平衡。③对于南部耕地为主的区域可引进喷灌等先进节水灌溉技术,设置贮

水沟等农田蓄水设施提高自然降水利用率。④对于城市化建设应当合理规划、统筹,继续将生态保护摆在优先位置。⑤加强奈曼旗的林地、草地保护力度,巩固各项重点林业生态工程建设成果。

本文初步揭示了土地利用和气候变化对生态系统服务变化的影响,但在整个生态系统服务评价中还有一些不确定性和不足。首先本研究使用的土壤数据空间分辨率较低,可能会缺失部分信息。其次,本研究仅对奈曼旗产水服务、防风固沙服务和土壤保持服务这 3 项生态系统服务进行分析,而更多的生态系统服务探究有助于全面了解生态系统服务变化机制。最后,在本研究中土壤保持服务变化的空间分异性受现有因子的影响都十分有限,今后的研究可增加更多的因子从而更为全面探究影响土壤保持服务变化空间分异性的因素,以弥补本研究的不足。

4 结论

(1)奈曼旗产水服务和土壤保持服务整体呈上升趋势,而防风固沙服务整体呈下降趋势。其中产水服务的高值区主要集中在建筑用地附近,低值区主要集中在水域附近;土壤保持服务和防风固沙服务高值区主要集中在林地、灌丛和草地附近,低值区主要集中在荒地附近。

(2)产水服务和防风固沙服务变化主要受气候变化的影响,影响面积分别占土地利用变化总面积的 68.97% 和 85.84%,影响力主要为 80%~100%;土壤保持服务变化主要受土地利用变化的制约,影响面积占土地利用变化总面积的 74.13%,影响力同样集中在 80%~100%。

(3)影响产水服务变化空间分异性的主要因子是实际蒸散变化和土地利用变化,解释力分别为 94.50% 和 50.05%;影响防风固沙服务变化空间分异性的主要因子是实际蒸散变化和土地沙化程度,解释力分别为 19.84% 和 16.15%。

(4)奈曼旗 2005 年和 2015 年各项生态系统服务之间相关性较弱,只有防风固沙-产水服务呈现弱显著的协同关系。

参考文献:

- [1] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**(6630): 253-260.
- [2] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展[J]. *地理科学进展*, 2014, **33**(4): 441-446.
Fu B J, Zhang L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress [J]. *Progress in Geography*, 2014, **33**(4): 441-446.
- [3] 李杨帆, 张倩, 向枝远, 等. 基于生态系统服务的海洋空间开发适宜性评价方法及应用——以粤港澳大湾区伶仃洋为

- 例[J]. 自然资源学报, 2022, **37**(4): 999-1009.
- Li Y F, Zhang Q, Xiang Z Y, *et al.* Evaluation of marine space development suitability based on ecosystem service: a case study of Lingdingyang Bay of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(4): 999-1009.
- [4] 邱坚坚, 刘毅华, 袁利, 等. 人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2021, **40**(6): 1060-1072.
- Qiu J J, Liu Y H, Yuan L, *et al.* Research progress and prospect of the interrelationship between ecosystem services and human well-being in the context of coupled human and natural system[J]. *Progress in Geography*, 2021, **40**(6): 1060-1072.
- [5] 陈寒旭, 游巍斌, 何东进, 等. 近 20 年城市生态系统服务发展态势分析[J]. 生态科学, 2021, **40**(5): 78-88.
- Chen H X, You W B, He D J, *et al.* The development trend of urban ecosystem services in the recent 20 years[J]. *Ecological Science*, 2021, **40**(5): 78-88.
- [6] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 等. 基于 GEE 的 1998~2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(12): 5473-5483.
- Lou P Q, Fu B L, Lin X C, *et al.* Influence of land use change on ecosystem service value based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 1998 to 2018[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5473-5483.
- [7] 刘国华, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 中国生态退化的主要类型、特征及分布[J]. 生态学报, 2000, **20**(1): 13-19.
- Liu G H, Fu B J, Chen L D, *et al.* Characteristics and distributions of degraded ecological types in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(1): 13-19.
- [8] Costanza R, De Groot R, Sutton P, *et al.* Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, **26**: 152-158.
- [9] 陈宏伟, 许晶, 刘娜, 等. 沈阳市城区绿地生态系统服务价值的时空变化[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(10): 3391-3397.
- Chen H W, Xu J, Liu N, *et al.* Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value of green land in Shenyang, Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(10): 3391-3397.
- [10] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [11] Fu Q, Li B, Hou Y, *et al.* Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: a case study in Altay Prefecture, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **607-608**: 633-646.
- [12] Zhang B, Shi Y T, Wang S. A review on the driving mechanisms of ecosystem services change[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, **13**(1): 68-79.
- [13] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(5): 798-808.
- Wang J, Dun Y L. A review on the effects of land use change on ecosystem services[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(5): 798-808.
- [14] 刘亚茹, 王聪, 严力蛟. 华北平原农区土地利用变化对生态系统服务的影响——以河南省商丘市为例[J]. 应用生态学报, 2018, **29**(5): 1597-1606.
- Liu Y R, Wang C, Yan L J. Impacts of land use change on ecosystem services in the agricultural area of North China Plain: a case study of Shangqiu City, Henan Province, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(5): 1597-1606.
- [15] 王兆峰, 许静. 土地利用演变对国家公园生态系统服务价值的影响——以三江源国家公园为例[J]. 生态学报, 2022, **42**(17): 6948-6958.
- Wang Z F, Xu J. Impacts of land use evolution on ecosystem service value of national parks: take Sanjiangyuan National Park as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(17): 6948-6958.
- [16] 范晓敏, 井新, 肖博文, 等. 气候和土地利用变化共同驱动青海海南、海北州生态系统服务的时空变化[J]. 草业学报, 2022, **31**(12): 17-30.
- Fan X M, Jing X, Xiao B W, *et al.* Climate and land-use change jointly determine the spatial-temporal changes of ecosystem services in Hainan and Haibei Tibetan Autonomous Prefectures, Qinghai Province[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, **31**(12): 17-30.
- [17] Tang Z L, Sun G, Zhang N N, *et al.* Impacts of land-use and climate change on ecosystem service in Eastern Tibetan Plateau, China[J]. *Sustainability*, 2018, **10**(2): doi: 10.3390/su10020467.
- [18] Dai E F, Yin L, Wang Y H, *et al.* Quantitative assessment of the relative impacts of land use and climate change on the key ecosystem services in the Hengduan Mountain Region, China[J]. *Sustainability*, 2020, **12**(10): doi: 10.3390/su12104100.
- [19] 韩会庆, 张娇艳, 马庚, 等. 气候变化对生态系统服务影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, **42**(2): 184-190.
- Han H Q, Zhang J Y, Ma G, *et al.* Advances on impact of climate change on ecosystem services[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, **42**(2): 184-190.
- [20] Bai Y, Ochudho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **102**: 51-64.
- [21] 王颖慧, 丁建丽, 李晓航, 等. 伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响——基于强度分析模型[J]. 生态学报, 2022, **42**(8): 3106-3118.
- Wang Y H, Ding J L, Li X H, *et al.* Impact of LUCC on ecosystem services values in the Yili River Basin based on an intensity analysis model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(8): 3106-3118.
- [22] Peng J, Tian L, Zhang Z M, *et al.* Distinguishing the impacts of land use and climate change on ecosystem services in a karst landscape in China[J]. *Ecosystem Services*, 2020, **46**: doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101199.
- [23] 李文静, 王盛, 李庆, 等. 气候和土地利用变化对北三河流域生态系统水源供给服务功能的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2021, (4): 99-108.
- Li W J, Wang S, Li Q, *et al.* The impacts of climate and land use changes on water yield in the Beisan River Basin[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021, (4): 99-108.
- [24] 温旭丁, 罗赵慧, 符良刚. 气候与土地利用变化对粤港澳大湾区 NPP 的影响[J]. 广西科学, 2021, **28**(3): 290-300.
- Wen X D, Luo Z H, Fu L G. Effects of climate and land use change on NPP in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. *Guangxi Sciences*, 2021, **28**(3): 290-300.
- [25] 张建宁, 陈璎亭, 王勇, 等. 北方农牧交错带耕地利用变化对生态系统服务价值影响——以宁夏回族自治区吴忠市为例[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 283-291.
- Zhang J N, Chen Y T, Wang Y, *et al.* Impact of cultivated land

- use change on ecosystem service value in the northern agro-pastoral transitional zone—a case study of Wuzhong City, Ningxia Hui autonomous region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(6): 283-291.
- [26] 仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 等. 农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(12): 268-275.
- Zhong J T, Wang B, Mi W B, *et al.* Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(12): 268-275.
- [27] 罗娟, 刘根春, 李春兰, 等. 基于生态系统服务的奈曼旗北部沙区耕地生态补偿标准的探讨[J]. *内蒙古林业科技*, 2014, **40**(1): 47-51.
- Luo J, Liu G C, Li C L, *et al.* Discussion on eco-compensation standard of farmland in northern sandy area of Naiman based on ecosystem service[J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 2014, **40**(1): 47-51.
- [28] 乌义汉, 秦富仓, 郭月峰, 等. 奈曼旗土地利用动态及其生态系统服务功能[J]. *水土保持通报*, 2020, **40**(4): 321-328.
- Wu Y H, Qin F C, Guo Y F, *et al.* Land use dynamics and ecosystem service function in Naiman Banner[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, **40**(4): 321-328.
- [29] Yang J L, Dong J W, Xiao X M, *et al.* Divergent shifts in peak photosynthesis timing of temperate and alpine grasslands in China[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **233**, doi: 10.1016/j.rse.2019.111395.
- [30] 王建华, 王一谋, 颜长珍, 等. 中国1: 10 万沙漠(沙地)分布数据集[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. <http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/122c9ac2-53ee-4b9a-ae87-1a980b131c9b/?q=%E6%B2%99%E5%9C%B0>, 2022-08-28.
- [31] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T InVEST 3.7.0 User's Guide [M]. the USA: The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund, 2019.
- [32] 邢丽珠, 张方敏, 邢开成, 等. 基于 RWEQ 模型的内蒙古巴彦淖尔市土壤风蚀变化特征及归因分析[J]. *中国沙漠*, 2021, **41**(5): 111-119.
- Xing L Z, Zhang F M, Xing K C, *et al.* Change of soil wind erosion and attribution in Bayannur, Inner Mongolia based on the revised wind erosion equation[J]. *Journal of Desert Research*, 2021, **41**(5): 111-119.
- [33] 彭婉月, 王兆云, 李海东, 等. 黑河中下游防风固沙功能时空变化及影响因子分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(12): 2734-2744.
- Peng W Y, Wang Z Y, Li H D, *et al.* Spatio-temporal changes of sand-fixing function and its driving forces in the middle and lower reaches of Heihe River Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(12): 2734-2744.
- [34] 环境保护部, 国家发展和改革委员会. 生态保护红线划定指南 [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm, 2022-08-10.
- [35] 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.
- [36] 景海超, 刘颖慧, 贺佩, 等. 青藏高原典型区生态系统服务空间异质性及其影响因素——以那曲市为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(7): 2657-2673.
- Jing H C, Liu Y H, He P, *et al.* Spatial heterogeneity of ecosystem services and its influencing factors in typical areas of the Qinghai-Tibet Plateau: a case study of Nagqu City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(7): 2657-2673.
- [37] 李鑫, 邹长新, 陈艳梅, 等. 2000—2019 年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素[J]. *水土保持通报*, 2022, **42**(5): 265-274.
- Li X, Zou C X, Chen X M, *et al.* Spatio-temporal pattern changes and driving factors of water conservation function in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2019[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, **42**(5): 265-274.
- [38] 王耕, 张红玉. 辽西北地区防风固沙服务空间流动与辐射效应[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(1): 52-59.
- Wang G, Zhang H Y. Spatial flow and radiation effect of sand-fixing service in northwest Liaoning Province [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(1): 52-59.
- [39] 金海珍, 于德永, 郝蕊芳, 等. 科尔沁沙地关键生态系统服务的约束关系分析[J]. *生态学报*, 2021, **41**(18): 7249-7259.
- Jin H Z, Yu D Y, Hao R F, *et al.* Analysis of constraint relationship among key ecosystem services in the Horqin Sandy Land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, **41**(18): 7249-7259.
- [40] 李思慧. 1961—2018 年科尔沁沙地气候变化特征[J]. *内蒙古气象*, 2019, **43**(5): 8-10.
- Li S H. Characteristics of climate change in Horqin Sandy Land from 1961 to 2018[J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2019, **43**(5): 8-10.
- [41] 戴尔卓, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析[J]. *地理学报*, 2020, **75**(3): 607-619.
- Dai E F, Wang Y H. Spatial heterogeneity and driving mechanisms of water yield service in the Hengduan Mountain Region[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(3): 607-619.
- [42] 丁鸿浩, 贺宏斌, 李佳蕾, 等. 城镇化和自然本底对生态系统服务权衡的影响: 以洛阳市为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2022, doi: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0546.
- Ding H H, He H B, Li J L, *et al.* Impacts of urbanization and natural background on ecosystem service tradeoffs: a case study of Luoyang city [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2022, doi: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0546.
- [43] 黄欣, 彭双云, 王哲, 等. 基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(10): 2813-2821.
- Huang X, Peng S Y, Wang Z, *et al.* Spatial heterogeneity and driving factors of ecosystem water yield service in Yunnan Province, China based on Geodetector [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(10): 2813-2821.
- [44] 王晓峰, 马嘉豪, 冯晓明, 等. 黄河流域生态安全屏障的防风固沙服务时空变化及驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2023, **43**(2): 660-671.
- Wang X F, Ma J H, Feng X M, *et al.* Spatio-temporal changes and driving factors of windbreak and sand-fixing services in the ecological security barrier of the Yellow River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, **43**(2): 660-671.
- [45] 王亚慧, 戴尔卓, 马良, 等. 横断山区产水量时空分布格局及影响因素研究[J]. *自然资源学报*, 2020, **35**(2): 371-386.
- Wang Y H, Dai E F, Ma L, *et al.* Spatiotemporal and influencing factors analysis of water yield in the Hengduan Mountain Region [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, **35**(2): 371-386.

- [46] Yang X, Chen R S, Meadows M E, *et al.* Modelling water yield with the InVEST model in a data scarce region of northwest China [J]. *Water Supply*, 2020, **20**(3): 1035-1045.
- [47] 陈泽怡, 余珮珩, 陈奕云, 等. 共享社会经济路径下汉江流域产水和水质净化服务时空演变[J]. *中国生态农业学报*

(中英文), 2021, **29**(10): 1800-1814.

Chen Z Y, Yu P H, Chen Y Y, *et al.* Spatio-temporal changes of water resources ecosystem services in the Hanjiang River Basin based on the shared socioeconomic pathway[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(10): 1800-1814.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2022年12月29日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议发布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单.《环境科学》连续21次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号.“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定.该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响.

环 境 科 学

CONTENTS

Pollution Characteristics and Transport contributions of Ambient Ozone and Volatile Organic Compounds in Southern Hebei Cities	ZHAO Jiang-wei, NIE Sai-sai, YU Yu-jie, <i>et al.</i> (4775)
Temporal and Spatial Distributions of O ₃ Concentration and Potential Source Area Analysis of Hexi Corridor Based on Satellite and Ground Monitoring	LI Jin-chao, CAO Chun, FANG Feng, <i>et al.</i> (4785)
Spatial and Temporal Variations in Ozone Pollution and Sensitivity Characteristics in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (4799)
Temporal and Spatial Characteristics of Troposphere O ₃ and Precursors HCHO and NO ₂ in East China	WANG Xiao-wen, LIU Min-xia, WANG Yang, <i>et al.</i> (4809)
Evolution Characteristics of Atmospheric Formaldehyde Emissions in Guangdong Province from 2006 to 2020	MING Gui-ying, ZHU Man-ni, SHA Qing-e, <i>et al.</i> (4819)
VOCs Emission Level and Emission Reduction Potential of Coating Industry in Zibo	HUANG Yue-run, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (4832)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Components in PM ₁₀ and PM _{2.5} of Road Dust Fall and Soil Dust in Xi'an	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (4843)
Runoff Simulation and Its Response to Extreme Precipitation in the Yangtze River Basin	GAO Shuang, TI Chao-pu, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (4853)
Water Chemical Isotope Characteristics and Water Transformation Relationship in Mongolian Section of the Yellow River Basin	PEI Sen-sen, DUAN Li-min, MIAO Ping, <i>et al.</i> (4863)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in Gudui Spring Catchment	TANG Chun-lei, SHEN Hao-yong, ZHAO Chun-hong, <i>et al.</i> (4874)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Groundwater of Shijiazhuang, a Typical City in North China Plain	CHEN Hui, ZHAO Xin-yu, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (4884)
Spatial Distribution, Speciation, and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Dongjiang Lake, Hunan Province	ZHANG Tong-liang, YI Li-xia, LI Chang-cheng, <i>et al.</i> (4896)
Spectral Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Surface Water of Taihu Lake Before Cyanobacterial Blooming	WANG Yong-qiang, LU Shao-yong, HUANG Wei, <i>et al.</i> (4906)
Chemical Oxygen Demand(COD) Composition and Contribution in Typical Waters of Baiyangdian Lake	LI Qi, ZHANG Chao, ZHANG Wen-qiang, <i>et al.</i> (4915)
Source Apportionment and Source-specific Risk of Typical Antibiotics in Baiyangdian Lake	SONG Yuan-meng, ZHAO Bo, LU Meng-qi, <i>et al.</i> (4927)
Response of River Ecosystem Health Status to Water Environmental Factors in the Middle Reaches of Yarlung Zangbo River	LI Xiao-dong, YANG Qing, LIU Hui-jiu, <i>et al.</i> (4941)
Analysis on the Current Situation of Phytoplankton in the Typical River- Lake Ecotone of Lake Poyang	YU Xin-ping, CHEN Yu-wei, LIU Jin-fu, <i>et al.</i> (4954)
Phytoplankton Community Structure, Diversity, and Functional Groups in Urban River Under Different Black and Odorous Levels	ZHANG Qi-qi, ZENG Jie, YIN Zhuo, <i>et al.</i> (4965)
Influence of Denitrification on Cyanobacterial Blooms Trends in Lake Taihu, China	LI Chang-jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4977)
Effects of Nitrogen Speciation Transformation on Microbial Community Succession in Input Rivers of Miyun Reservoir	XIN Yuan, ZHANG Yao-fang, LI Tian-yu, <i>et al.</i> (4985)
Action Mechanism of <i>Bacillus</i> on Microalgae During Nitrogen Metabolism in Urban Tailwater	ZHAO Zhi-ni, MA Chao, YAN Jia-chen, <i>et al.</i> (4996)
Nitrogen Removal Characteristics and Metabolism Mechanism of High-Efficiency Cold-Tolerant Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium <i>Glutamicibacter</i> sp. WSI for Various Nitrogen Sources at Low Temperature	WEI Bo-hui, LUO Xiao, LÜ Peng-yi, <i>et al.</i> (5006)
Pollution Characteristics of Macrolide Antibiotics During Drinking Water Treatment and Their Chlorination Reaction Mechanism	CEN Xia, CHENG Si-yu, SHI Zong-min, <i>et al.</i> (5017)
Effects of Different Biochar and Effective Microorganism Agent Improvement Approaches on the Nutrient Release Characteristics and Potential of Compost	JIA Pei-yin, WANG Xin, HUA Yu-ting, <i>et al.</i> (5025)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Sediments of Anhui Section of Huaihe River Basin	ZHANG Hai-qiang, GAO Liang-min, GE Juan, <i>et al.</i> (5036)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Microplastics in Surface Sediments of Yellow River Delta Wetland	GENG Na, ZHAO Guang-ming, ZHANG Da-hai, <i>et al.</i> (5046)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Farmland Soil in Guyuan	MA Gui, DING Jia-fu, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (5055)
Distribution Characteristics of Microplastic Surface Bacterial Communities Under Flooded and Non-flooded Conditions in Nanjishan Wetland of Poyang Lake	ZHAO Jun-kai, CHEN Xu, HU Ting-ting, <i>et al.</i> (5063)
Influence of Polystyrene Microplastics on the Formation and Structural Change of <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Biofilm	TAO Hui, YU Duo, YANG Lan, <i>et al.</i> (5071)
Effects of Polystyrene Microplastics on Growth, Physiology, Biochemistry, and Canopy Temperature Characteristics of Chinese Cabbage Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	GUO Bing-lin, FENG Chen-chen, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5080)
Effects of Combined Stress of Polyethylene and Sulfamethazine on Seed Germination, Seedling Growth, and Physiological Characteristics of Soybean	ZHAO Xiao-qiong, ZHANG Heng-hui, ZHAO Run-zhu, <i>et al.</i> (5092)
Transport and Model Calculation of Microplastics Under the Influence of Ionic Type, Strength, and Iron Oxide	ZHANG Ran, YU Ke-fei, HUANG Lei, <i>et al.</i> (5102)
Impacts of Land Use and Climate Change on Ecosystem Services in Agro-pastoral Ecotone	XU Wen-bin, RAO Liang-yi (5114)
Response of Organic Carbon Loss to Soil Erosion and Its Drivers: A Meta-analysis	LIU Xiao-lan, HUANG Jin-quan, QI Yu-jie, <i>et al.</i> (5125)
Effects of Balanced Fertilization and Straw Mulching on Soil Nutrients and Stoichiometry in Purple Soil Slope	ZHANG Gao-ming, XU Qi-wen, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (5135)
Characteristics and Dominant Influencing Factors of the Fungal Community Structure in Soils Co-contaminated with Rare Earth Elements and Heavy Metals	LUO Ying, LI Jing-wei, YUAN Hao, <i>et al.</i> (5145)
Effects of Annual Crop Rotation and Fallow on Soil AMF Community and Aggregate Stability	LU Ze-rang, XIA Zi-tai, LU Mei, <i>et al.</i> (5154)
Spatial-temporal Changes and Driving Factors of Soil Microbial Communities in a Typical City of North China Plain	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, CHANG Shuai, <i>et al.</i> (5164)
Effect of High-volume Straw Returning and Applying <i>Bacillus</i> on Bacterial Community and Fertility of Desertification Soil	NIE Yang-mei, BU Lian-yan, CHEN Wen-feng, <i>et al.</i> (5176)
Low Accumulation Characteristics of Sweet-waxy Maize in Pb and Cd Complex Contaminated Soils Based on Field Trials	TANG Le-bin, LI Long, SONG Bo, <i>et al.</i> (5186)
Effects of Different Control Measures on Cadmium and Lead Accumulation and Quality in Lettuce	ZHOU Hong-yin, LI Jia-qi, BAO Li, <i>et al.</i> (5196)
Effects of Nano-copper Oxide on Physiobiochemical Properties of <i>Brassica chinensis</i> L. and Its Heavy Metal Accumulation Under Cadmium Stress	WANG Shi-qi, SUN Yue-bing, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (5204)
Distribution and Biototoxicity of Endogenous Pollutants in <i>Pennisetum</i> sp. Biochar from Different Polluted Areas	LIU Li-ya, CUI Hong-biao, LIU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (5214)
Adsorption Characteristics of Tetracycline by CuFeO ₂ -modified Biochar	LIU Guo-cheng, ZHANG Xin-wang, XIN Shuai-shuai, <i>et al.</i> (5222)
Ecological Toxic Effect of Perfluorinated Compounds on Fish Based on Meta-analysis	LU Hong, ZHOU Jin-yang, YANG Fan, <i>et al.</i> (5231)
Source Analysis and Risk Assessment of Heavy Metals in Soil of County Scale Based on PMF Model	ZHENG Yong-li, WEN Han-hui, CAI Li-mei, <i>et al.</i> (5242)
Potential Source Identification and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Soil of Heze Oil Peony Planting Area Based on PMF-PCA/APCS and PERI	ZHAO Qing-ling, LI Qing-cai, AN Mao-guo, <i>et al.</i> (5253)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Cadmium in Farmland Soils around the Gangue Heap of Coal Mine, Chongqing	MA Jie, SHE Ze-lei, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (5264)
Pollution Characteristics and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Pyrite Concentrated Mining Area in Anhui Province	JIA Han, LIU Jun-xing, WANG Xiao-guang, <i>et al.</i> (5275)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Typical River Source Areas of Northeastern Hunan Province	YANG Zhen-yu, LIAO Chao-lin, ZOU Yan, <i>et al.</i> (5288)
Variation Characteristics of Exogenous Cadmium with Different Contents in Red Soil	ZHOU Zi-yang, PANG Rui, SONG Bo (5299)
Analysis of Carbon Storage Potential of CO ₂ Foamed Concrete	ZHANG Yuan, TA Xu-peng, QIN Shu-bing, <i>et al.</i> (5308)
Research on the Screening Method of Priority Pollutants with Integrated Environmental Socio-economic Indicators: Example of E-waste Dismantling	CHEN Yuan, CAI Zhen, LI Jin-hui (5316)