

目次

基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测	陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 (1)
粤港澳大湾区大气PM _{2.5} 浓度的遥感估算模型	代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 (8)
典型输送通道城市冬季PM _{2.5} 污染与传输变化特征	代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 (23)
郑州市夏季PM _{2.5} 中二次无机组分污染特征及其影响因素	和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 (36)
重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析	彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 (48)
2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析	陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 (61)
2020年“三连击”台风对我国东部地区O ₃ 污染的影响分析	花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 (71)
北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析	张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 (81)
机动车减排降碳综合评价体系综述	范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 (93)
基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景	杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 (104)
广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力	翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 (115)
给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素	张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 (123)
中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评估	窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 (131)
太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评估	张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 (140)
水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价	张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 (151)
长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析	姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 (159)
珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用	李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 (173)
富春江水库浮游植物功能群变化的成因	张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 (181)
合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制	陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 (194)
新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素	李军, 欧阳宏涛, 周金龙 (207)
京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素	李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 (218)
近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析	王耕, 张芙蓉 (228)
光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望	田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 (239)
大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因	石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 (248)
西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究	徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 (262)
不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响	崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 (275)
基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测	帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 (287)
基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测	石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 (300)
长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态	胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 (314)
漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子	申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 (323)
不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响	陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 (335)
紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征	李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 (343)
氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响	薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 (354)
重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析	梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 (364)
中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展	刘浩然, 邢静怡, 任文杰 (376)
基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测	解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 (386)
基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析	马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 (396)
铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析	李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 (407)
天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价	李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 (417)
基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应	唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 (429)
腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值	胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 (439)
生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复	吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 (450)
人体微塑料污染特征及健康风险研究进展	马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 (459)
聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜(<i>Lactuca sativa</i>)生理生态的影响	牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 (470)
转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制	刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (480)
微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响	赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 (489)
微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响	刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 (496)
民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测	王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 (508)
不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应	郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 (520)
厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响	刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 (530)
土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征	陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 (543)
叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响	梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 (555)
昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析	王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 (567)
基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征	黄福义, 周曙屹, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 (576)
城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素	刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 (584)
氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制	刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 (594)
CO ₂ 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb ²⁺ 吸附性能对比	江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 (606)

基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测

石晶^{1,2}, 石培基^{1,2*}, 王梓洋^{1,2}, 程番苑^{1,2}

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070)

摘要: 基于“双碳”战略背景探讨西北干旱区土地利用变化对碳储量的影响及碳储量空间分异驱动因素, 对提高区域生态系统碳汇增量和促进区域碳收支平衡具有重要意义. 中国西北干旱区为自然生态极端脆弱区, 随着新型城镇化快速推进, 土地利用变化速率明显加快并对生态系统碳储量及固持能力产生一定影响. 运用PLUS-InVEST模型模拟了酒泉市2035年自然发展、集约发展、水资源约束和生态保护情景下碳储量的时空演变特征, 并采用参数最优地理探测器模型分析了碳储量空间分异驱动力. 结果表明: ①1990~2020年酒泉市耕地、水域和建设用地面积呈显著增加趋势, 其余土地利用类型面积呈减小趋势. ②1990~2020年酒泉市碳储量从7 722 808.1 t增至7 784 371 t, 草地转换成未利用地是造成区域碳储量损失的主要原因, 占损失总量的85%. ③2035年4种发展情景的碳储量均为增加趋势, 其中生态保护情景增幅最为显著, 增量为76 989.29 t. ④土地利用程度、人口密度、GDP密度和NDVI是酒泉市碳储量空间分异的主要驱动因子, 其中土地利用程度解释力最强(q 值为0.849), 自然与人为因子的交互作用增强了各因子对碳储量空间分异的解释力. 研究结果可为酒泉市生态系统综合管理及国土空间优化提供科学基础和决策依据.

关键词: 碳储量; InVEST模型; PLUS模型; 参数最优地理探测器; 酒泉市

中图分类号: X144 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2024)01-0300-14 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202302222

Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model

SHI Jing^{1,2}, SHI Pei-ji^{1,2*}, WANG Zi-yang^{1,2}, CHENG Fan-yuan^{1,2}

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on the background of carbon peaking and carbon neutrality goal strategies, it is important to explore the impact of land use change on carbon storage and the drivers of spatial variation in carbon storage in the Northwest Arid Zone, which is vital to improve the carbon sink increment of the regional ecosystem and promote the regional carbon breakeven. The arid region of northwest China is an extremely fragile natural ecology, and with the rapid advancement of new urbanization, the rate of land use change has accelerated significantly, which has a certain impact on the carbon storage and fixation capacity of ecosystems. The PLUS-InVEST model was used to simulate the spatial and temporal evolution characteristics of carbon storage under natural development, intensive development, water resource constraint, and ecological protection scenarios in Jiuquan City in 2035, and the parameter optimal geographic detector model was used to analyze the spatial divergence drivers of carbon storage. The results showed that: ① the area of cultivated land, watershed, and construction land in Jiuquan City showed a significant increasing trend from 1990 to 2020, whereas the area of the remaining land use types showed a decreasing trend. ② The carbon storage in Jiuquan City increased from 7 722 808.1 t to 7 784 371 t from 1990 to 2020, and the conversion of grassland into unused land was the main cause of the loss of regional carbon storage, accounting for 85% of the total loss. ③ All four development scenarios in 2035 showed an increasing trend of carbon storage, among which the ecological protection scenario had the most significant increase, with an increment of 76 989.29 t. ④ The degree of land use, population density, GDP density, and NDVI were the main driving factors of the spatial variation in carbon storage in Jiuquan City, among which the degree of land use had the strongest explanatory power (q value of 0.849), and the interaction of natural and anthropogenic factors enhanced the explanatory power of each factor on the spatial variation in carbon storage. The results of the study can provide a scientific basis and decision basis for the integrated ecosystem management and territorial space optimization in Jiuquan City.

Key words: carbon storage; InVEST model; PLUS model; parameter optimal geographic detector; Jiuquan City

气候变化作为全球性热点话题之一,是当前人类社会面临的重大挑战.气候变化将导致全球范围极端天气频发和局部区域生态环境持续退化等问题.1990年以来,IPCC六次评估报告陆续表明人类活动对气候变化贡献度及影响的可能性明显增强.为积极应对全球气候变化,中国政府向国际社会做出2030年碳达峰、2060年碳中和的重要承诺,并将其纳入“十四五”规划.土地利用变化作为人类活动影响气候变化最直接的表现形式,主要通过地类转换改

变陆地生态系统中植被和土壤的碳循环过程,进而影响区域碳储量变化^[1].有研究表明,土地利用变化造成的碳排放已成为仅次于化石燃料燃烧的第二大温室气体排放源^[2,3].目前,土地利用结构调整和布局优化被认为是最经济有效的固碳途径,可有效推进

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771130)

作者简介: 石晶(1997~),男,硕士,主要研究方向为土地利用优化及碳储量评估, E-mail: shijingnwnu@126.com

* 通信作者, E-mail: xbsdspj@163.com

形成绿色低碳发展模式和建立健全“双碳”政策体系。中国西北干旱区生态环境本底脆弱,是碳达峰、碳中和的重点和难点区域,持续巩固提升干旱区生态系统碳汇增量迫在眉睫。因此,基于土地利用变化视角定量评估干旱区城市生态系统碳储量时空演变特征及空间分异驱动力,对加快落实“双碳”战略目标和推动构建减污降碳及协同管控的生态保护空间格局具有重要现实意义^[4,5]。

近年来,基于土地利用模拟模型预测未来多情景下碳储量变化的研究成果已较为丰富。土地利用模拟是碳储量多情景评估的基础,目前应用较为广泛的土地利用模拟模型主要有 CA-Markov^[6,7]、SD^[8]、ABM (agent-based model)^[9]、CLUES-S^[5] 和 GeoSOS^[10] 等模型。如朱文博等^[5]采用 Markov-CLUE-S 复合模型和 InVEST 模型评估了太行山淇河流域 2025 年自然发展、生态保护和耕地保护 3 种情景下土地利用变化对碳储量的影响。赫晓慧等^[11]采用 Dyna-CLUE 模型和 InVEST 模型预测了中原城市群 2030 年不同土地利用发展情景下碳储量变化特征。但随着区域发展对土地利用规划要求的进一步提高,这些模型已然不能满足模拟需求,它们一般只考虑空间规划政策的约束作用(如保护区、禁建区),忽略了空间规划政策对未来土地变化的驱动和引导(开发区规划、交通规划)机制,因而存在一定局限性^[12]。PLUS 模型集成了基于随机森林的规划开发区和交通规划随机种子机制,在模拟过程中能挖掘土地利用变化机制,填补城市发展中由空间规划政策引导土地利用变化的模拟需求^[13],其结果可更好地支持空间规划政策实施及未来碳储量多情景评估。在情景设置方面,诸多研究遵循国家宏观战略要求,以兼顾生态经济协调发展和统筹空间要素协同优化为目标设置情景,但同时也缺乏区域针对性,无法揭示生态环境、资源现状及发展水平的空间差异。如传统的城市发展和耕地保护情景是在满足人口增长和经济发展需求的基础上对耕地和建设用地面积进行最低限制^[14,15]。但对干旱区而言,水资源是制约其发展的主要因素,“以水定需、量水而行”是干旱区致力可持续发展的先决条件,盲目增加耕地和城镇用地面积势必会过度消耗水资源,导致生态环境逐步退化^[16,17],进而对区域生态系统碳储量造成损失。因此,在情景设置中还需考虑限制区域发展的客观因素,并根据区域发展现状及需求设置具有针对性和符合未来发展趋势的情景。

酒泉市位于中国西北干旱区,是甘肃省乃至全国沙漠化最严重和水资源最为缺乏的地区之一^[18],水资源短缺是制约酒泉市经济发展的主要因素。近

年来,酒泉市为提高用水效率和缓解生态压力,政府先后出台了《关于加快节水型社会建设的实施意见》和《酒泉市地下水资源管理办法》等系列水资源管控政策,并取得一定成效。但随着人口增长和城镇规模持续扩张,区域内耕地和建设用地面积不断增加,农业和城镇用水总量居高不下,生态环境依旧面临威胁,对提高区域生态系统碳储量产生严重影响。基于此,本文根据酒泉市自然地理特征和发展需求设置自然发展、集约发展、水资源约束和生态保护这 4 个未来发展情景,采用 PLUS-InVEST 模型预测 2035 年不同发展情景的土地利用和碳储量变化趋势,并分析土地利用变化对碳储量的影响及碳储量空间分异驱动机制,以期为加快酒泉市节水型社会建设及促进生态经济协调发展提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

酒泉市(图 1)位于中国西北内陆地区($38^{\circ}09' \sim 42^{\circ}48'N$, $92^{\circ}20' \sim 100^{\circ}20'E$),全市辖一区(肃州区)两市(玉门市和敦煌市)四县(金塔县、瓜州县、肃北蒙古族自治县和阿克塞哈萨克族自治县),全市戈壁荒漠及沙化土地面积占 66.8%,适宜人类居住的绿洲面积仅占 8.7%^[19]。2022 年常住人口 105.31 万人,生产总值 840.9 亿元。酒泉市地势南北高、中间低,自西南向东北倾斜,南部为阿尔金山及祁连山,北部为马鬃山,中间地势相对平缓,整体海拔在 660 ~ 5 842 m 之间。区域内光热资源丰富,年平均降水量仅有 40 ~ 176 mm,蒸发量高达 2 100 ~ 3 100 mm,是典型的大陆性干旱气候。酒泉市境内有疏勒河、黑河和哈尔腾河三大主要水系,均发源于南山冰川积雪区,可利用水资源量约为 $3.1 \times 10^9 m^3$,每 km^2 国土面积水资源量仅有 $2.1 \times 10^5 m^3$,是全国平均水平的 1/17,水资源短缺是长期制约酒泉市经济发展的关键因素。

1.2 数据来源

本文涉及数据主要包括土地利用、高程、人口密度、GDP 密度、气象、道路、市级政府驻地、水资源及碳密度数据。其中,土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。该土地利用数据是采用人机交互目视判读方式解译,空间分辨率为 30 m,总体精度均在 88.95% 以上,包括 6 个一级分类和 25 个二级分类。DEM 数据由地理空间数据云平台(www.gsccloud.cn)提供,坡度数据利用 DEM 数据计算得到。人口密度、GDP 密度、气象、道路和市级政府驻地数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(www.resdc.cn)。水资源数据来源于《甘肃省水资源公报》。碳密度数

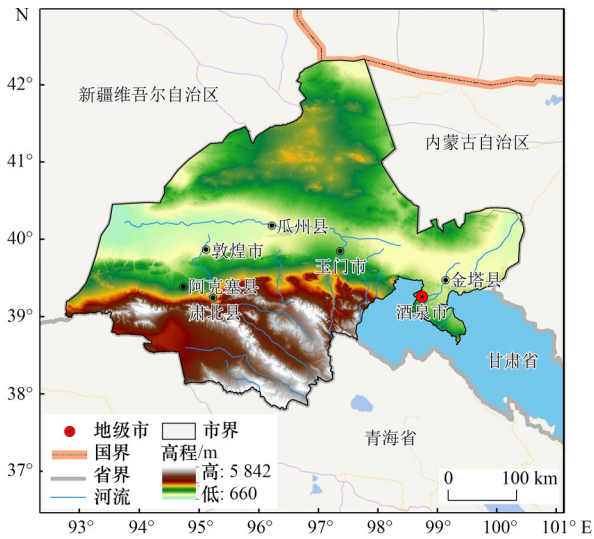


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

据通过查阅相关研究,并根据酒泉市气候条件,对酒泉市碳密度进行修正,最终得到酒泉市各土地利用类型的碳密度^[3,4].

1.3 研究方法

本文研究思路如图2所示,首先利用土地利用、自然和社会经济等数据对2035年土地利用进行多情景模拟,再结合InVEST模型对酒泉市1990~2020年及2035年不同情景的碳储量进行核算并分析其变化趋势.最后从时间上分析土地利用转移对碳储量变化的影响,从空间上探讨高程、坡度和气温等影响因素对碳储量空间分布的影响程度.

1.3.1 InVEST模型和碳密度系数修正

InVEST模型(生态系统服务功能权衡综合评估模型)将生态系统的碳储量划分为4个基本碳库^[1],包括地上生物碳、地下生物碳、土壤碳和死亡有机碳.碳储量计算见公式(1)和公式(2):

$$C_i = C_{i-above} + C_{i-below} + C_{i-soil} + C_{i-dead} \tag{1}$$

$$C_{tot} = \sum_{i=1}^n C_i \times A_i \tag{2}$$

式中, i 为某种土地利用类型; C_i 为第*i*类土地利用类型碳密度; $C_{i-above}$ 、 $C_{i-below}$ 、 C_{i-soil} 和 C_{i-dead} 分别为第*i*类土地利用类型地上植被碳密度($t \cdot hm^{-2}$)、地下植被碳密度($t \cdot hm^{-2}$)、土壤碳密度($t \cdot hm^{-2}$)和死亡有机碳密度($t \cdot hm^{-2}$); C_{tot} 为生态系统碳储总量(t); A_i 为第*i*类土地利用类型面积(hm^2); n 为土地利用类型数量^[20].

碳密度会受区域气候和土壤类型等因素影响,需根据酒泉市气候条件及前人修正方法对碳密度系数进行修正(表1).年均降水量与生物量和土壤碳密度的关系采用Alam等^[21]研究中的修正方法进行修正,年均温与生物量碳密度的关系借鉴Giardina等^[22]和陈光水等^[23]研究中的修正方法进行修正.

$$C_{sp} = 3.3968 \times MAP + 3996.1 \tag{3}$$

$$C_{BP} = 6.798 \times e^{0.0054 \times MAP} \tag{4}$$

$$C_{BT} = 28 \times MAT + 398 \tag{5}$$

式中, C_{sp} 为年均降雨量修正下的土壤碳密度($kg \cdot m^{-2}$);MAP为年均降雨量(mm); C_{BP} 和 C_{BT} 分别为年均降雨量和年均气温修正下得到的生物量碳密度($kg \cdot m^{-2}$);MAT为年均气温($^{\circ}C$).

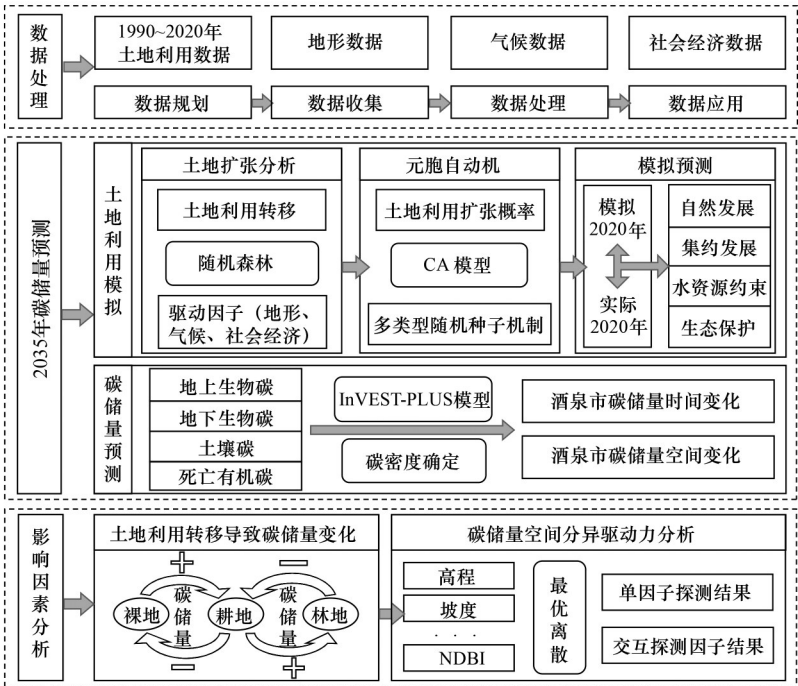


图2 研究思路

Fig. 2 Research framework

$$K_{BP} = C'_{BP}/C''_{BP} \tag{6}$$

$$K_{BT} = C'_{BT}/C''_{BT} \tag{7}$$

$$K_B = K_{BP} \times K_{BT} \tag{8}$$

$$K_S = C'_{SP}/C''_{SP} \tag{9}$$

式中, K_{BP} 为生物量碳密度降雨因子修正系数; K_{BT} 为生物量碳密度气温因子修正系数; K_B 为生物量碳密度修正系数; K_S 表示土壤碳密度修正系数; C' 和 C'' 分别为酒泉市及全国碳密度数据。

1.3.2 PLUS 模型介绍

PLUS 模型包括土地扩张分析策略(LEAS)和基于多类型随机斑块种子的元胞自动机(CA)这两个模块^[24]。在 LEAS 模块中首先提取土地利用类型扩张区域,并结合随机森林算法分析土地扩张与驱动因子间的关系。在 CARS 模块中需对土地利用转换规则和领域权重等参数进行设置。其中,转换规则是结合前人研究成果和研究区特征设置^[25],领域权重是根

表 1 酒泉市不同土地利用类型碳密度/t·hm⁻²

Table 1 Carbon density of different land use types in Jiuquan City/t·hm⁻²

土地利用类型	地上生物量碳密度	地下生物量碳密度	土壤碳密度	死亡有机碳密度	合计
耕地	1.1	15.3	82.01	13	111.40
林地	11.11	22	157.55	13	203.66
草地	6.7	16.4	127.31	2	152.41
水域	0.6	0	0	0	0.6
建设用地	0.5	0	0	0	0.5
未利用地	0.2	0	22.49	0	22.69

据各类型土地扩张面积与区域总面积的比值确定。根据已有研究经验和酒泉市实际情况,选取了高程、坡度、气温、降水、距水域距离、距公路距离、距居民点距离、距铁路距离、距政府距离、人口密度和 GDP 密度这 11 个驱动因子进行土地利用模拟^[4](图 3)。

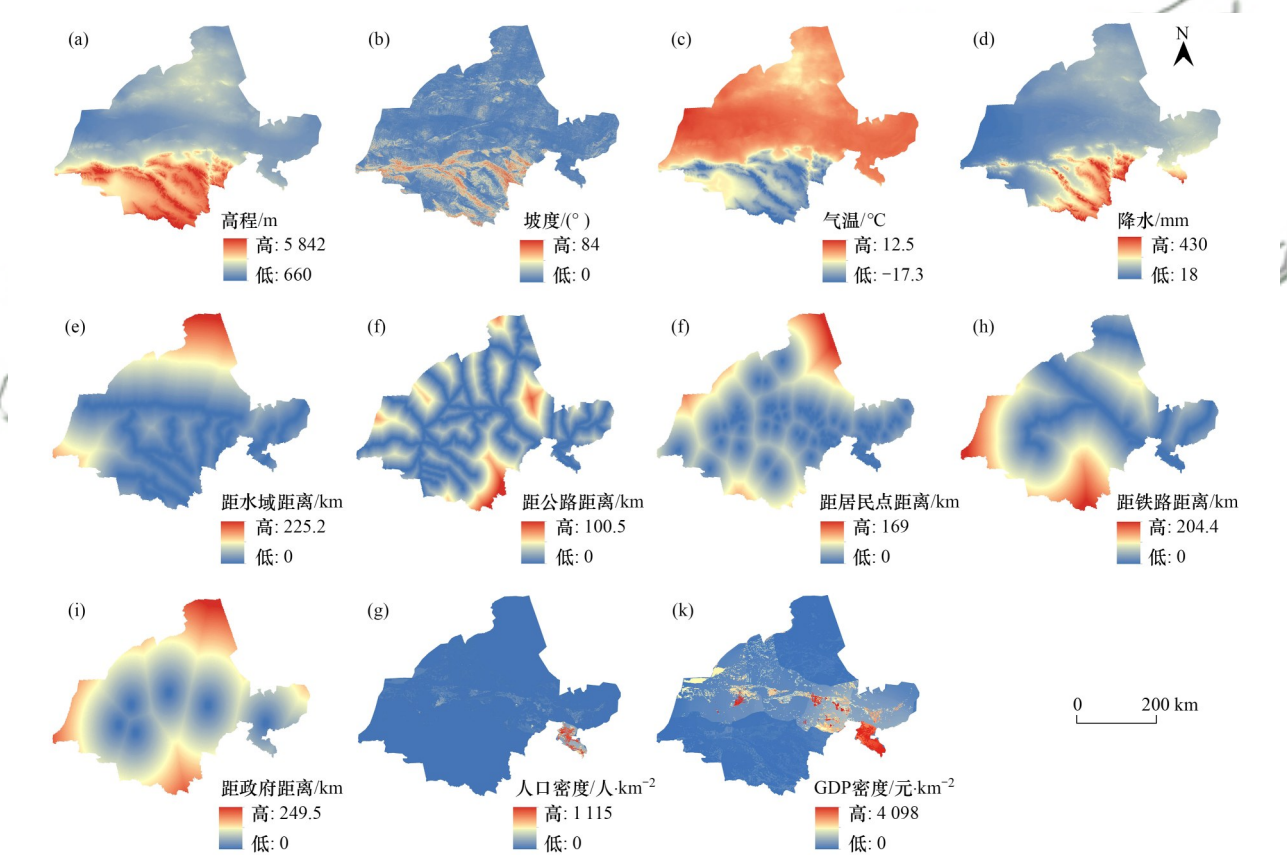


图 3 酒泉市土地利用变化影响因素
Fig. 3 Influencing factors of land use change in Jiuquan City

1.3.3 PLUS 模型检验

本文以 2010 年为初始年份模拟 2020 年土地利用数据,对 2020 年土地利用模拟结果进行一致性检验(图 4)。结果显示 Kappa 值为 0.887,总体精度为 95.89%。一般情况下,当 Kappa≥0.75 时,实际数据和模拟结果的一致性较高^[26]。因此,该模型模拟的 2020 年土地利用数据结果精度较高,可以用于模拟酒泉

市 2035 年土地利用变化情况。

1.3.4 情景设置

情景模拟旨在预测未来不同发展情景的土地利用变化趋势,为区域发展决策提供借鉴。综合《甘肃省国土空间规划(2019—2035 年)》中酒泉市未来发展规划要求和自然地理特征设定了以下 4 种情景;

(1)自然发展情景(SN) 此情景为参考情景,完

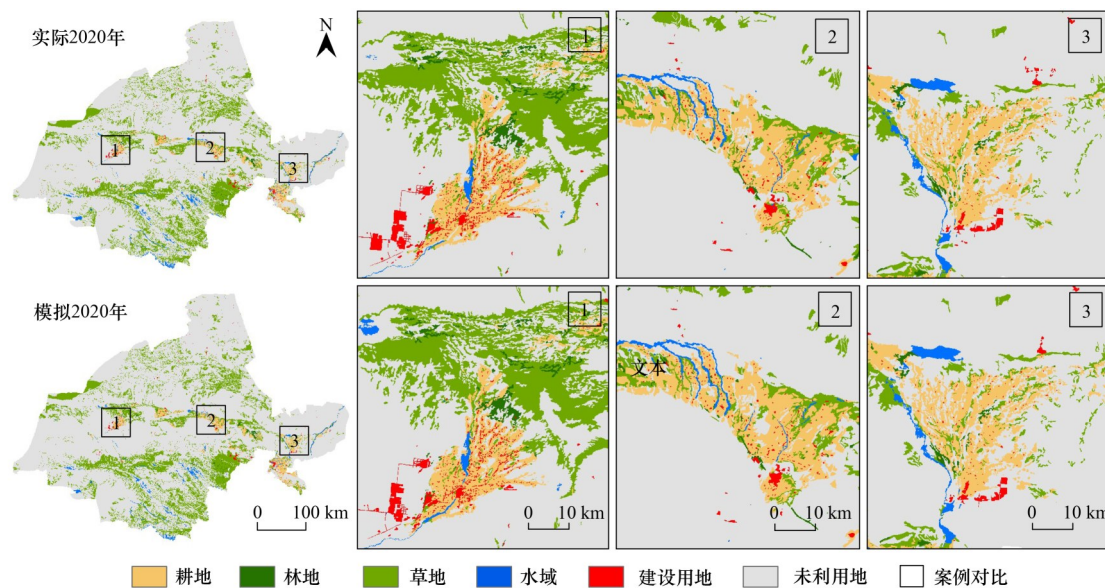


图4 酒泉市2020年土地利用模拟结果和实际数据对比

Fig. 4 Comparison of land use simulation results and actual data in Jiuquan City in 2020

全遵循1990~2020年间的土地利用变化规律,不考虑发展政策及规划要求,对土地利用类型转变规则不做任何限制。

(2)集约发展情景(SI) 在此情景中并不盲目追求经济增长和城镇规模扩张,而是在满足人口和经济增长的同时实现集约发展。根据《甘肃省国土空间规划(2019—2035年)》对酒泉市未来城镇开发边界(图4)进行限制,并根据规划要求设定2035年建设用地面积不少于531.4 km²。同时禁止建设用地向其它地类转换,并增加城镇开发边界内其它地类向建设用地的转换概率。

(3)水资源约束情景(SW) 根据生产生活实践,本文将区域用水类型划分为农田灌溉、林牧渔畜、生产生活(包括工业、城镇公共和居民生活用水)和生态环境用水四大类^[27]。假设各类用地单位面积用水量不变,则农田灌溉用水量与耕地面积以及生产生活用水量与建设用地面积直接相关。以年均每m²耕地需水量和年均每m²建设用地综合需水量约束2035年耕地和建设用地最大面积。《甘肃省国土空间规划(2019—2035年)》规定2035年酒泉市用水总量应控制在22.45亿m³内,考虑到用水效率问题,本文只计算了2016~2020年期间的年均每平方米耕地和建设用地综合需水量,分别为0.538 m³·m⁻²和0.259 m³·m⁻²。2035年最大耕地和建设用地面积计算如下。

区域用水总量计算见公式(10):

$$W = W_a + W_f + W_{pl} + W_e \quad (10)$$

多年平均用水总量计算见公式(11):

$$\bar{W} = \bar{W}_a + \bar{W}_f + \bar{W}_{pl} + \bar{W}_e \quad (11)$$

式中, W 为用水总量; W_a 为农田灌溉用水; W_f 为林牧渔畜用水; W_{pl} 为生产生活用水; W_e 为生态环境用水; $\bar{W}$ 为年均用水总量。2035年最大耕地和建设用地面积计算见公式(12)和公式(13):

$$S_{b35} \leq W_{35} \frac{\bar{W}_a}{0.538 \bar{W}} \quad (12)$$

$$S_{b35} \leq W_{35} \frac{\bar{W}_{pl}}{0.259 \bar{W}} \quad (13)$$

式中, W_{35} 为2035年用水总量; S_{b35} 和 S_{b35} 分别为2035年耕地和建设用地面积。最终计算得出在水资源约束情景下2035年耕地和建设用地面积应在3481.2 km²和538.2 km²之内。在此情景中为提高水资源保护力度,设置禁止水域向其它地类转换。

(4)生态保护情景(SE) 综合考虑酒泉市粮食安全及资源环境承载力,为提高生态保护力度需加入耕地保护和生态环境保护理念,将《甘肃省国土空间规划(2019—2035年)》要求的永久基本农田保护区、生态保护区以及水域设为禁止转换区(图5)。

1.3.5 土地利用程度指数

土地利用程度不仅可以表征土地的自然属性,也可反映人类对土地的综合利用程度。土地利用程度与生态系统结构和功能的转变密切相关,计算见公式(14):

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \quad (14)$$

式中, L 为土地利用程度指数; A_i 为第*i*类土地利用程度分级指数; C_i 为第*i*类土地利用类型面积占总面积的百分比; n 为土地利用程度分级数^[27]。本研究将土地利用分为4级,未利用地分级指数为1,林地、草地和水域为2,耕地为3,建设用地为4^[28]。

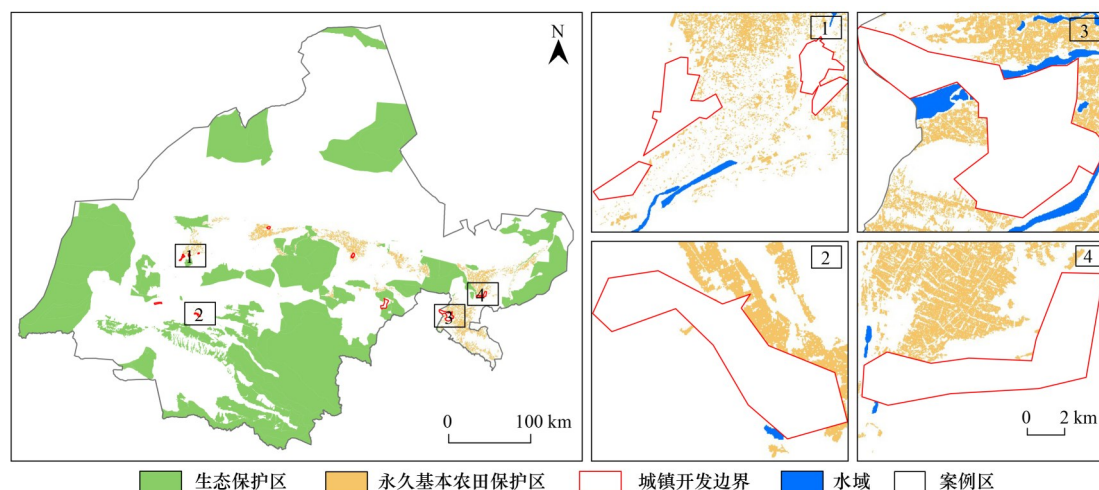


图5 酒泉市限制转换区域

Fig. 5 Restricted conversion area in Jiuquan City

1.3.6 参数最优地理探测器

地理探测器能对碳储量与筛选出的因子进行探测分析,揭示其空间分异驱动力.传统地理探测器对连续型变量进行离散化时具有较强的主观性,一定程度上影响空间分层异质性最佳尺度的确定.本文借助R语言中的GD包,运用相等间隔、自然断点、分位数、几何间隔和标准差5种分类方法^[29],将分类等级数设置为5~10类,从中选择 q 值最高的参数组合方式进行空间离散化.通过计算单一因子 $q[q(X1), q(X2)]$ 值及双因子交互 q 值 $q(X1 \cap X2)$ 判断双因子是否存在交互作用及交互作用的程度. q 值计算见公式(15)和公式(16):

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (15)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2 \quad (16)$$

式中, q 为因子解释力,值域为 $[0, 1]$,值越大解释力越强; h 为解释变量或被解释变量的分层(Strata); N_h 和 N 为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别代表层 h 和全区 Y 值的方差; SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差^[30].

2 结果与分析

2.1 土地利用变化特征分析

酒泉市未利用地覆盖了79%的面积,是主要的景观类型(表2).耕地、林地和建设用地主要分布在疏勒河和黑河两岸的绿洲区(图6).草地除在疏勒河沿岸呈水平带状分布外,在瓜州北部、玉门南部及阿克塞和肃北分布均较广泛.其余区域均为未利用地.研究期间各类用地面积均有所变化.1990~2020年间,耕地、水域和建设用地面积均呈显著增加趋势,

尤其是耕地和建设用地在2000年后增幅明显加快,30年内分别增加了899.86 km²和229.22 km².林地、草地和未利用地面积总体呈减小趋势,分别减少了12.57、51.06和1259.41 km².其中,耕地面积的增加主要是由草地和未利用地转换而来(表3),分别占耕地转入总面积的27.64%和62.9%.水域面积的增加主要是由未利用地转换而来,占水域转入总面积的84.05%,建设用地面积的增加主要由耕地、草地和未利用地转换而来,分别占建设用地转入总面积的9.73%、9.17%和79.88%.综上,未利用地向其它地类转换、草地向耕地和建设用地转换以及耕地向建设用地转换是研究区土地利用类型转换的主要方式.

2035年模拟结果显示,酒泉市4种情景的土地利用空间分布格局基本一致,但不同情景各类用地变化有所差异.在自然保护和集约发展情景中,林地和未利用地面积呈减少趋势,其余地类均呈增加趋势.自然保护情景中因延续历史发展规律建设用地面积增幅最大,主要以外延式扩张为主(图6),对草地和耕地的侵占作用较为明显.而在集约发展情景中建设用地面积增幅相对较小,扩张方式明显不同于自然发展情景,分别在敦煌、瓜州、玉门和酒泉等绿洲区的城镇开发边界内扩张较为显著,主要以填充式为主.可见,城镇开发边界将在一定程度上限制建设用地扩张趋势,对生态用地起到一定的保护作用.在水资源约束和生态保护情景中,除未利用地面积减小外其余地类均呈增加趋势.因受2035年用水总量限制,水资源约束情景中耕地和建设用地面积增幅最小.在生态保护情景中因对生态环境保护力度大,耕地、林地、草地和水域面积增幅最大,且主要由未利用地转换而来.综上,生态保护情景

表 2 酒泉市 1990~2035 年各土地利用类型面积
Table 2 Area of Jiuquan City by land use type from 1990 to 2035

项目		1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	2035 年			
						自然发展	集约发展	水资源约束	生态保护
耕地	面积/km ²	2 580.49	2 594.17	3 265.09	3 480.35	3 718.43	3 722.94	3 480.61	3 992.90
	占比/%	1.54	1.55	1.95	2.08	2.22	2.22	2.08	2.38
林地	面积/km ²	729.08	729.79	717.14	716.51	703.71	706.68	724.68	737.96
	占比/%	0.43	0.44	0.43	0.43	0.42	0.42	0.43	0.44
草地	面积/km ²	27 721.33	27 719.17	27 806.71	27 670.27	27 724.43	27 726.69	27 843.67	27 906.66
	占比/%	16.53	16.53	16.59	16.51	16.54	16.54	16.61	16.65
水域	面积/km ²	1 424.61	1 431.90	1 522.67	1 618.98	1 701.37	1 701.42	1 705.91	1 710.41
	占比/%	0.85	0.85	0.91	0.97	1.01	1.01	1.02	1.02
建设用地	面积/km ²	279.22	285.09	283.71	508.44	638.87	603.34	538.13	553.88
	占比/%	0.17	0.17	0.17	0.30	0.38	0.36	0.32	0.33
未利用地	面积/km ²	134 912.82	134 886.23	134 049.60	133 653.41	133 160.37	133 186.90	133 354.96	132 746.14
	占比/%	80.48	80.46	79.96	79.72	79.43	79.44	79.54	79.18

表 3 酒泉市 1990~2020 年土地利用转移矩阵/km²
Table 3 Jiuquan City land use transfer matrix from 1990 to 2020/km²

2020 年	1990 年						合计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
耕地	2 466.46	4.33	29.79	8.57	28.20	43.02	2 580.49
林地	29.88	611.99	20.08	5.83	1.47	59.77	729.08
草地	276.53	64.73	26 477.34	28.22	26.20	846.31	27 721.33
水域	16.64	0.85	18.63	1 315.84	2.11	68.86	1 424.61
建设用地	50.70	0.87	2.56	3.04	219.56	2.49	279.22
未利用地	639.98	33.74	1 119.90	257.06	230.90	132 625.03	134 912.82
合计	3 480.35	716.51	27 670.27	1 618.98	508.44	133 653.41	167 637.48

中耕地、林地、草地和水域面积均大于其它情景,生态保护发展模式可在一定程度上改善区域生态环境质量.

2.2 碳储量变化特征分析

2.2.1 时间变化特征

由表 4 可知,1990~2020 年酒泉市碳储量虽先增后减,但总体呈增加趋势,增量为 61 562.87 t. 其中 1990~2010 年碳储量呈增加趋势,主要原因是由耕

地面积增加所致. 而在 2010~2020 年碳储量呈小幅减小趋势,其原因是这一时期建设用地面积迅速扩张,10 年间增加了 224.73 km²,建设用地扩张使得林地和草地面积萎缩,进而导致区域碳储量有所减小. 从土地利用类型看,草地碳储量贡献最大,贡献率均值为 54.338%,其次是未利用地和耕地,贡献率均值分别约为 38.996% 和 4.795%,林地、水域和建设用地贡献率均值较小,分别为 1.885%、0.012% 和

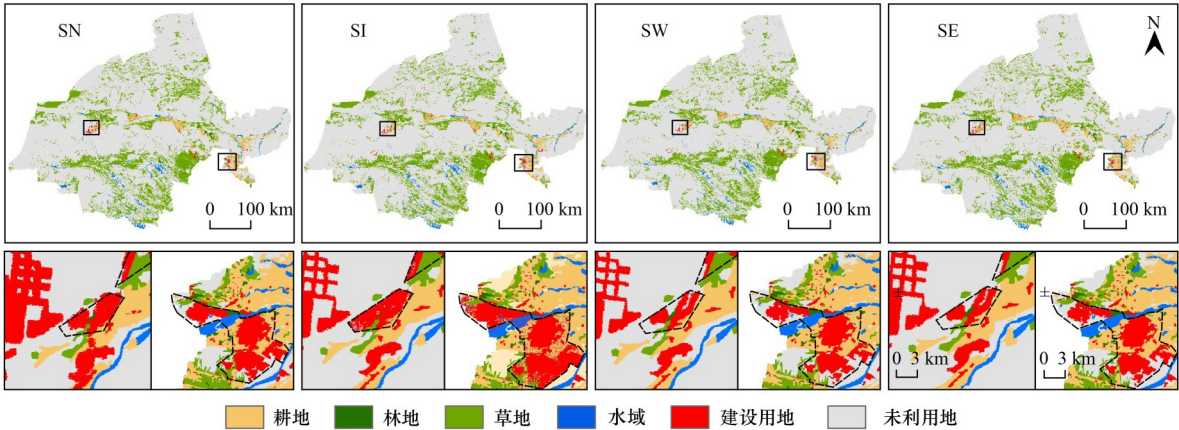


图 6 酒泉市 2035 年不同情景土地利用分布

Fig. 6 Land use distribution map of Jiuquan City in different scenarios in 2035

0.003%.

相比 2020 年,2035 年自然发展、集约发展、水资源约束和生态保护这 4 个情景的碳储量均呈增加趋势,分别增加了 21 098.87、23 134.86、21 416.19 和 76 989.29 t. 从各土地利用类型看,4 种情景下耕地、草地、水域和建设用地碳储量均有所增加,未利用地碳储量则有所减少. 其中自然发展情景碳储量增幅最小,表明传统的发展模式已不适合酒泉市未来发展趋势,需及时调整发展策略. 水资源约束情景中为实现 2035 年节约用水目标对耕地面积进行约束,相

比其它情景一定程度上减弱了此情景耕地的固碳作用. 集约发展中因对城镇开发边界进行约束,对绿洲区的耕地和草地起到了较好的保护作用,再加上未利用地向其它地类的转化,使得研究区整体固碳能力和碳储量明显增加. 生态保护情景中因对耕地、林地、草地和水体等生态用地保护力度加强,使得该情景碳储量增幅最高. 相比其它 3 种情景,该情景中耕地、林地、草地和水体的碳储量增幅均最为明显,表明生态保护情景是提高酒泉市生态系统碳储量的最佳发展模式.

表 4 酒泉市 1990 ~ 2035 年各土地利用类型碳储量及贡献率¹⁾

Table 4 Carbon storage and contribution rate of various land use types in Jiuquan City from 1990 to 2035

项目	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	2035 年				贡献率 均值
					自然发展	集约发展	水资源约束	生态保护	
耕地	287 474.33	288 998.32	363 740.82	387 721.43	414 244.26	414 746.68	387 750.40	444 821.04	4.795
林地	148 484.90	148 629.50	146 053.19	145 924.89	143 318.03	143 922.90	147 588.79	150 293.41	1.885
草地	4 224 952.46	4 224 623.26	4 237 965.06	4 217 170.51	4 225 424.93	4 225 769.37	4 243 598.06	4 253 198.24	54.338
水域	854.77	859.14	913.60	971.39	1 020.82	1 020.85	1 023.55	1 026.25	0.012
建设用地	139.61	142.55	141.86	254.22	319.43	301.67	269.07	276.94	0.003
未利用地	3 060 902.06	3 060 298.79	3 041 317.32	3 032 328.57	3 021 142.40	3 021 744.39	3 025 557.33	3 011 744.42	38.996
合计	7 722 808.13	7 723 551.55	7 790 131.85	7 784 371.00	7 805 469.87	7 807 505.86	7 805 787.19	7 861 360.29	100

1)碳储量单位为 t,贡献率单位为 %

2.2.2 空间变化特征

如图 7 所示,酒泉市 1990 ~ 2020 年和 2035 年 4 种情景的碳储量空间分布格局基本一致. 南部阿尔金山和党河南山等地区因常年受冰川积雪融水补给,植被覆盖度较高,碳储量也较高. 中部区域碳储量高值区主要沿疏勒河呈水平带状分布,其中敦煌、瓜州和玉门等绿洲区域碳储量高值最为集中. 北部地区以马鬃山为中心的局部区域碳储量较高.

为更加清晰地反映不同时段碳储量的空间演变趋势,本文将酒泉市 1990 ~ 2020 年以及 2020 ~ 2035 年各情景的碳储量进行空间叠加分析和可视化处理,将碳储量空间变化类型分为减少区($< -100 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$)、几乎不变区(增减量 = $\pm 100 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$)和增加区(增加量 $> 100 \text{ kg}\cdot\text{km}^{-2}$)这 3 类. 统计不同时段内碳储量的空间变化对识别生态环境恶化区、制定多元生态调控对策至关重要. 1990 ~ 2020 年酒泉市碳储量基本不变区、减少区和增加区分别占区域总面积的 91.69%、3.73% 和 4.85%. 碳储量变化较为明显的区域主要集中在黑河及疏勒河流域的绿洲区,该区因受城市建设及耕地开发影响,土地利用类型转换较为频繁,导致碳储量空间变化明显. 除绿洲区外,其余地区也有较为明显的变化,但分布较为零散. 2020 ~ 2035 年各情景碳储量空间变化存在一定差异. 在自然发展和集约发展情景下中部和东部地

区建设用地和耕地扩张明显,碳储量明显降低. 集约发展情景中因对城镇开发边界进行限制,一定程度上缓解了部分区域碳储量的减小趋势,同时该区也伴随着未利用地向碳储量较高的其它地类转变,因此也有明显的碳储量增加区. 而在水资源约束和生态保护情景中建设用地扩张面积相对较小,在中部和东部地区碳储量并无明显减小现象. 其中,生态保护情景中研究区南部、中部和北部地区碳储量增加最为显著.

2.3 地类转换对碳储量变化的影响

因不同土地利用类型碳密度差异的影响,区域地类发生转变必然会导致碳储量变化. 本文对酒泉市 1990 ~ 2020 年间由地类转换引起的碳储量变化进行定量分析(表 5). 结果显示,1990 ~ 2020 年间酒泉市耕地、林地和草地向其它地类转换使得总碳储量损失较为明显,其中耕地大面积转换为水域、建设用地和未利用地导致总碳储量损失 6 372.55 t. 林地向其它地类转换导致总碳储量损失 16 185.04 t,草地转换为耕地、水域、建设用地和未利用地导致总碳储量损失 126 168.87 t,草地面积大量转换成未利用地是造成碳储量损失的主要原因,约占损失总量的 85%. 水域、建设用地和未利用地转换使得总碳储量增加了 6 355.32、6 577.31 和 197 356.71 t. 综上,耕地、林地和草地向其它地类转换是造成生态系统碳

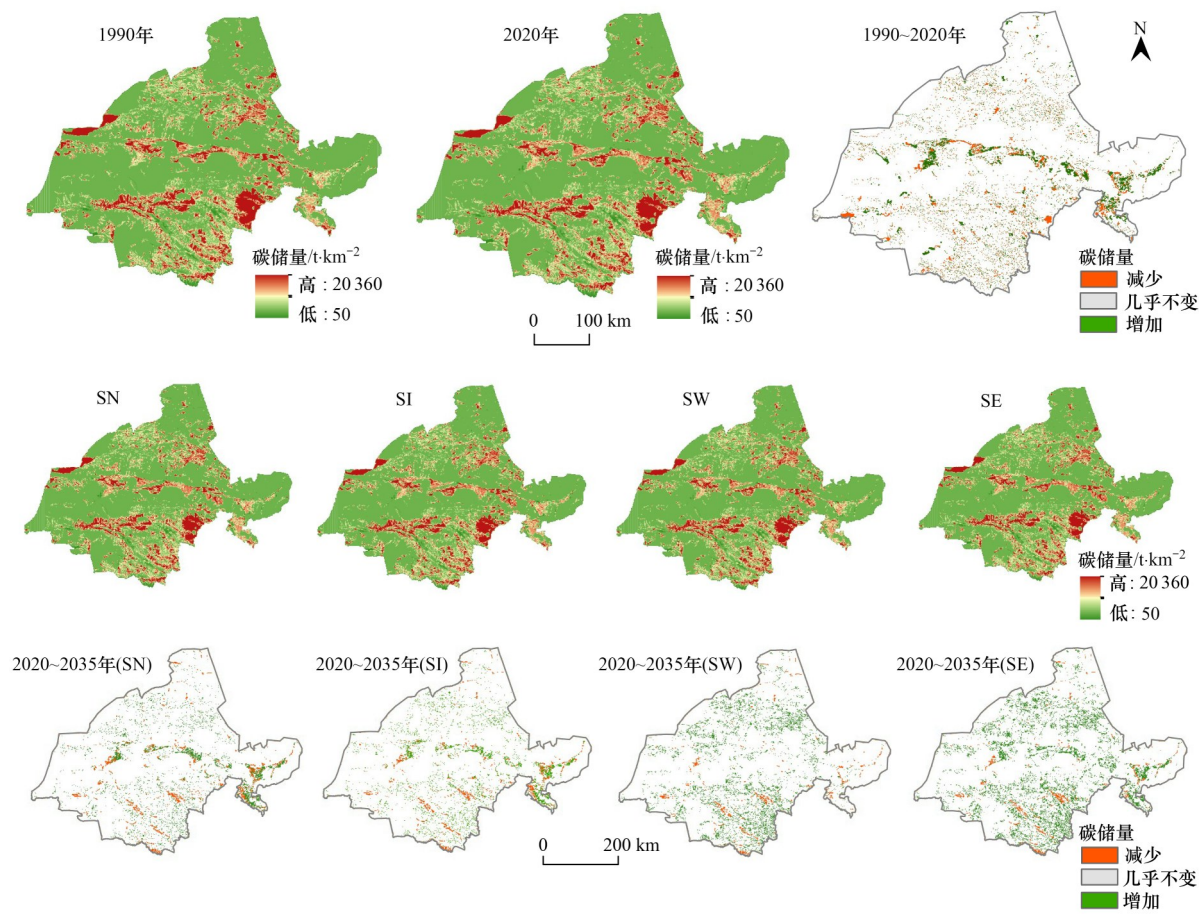


图7 酒泉市1990~2035年碳储量空间分布及变化

Fig. 7 Spatial distribution and variation in carbon storage in Jiuquan City from 1990 to 2035

损失和改变区域碳收支平衡的关键因素,加强对耕地、林地和草地的保护力度、积极实施生态保护重大修复工程是提高区域碳储量的必要手段.

2.4 碳储量空间分异驱动因素

本文选择高程(X1)、坡度(X2)、气温(X3)、降水(X4)、NDVI(X5)、土地利用程度(X6)、人口密度

(X7)、GDP密度(X8)和MNDWI(X9)这9个影响因子对酒泉市碳储量空间分异驱动力进行分析,并对其进行最优离散化处理(图8). 结果显示,不同离散方式和不同区间组合的 q 值明显不同,以高程为例,自然断点分类法区间数量为9时 q 值最大,因此高程在地理探测器中应以自然断点分类法分为9类为最优

表5 基于土地利用转换的碳储量变化

Table 5 Carbon stock change based on land use conversion

土地利用类型	面积/km ²	碳储量变化/t	合计/t	土地利用类型	面积/km ²	碳储量变化/t	合计/t
耕地-林地	4.33	399.48	-6 372.55	水域-耕地	16.64	1 843.76	6 355.32
耕地-草地	29.79	1 221.54		水域-林地	0.85	172.6	
耕地-水域	8.57	-949.58		水域-草地	18.63	2 828.18	
耕地-建设用地	28.2	-3 127.46		水域-建设用地	2.11	-0.21	
耕地-未利用地	43.02	-3 816.52		水域-未利用地	68.86	1 520.98	
林地-耕地	29.88	-2 756.66	-16 185.04	建设用地-耕地	50.7	5 622.78	6 577.31
林地-草地	20.08	-1 029.15		建设用地-林地	0.87	520.09	
林地-水域	5.83	-1 183.84		建设用地-草地	2.56	388.88	
林地-建设用地	1.47	-298.65		建设用地-水域	3.04	0.3	
林地-未利用地	59.77	-10 816.73		建设用地-未利用地	2.49	55.25	
草地-耕地	276.53	-11 339.11	-126 168.87	未利用地-耕地	639.98	56 775.83	197 356.71
草地-林地	64.73	3 317.58		未利用地-林地	33.74	6 106.02	
草地-水域	28.22	-4 284.02		未利用地-草地	1 119.9	145 273.43	
草地-建设用地	26.2	-3 979.99		未利用地-水域	257.06	-5 677.94	
草地-未利用地	846.31	-109 783.33		未利用地-建设用地	230.9	-5 123.21	

参数选择,其余驱动因子同理^[29]。

从单因子分析来看[图 9(a)],各因子对酒泉市碳储量空间分布特征均有显著驱动作用(P 值均小于 0.01)。人为影响因子中土地利用程度、人口密度和 GDP 密度 q 值较高,其中土地利用程度对碳储量空间分异解释力最强, q 值为 0.849。自然影响因子中仅 NDVI 对碳储量空间分异具有较强的解释力, q 值为 0.234。从交互因子分析来看[图 9(b)],任意两个因

子交互 q 值均大于单因子 q 值,其中 X7 和 X8 与 X1、X2、X3 和 X4 交互均呈明显非线性增强,表明人口密度和 GDP 密度与高程、坡度、气温和降水在特定组合条件下会极大地增强各因子对碳储量空间分布的影响。土地利用程度与其它因子交互虽多为线性增长,但交互值均较高($q>0.85$),表明土地利用程度与其它因子相互作用是造成酒泉市碳储量空间分布特征的决定性因素。

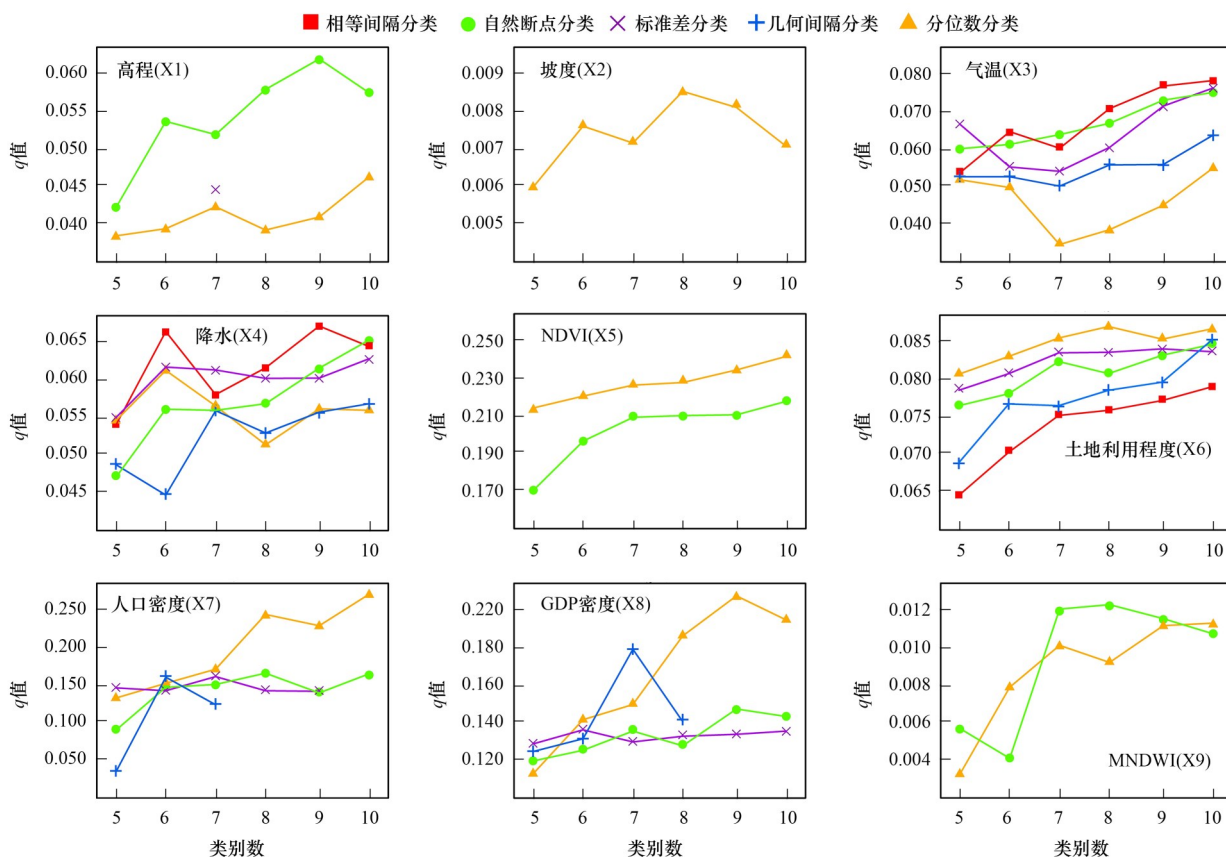


图 8 连续型因子最优离散

Fig. 8 Continuous factor is optimally discrete

3 讨论

3.1 碳储量对土地利用变化的响应

土地利用变化会改变生态系统的结构和功能,进而影响生态系统碳循环过程,而碳储量也可在一定程度上反映区域内土地利用状况^[30,31]。本研究表明,酒泉市 1990~2010 年碳储量呈增加趋势,主要原因是耕地面积增加所致。自 1983 年以来,酒泉市陆续实施两西计划移民、疏勒河建设项目移民和九甸峡移民等多项移民计划,截至 2008 年累计移民约 15 万人,开发耕地面积超过 7 500 km²,主要集中在瓜州、玉门和酒泉等绿洲区^[32]。因此耕地增加是该时期碳储量快速增长的主要原因。此外,酒泉市始终高度重视生态环境保护。一是着力实施封滩育林、退耕

还林和退牧还草等重点生态建设工程,二是全面推进节水型社会建设,相继出台了禁止无序移民、禁止无序开垦和禁止无序打井的“三禁”决定,并实施灌区续建配套与节水改造等工程^[19],促使区域生态环境持续改善,对防止生态系统碳储量损失起到关键作用^[33,34]。而在 2010~2020 年酒泉市碳储量呈小幅减小趋势,其原因是建设用地面积迅速扩张所致,且建设用地扩张主要以未利用地、耕地和草地为代价。耕地和草地面积的减少对区域生态系统碳储量造成一定损失。值得注意的是,本研究期间草地和林地面积萎缩虽导致碳储量有所减少,但未利用地转换为其它地类也使得碳储量大幅增加^[35,36]。因此,1990~2020 年间酒泉市碳储量仍呈总体上升趋势。

本研究表明,2035 年 4 个情景中碳储量均呈增加

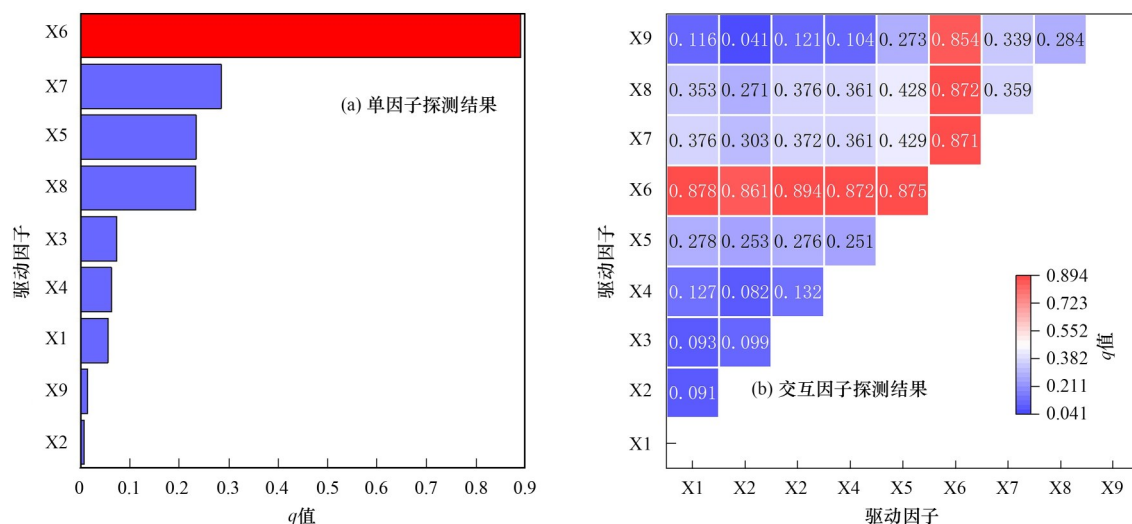


图9 单因子探测和交互因子作用结果

Fig. 9 Factor detection and interactive detection results

趋势,这与相关研究结论有所差异。其一,部分研究结果中以经济发展为目标的情景碳储量呈下降趋势^[4,37],而本文集约发展情景碳储量呈增加趋势。主要原因是近年来国家始终高度重视生态、农业空间保护,不断加大“三线”管控力度^[38],本文在集约发展情景中对城镇开发边界进行限制,一定程度上缓解了建设用地对草地、耕地和水域的侵占力度。因此,该情景中城镇扩张并未对碳储量造成严重损失。其二,有研究表明,近年来东部地区碳储量呈下降趋势,且未来几十年内将持续下降^[39,40]。主要原因是东部地区城市化速度快,建设用地扩张大量侵占耕地、林地和草地,进而导致区域碳储量明显下降。而西北干旱区城市化速度相对缓慢,城镇扩张主要以碳储量较低的草地和未利用地为代价,并未对区域碳储量造成严重损失,因此区域生态系统碳储量变化也与城市化速度及水平密切相关^[41~43]。4个情景中,生态保护情景碳储量最高且空间上增加最为明显,仅野马南山、敦煌绿洲和肃州区局部区域有轻微减小现象。因此,基于“双碳”战略目标,生态保护情景最有利于提高酒泉市生态系统碳储量。但值得注意的是,酒泉市水资源短缺,生产力发展水平与水资源供给矛盾突出,严重制约该区经济发展。酒泉市今后发展中应在提高生态系统碳储量的基础上实施节水优先发展战略。酒泉市耕地类型均为水浇地,农业用水占区域用水总量的83%以上,同时以高耗水农作物类型和漫灌式灌溉方式为主^[16]。压减传统耕地面积及提高农业用水效率是酒泉市建设节水型社会的关键。农业种植应大力发展基质枕栽培模式、积极推广滴灌、管灌、喷灌和微灌等节水工程,不断完善节水农业体系建设。同时还应加强地下水开采综合治

理,落实禁采区、限采区及年限划定,建立地下水水位和取水总量双控指标体系。并在工业用水方面积极开展重点行业清洁生产审核和严控企业废水达标排放,提高工业废水处理回用水平^[16,33]。此外,在生态保护情景中耕地和建设用地面积远超水资源约束情景耕地和建设用地面积的最高限制。为保障区域用水安全,规避过度耗水导致生态环境退化的潜在风险,需对耕地和建设用地面积及扩张边界进行限制,同时加强林地和草地等生态用地保护,以此进一步提高区域生态系统碳储量,促进区域可持续发展。

3.2 碳储量空间分异驱动因素

单因子检测结果表明,人为影响因子中土地利用程度(0.849)、人口密度(0.285)和GDP(0.233)密度对酒泉市碳储量空间分异的解释力较强,这与前人研究成果较为一致^[4]。研究区内酒泉、玉门、瓜州和敦煌等绿洲区人口聚集,经济发展水平高,大面积开垦荒地和城市开发建设使得部分草地被改造为碳储量较低的耕地和建设用地,与周围绿洲区域形成明显对比,表明人类对土地的利用方式和开发程度是造成碳储量空间分布特征的主要驱动力。自然因子中NDVI(0.234)对研究区碳储量空间分异的解释力较强,林地和草地是陆地生态系统极为重要的碳库,因此植被覆盖度高的区域碳储量大。酒泉市南部地区碳储量大值最为集中,主要原因是该区涵盖祁连山国家公园、盐池湾、昌马河和南山等多个自然保护区,区域受降水和冰川积雪融水的长期补给使得植被覆盖度明显高于其他区域。中部区域碳储量大值多集中在疏勒河和黑河流域的绿洲区,土地利用类型以草地、耕地为主,碳储量明显高于周围荒漠地区。北部马鬃山区域碳储量较高,植被类型以草地

为主。从交互因子看,人为影响因子中的土地利用程度、人口密度和 GDP 密度与高程、坡度、气温和降水等自然因素在特定组合条件下会极大地增强各因子对碳储量空间分布的影响,说明酒泉市碳储量空间分异是自然地理与社会经济因素共同作用的结果。因此,未来酒泉市在生态保护与风险管控实践中应根据不同驱动因子作用特点采取差异化多元调控策略,选择与区域自然条件和社会经济发展水平相适应的土地利用开发模式,避免不合理的人类活动与自然及社会经济因子的协同作用对区域生态系统产生更大的压力^[44]。

3.3 本研究的创新、不确定性和展望

本文根据干旱区自然地理特征从水资源约束角度构建了一个新的土地利用变化情景,即水资源约束情景。并在集约发展情景中增加了空间规划政策对土地利用变化的引导机制。此外,本文还采用参数最优地理探测器模型对连续型变量因子进行最优离散化处理,更加客观地分析了各驱动因子对碳储量空间分异的影响程度。然而本文也存在一些不确定性。首先,本文在水资源约束情景中忽略了用水效率提高对未来耕地和建设用地的影响作用。酒泉市水资源资料显示,2006~2020 年农业用水总量和建设用地综合用水总量均在减小,但建设用地和耕地面积在持续增加,表明用水效率会随生产技术的提高而提高。因此,在 2035 年水资源总量一定时,采用近 5 年用水量平均值计算的耕地和建设用地面积可能偏小。其次,本文忽略了节约水资源对区域碳储量的潜在影响。节约用水必然会减少对酒泉市地表与地下水的开采量,节约水资源将有可能改善地表植被分布特征^[45],而由此间接性带来的碳储量变化是很难衡量的。因此,在今后的研究中还需对水资源约束情景中用水效率提高问题和节约用水与碳储量之间的关系进行深入探究,并不断完善干旱区碳储量多情景评估体系。

4 结论

(1)酒泉市未利用地为主要用地类型,占研究区总面积的 79%。1990~2020 年酒泉市耕地、水域和建设用面积均呈显著增加趋势,其余地类面积呈减小趋势。相比其他情景,2035 年生态保护情景中耕地、林地、草地和水域面积增幅最高。

(2)1990~2020 年,酒泉市碳储量整体呈增加趋势,增量为 61 562.87 t。从土地利用类型看,草地碳储量贡献最大,贡献率均值为 54.338%。2035 年 4 个情景中生态保护情景碳储量增加最为显著,增量为 76 989.29 t。酒泉市北部、南部高海拔地区及中部绿

洲区碳储量较高,其余区域均较低。

(3)酒泉市耕地、林地和草地向其它地类转换使得总碳储量减少,分别损失了 6 372.55、16 185.04 和 126 168.87 t,草地向未利用地转换是造成碳储量损失的主要原因,约占损失总量的 85%。水域、建设用地和未利用地向其它地类转换使得总碳储量增加了 6 355.32、6 577.31 和 197 356.71 t。

(4)土地利用程度、人口密度、人均 GDP 密度和 NDVI 是酒泉市碳储量空间分异的主要驱动因子,其中土地利用程度解释力最强(q 值为 0.849)。自然与人为因子的交互作用增强了各因子对碳储量空间分异的解释力。

参考文献:

- [1] 刘杰,马艳婷,王宪玲,等.渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J].环境科学,2019,40(7):3361-3368.
Liu J, Ma Y T, Wang X L, *et al.* Impact of land use type on the stability and organic carbon content of soil aggregates in the Weibei Dryland[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3361-3368.
- [2] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019.
- [3] 邵壮,陈然,赵晶,等.基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J].生态学报,2022,42(23):9456-9469.
Shao Z, Chen R, Zhao J, *et al.* Spatio-temporal evolution and prediction of carbon storage in Beijing's ecosystem based on FLUS and InVEST models[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [4] 如克亚·热合曼,阿里木江·卡斯木,希丽娜依·多来提,等.天山北坡城市群碳储量时空变化及预测研究[J].中国环境科学,2022,42(12):5905-5917.
Reheman·Rukeya, Kasimu·Alimujiang, Duolat·Xilinayi, *et al.* Temporal and spatial variation and prediction of carbon storage in urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountains [J]. China Environmental Science, 2022, 42(12): 5905-5917.
- [5] 朱文博,张静静,崔耀平,等.基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例[J].地理学报,2019,74(3):446-459.
Zhu W B, Zhang J J, Cui Y P, *et al.* Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: a case study in Qihe River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.
- [6] 高星,杨刘婉青,李晨曦,等.模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应[J].生态学报,2021,41(20):7974-7988.
Gao X, Yang L W Q, Li C X, *et al.* Land use change and ecosystem service value measurement in Baiyangdian Basin under the simulated multiple scenarios[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 7974-7988.
- [7] Hu S, Chen L Q, Li L, *et al.* Simulation of land use change and ecosystem service value dynamics under ecological constraints in Anhui Province, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(12), doi: 10.3390/ijerph17124228.
- [8] Zhao Q Q, Li J, Cuan Y D, *et al.* The evolution response of

- ecosystem cultural services under different scenarios based on system dynamics[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/rs12030418.
- [9] van Vliet J, Hurkens J, White R, *et al.* An activity-based cellular automaton model to simulate land-use dynamics[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2012, **39**(2): 198-212.
- [10] Ji Z X, Wei H J, Xue D, *et al.* Trade-off and projecting effects of land use change on ecosystem services under different policies scenarios: a case study in central China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, **18**(7), doi: 10.3390/ijerph18073552.
- [11] 赫晓慧, 徐雅婷, 范学峰, 等. 中原城市群区域碳储量的时空变化和预测研究[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- Hao X H, Xu Y T, Fan X F, *et al.* Temporal and spatial variation and prediction of regional carbon storage in Zhongyuan urban agglomeration[J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(6): 2965-2976.
- [12] Liang X, Liu X P, Li D, *et al.* Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, **32**(11): 2294-2316.
- [13] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, *et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, **85**, doi: 10.1016/j.compenurbysys.2020.101569.
- [14] Gao X, Wang J, Li C X, *et al.* Land use change simulation and spatial analysis of ecosystem service value in Shijiazhuang under multi-scenarios[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(24): 31043-31058.
- [15] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, *et al.* Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(19): 7565-7570.
- [16] 周欣, 秦绪明, 徐怒潮, 等. 酒泉市水生态环境问题及保护修复对策[J]. *环境保护科学*, 2021, **47**(2): 62-70.
- Zhou X, Qin X M, Xu N C, *et al.* Main problems and restoration countermeasures of water eco-environment in Jiuquan City[J]. *Environmental Protection Science*, 2021, **47**(2): 62-70.
- [17] 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 等. 基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1368-1377.
- Ouyang X T, Liao H Y, Jiang Q X, *et al.* Simulation and regulation of sustainable utilization of water resources in China based on improved water resources ecological footprint model[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1368-1377.
- [18] 张玲. 借鉴以色列沙漠农业成功经验促进酒泉市戈壁农业发展的几点思考[J]. *甘肃农业*, 2019, (4): 77-78.
- [19] 曹诚, 陈永宁. 生态脆弱地区绿色金融发展[J]. *中国金融*, 2017, (20): 92-93.
- [20] 侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 等. 基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- Hou J K, Chen J J, Zhang K Q, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of carbon storage in the source region of the Yellow river based on InVEST and GeoSoS-FLUS models and its response to different future scenarios[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5253-5262.
- [21] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: a regional carbon sequestration study[J]. *Journal of Arid Environments*, 2013, **89**: 67-76.
- [22] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000, **404**(6780): 858-861.
- [23] 陈光水, 杨玉盛, 刘乐中, 等. 森林地下碳分配(TBCA)研究进展[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2007, **2**(1): 34-42.
- Chen G S, Yang Y S, Liu L Z, *et al.* Research review on total belowground carbon allocation in forest ecosystems[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, **2**(1): 34-42.
- [24] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于 PLUS 模型的城市生态系统服务价值多情景模拟——以汉中市为例[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, **36**(10): 86-95.
- Yang S, Su H, Zhao G P. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: a case study of Hanzhong city[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, **36**(10): 86-95.
- [25] Xie L, Wang H W, Liu S H. The ecosystem service values simulation and driving force analysis based on land use/land cover: a case study in inland rivers in arid areas of the Aksu River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, **138**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108828.
- [26] 孙毅中, 杨静, 宋书颖, 等. 多层次矢量元胞自动机建模及土地利用变化模拟[J]. *地理学报*, 2020, **75**(10): 2164-2179.
- Sun Y Z, Yang J, Song S Y, *et al.* Modeling of multilevel vector cellular automata and its simulation of land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, **75**(10): 2164-2179.
- [27] 包志炎, 郑高安, 王莹, 等. 基于模糊数据挖掘的灌区水资源配置研究[J]. *农业机械学报*, 2020, **51**(8): 270-277.
- Bao Z Y, Zheng G A, Wang X, *et al.* Water resources allocation of irrigation district based on fuzzy data mining[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, **51**(8): 270-277.
- [28] 牛志君, 周亚鹏, 王树涛, 等. 县域土地利用变化对碳储量的影响与评价——以黑龙江流域巨鹿县为例[J]. *水土保持研究*, 2018, **25**(3): 292-297, 304.
- Niu Z J, Zhou Y P, Wang S T, *et al.* Influence and evaluation of land use change on carbon storage on county scale——a case study of Julu County in Heilonggang basin[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, **25**(3): 292-297, 304.
- [29] 李琛, 吴映梅, 高彬媛, 等. 高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测——以环洱海地区为例[J]. *经济地理*, 2022, **42**(4): 220-229.
- Li C, Wu Y M, Gao B P, *et al.* Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in plateau lake: a case study of the area around the Erhai[J]. *Economic Geography*, 2022, **42**(4): 220-229.
- [30] 向书江, 张骞, 王丹, 等. 近 20 年重庆市主城区碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性分析[J]. *自然资源学报*, 2022, **37**(5): 1198-1213.
- Xiang S J, Zhang Q, Wang D, *et al.* Response and vulnerability analysis of carbon storage to LUCC in the main urban area of Chongqing during 2000-2020[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, **37**(5): 1198-1213.
- [31] 付超, 于贵瑞, 方华军, 等. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响[J]. *地理科学进展*, 2012, **31**(1): 88-96.
- Fu C, Yu G R, Fang H J, *et al.* Effects of land use and cover

- change on terrestrial carbon balance of China [J]. *Progress in Geography*, 2012, **31**(1): 88-96.
- [32] 田生才. 酒泉市移民政策完善对策研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2015.
- [33] 罗志桢. 酒泉市水资源现状及面临的问题与对策[J]. *中国农业资源与区划*, 2007, **28**(4): 13-16.
- Luo Z Z. Present status of water resources in Jiuquan city and problems facing it and countermeasures [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2007, **28**(4): 13-16.
- [34] 刘海龙, 石培基. 绿洲型城市空间扩展的模拟及多情景预测——以酒泉、嘉峪关市为例[J]. *自然资源学报*, 2017, **32**(12): 2075-2088.
- Liu H L, Shi P J. The simulation and multi-scenario forecast of urban spatial expansion in oasis cities —Take Jiuquan and Jiayuguan cities as examples [J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, **32**(12): 2075-2088.
- [35] Cao S X, Chen L, Shankman D, *et al.* Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: lessons in ecological restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, **104**(4): 240-245.
- [36] Liu Z F, Yang Y J, He C Y, *et al.* Climate change will constrain the rapid urban expansion in drylands: a scenario analysis with the zoned Land Use Scenario Dynamics-urban model [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **651**: 2772-2786.
- [37] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(1): 41-51.
- Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and In-VEST model [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(1): 41-51.
- [38] 张斌, 李璐, 夏秋月, 等. “三线”约束下土地利用变化及其对碳储量的影响——以武汉城市圈为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(6): 2265-2280.
- Zhang B, Li L, Xia Q Y, *et al.* Land use change and its impact on carbon storage under the constraints of “three lines”: a case study of Wuhan City circle [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(6): 2265-2280.
- [39] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于 InVEST-PLUS 模型的碳储量空间关联性及其预测——以广东省为例[J]. *中国环境科学*, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- Lin T, Yang M Z, Wu D F, *et al.* Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model- a case study in Guangdong Province [J]. *China Environmental Science*, 2022, **42**(10): 4827-4839.
- [40] 朱志强, 马晓双, 胡洪. 基于耦合 FLUS-InVEST 模型的广州市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *水土保持通报*, 2021, **41**(2): 222-229, 239.
- Zhu Z Q, Ma X S, Hu H. Spatio-temporal evolution and prediction of ecosystem carbon stocks in Guangzhou city by coupling FLUS-InVEST models [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, **41**(2): 222-229, 239.
- [41] 安佑志, 张庆军. 快速城市化对上海地区植被和土壤碳储量时空变化的影响研究[J]. *环境科学与管理*, 2016, **41**(8): 152-155, 170.
- An Y Z, Zhang Q J. Impact of rapid urbanization on temporal and spatial variation of Shanghai vegetation and soil carbon storage [J]. *Environmental Science and Management*, 2016, **41**(8): 152-155, 170.
- [42] 徐丽, 于贵瑞, 何念鹏. 1980s-2010s 中国陆地生态系统土壤碳储量的变化[J]. *地理学报*, 2018, **73**(11): 2150-2167.
- Xu L, Yu G R, He N P. Changes of soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(11): 2150-2167.
- [43] 陈美景, 王庆日, 白中科, 等. 碳中和愿景下“三生空间”转型及其碳储量效应——以贵州省为例[J]. *中国土地科学*, 2021, **35**(11): 101-111.
- Chen M J, Wang Q R, Bai Z K, *et al.* Transition of “Production-Living-Ecological” space and its carbon storage effect under the vision of carbon neutralization: a case study of Guizhou Province [J]. *China Land Science*, 2021, **35**(11): 101-111.
- [44] 张弛, 李枝坚, 曾辉. 基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例[J]. *地理研究*, 2022, **41**(5): 1279-1297.
- Zhang C, Li Z J, Zeng H. Scale effects on ecosystem service trade-off and its influencing factors based on wavelet transform: a case study in the Pearl River Delta, China [J]. *Geographical Research*, 2022, **41**(5): 1279-1297.
- [45] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. *地理学报*, 2018, **73**(7): 1189-1203.
- Deng M J. “Three Water Lines” strategy: its spatial patterns and effects on water resources allocation in northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(7): 1189-1203.

CONTENTS

Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning	CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i> (1)
Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i> (8)
Variation Characteristics of PM _{2.5} Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter	DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (23)
Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou	HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (36)
Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter	PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i> (48)
Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022	CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i> (61)
Analysis of O ₃ Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China	HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i> (71)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer	ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i> (81)
Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction	FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (93)
Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model	YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i> (104)
Driving Forces and Mitigation Potential of CO ₂ Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China	WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i> (115)
Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant	ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i> (123)
Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years	DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i> (131)
Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i> (140)
Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment	ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i> (151)
Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment	LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i> (159)
“Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary	LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i> (173)
Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir	ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (181)
Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City	CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i> (194)
Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang	LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long (207)
Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan (218)
Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years	WANG Geng, ZHANG Fu-rong (228)
Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect	TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i> (239)
Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone	SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i> (248)
Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i> (262)
Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin	CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i> (275)
Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model	Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i> (287)
Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model	SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i> (300)
Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain	HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i> (314)
Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors	SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i> (323)
Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region	CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (335)
Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area	LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (343)
Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations	XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i> (354)
Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing	LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i> (364)
Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils	LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie (376)
Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model	XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i> (386)
Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented	MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i> (396)
Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China	LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i> (407)
Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City	LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i> (417)
Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials	TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i> (429)
Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety	HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (439)
Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic	WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (450)
Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks	MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i> (459)
Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i>	NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (470)
Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum	LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i> (480)
Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil	ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> (489)
Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities	LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge (496)
Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest	WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i> (508)
Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity	ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei (520)
Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function	LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i> (530)
Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper	CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i> (543)
Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water	LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i> (555)
Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County	WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i> (567)
High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i> (576)
Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas	LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i> (584)
Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw	LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i> (594)
Comparison of Pb ²⁺ Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO ₂ Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid	JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i> (606)