

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

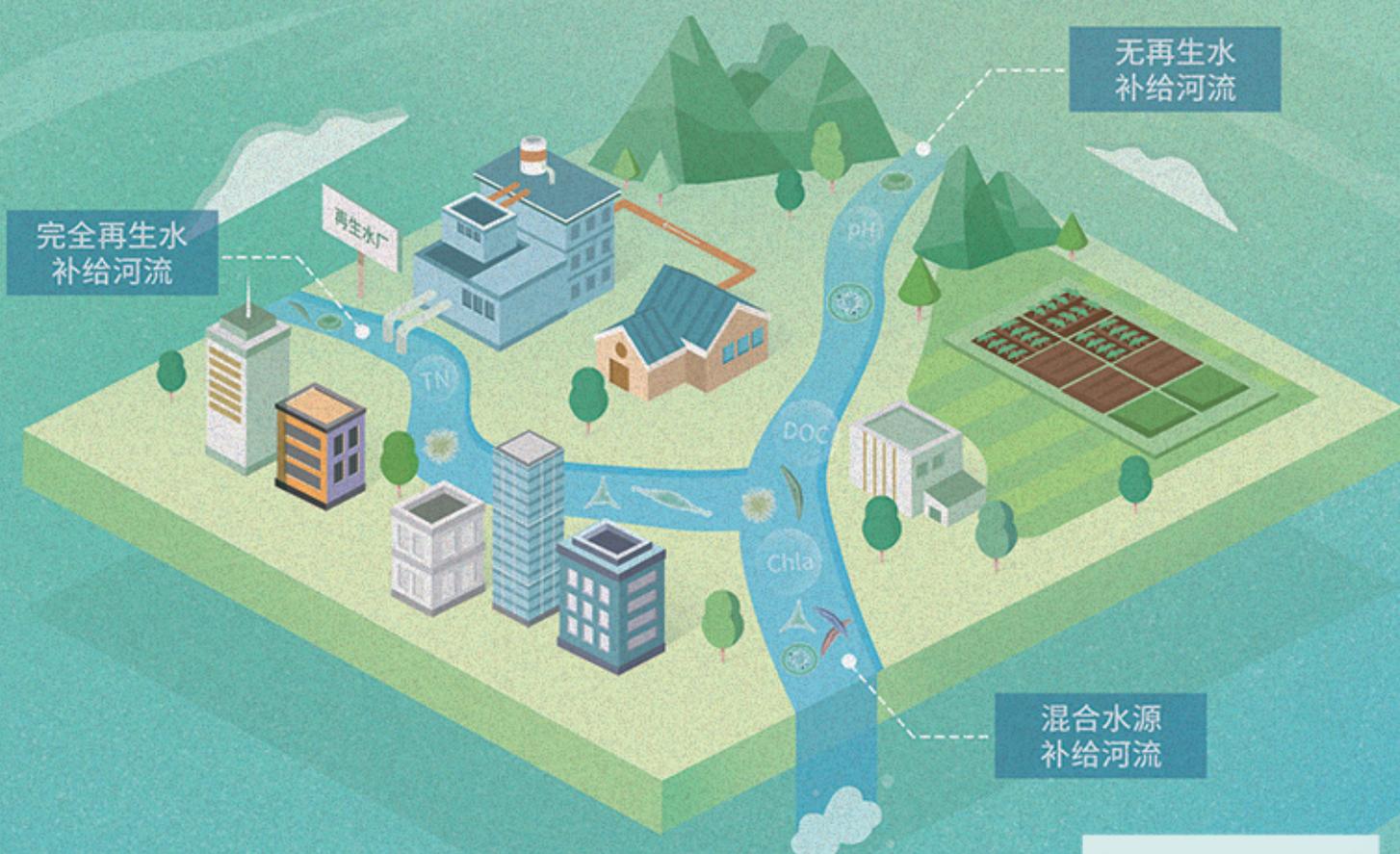
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素 张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华(5333)

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响 周志衡, 周廷刚, 秦宁(5344)

长株潭城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析 刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅(5354)

张掖市城区大气细颗粒物 PM_{2.5} 的化学组成及来源解析 潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民(5367)

2018~2019年冬季天津和青岛 PM_{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估 赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳(5376)

青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析 孔令冬, 祁建华, 张旭(5387)

2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势 赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳(5399)

海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征 谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅(5407)

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别 杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰(5421)

郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵(5429)

兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析 杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽(5442)

地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估 刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧(5453)

缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征 李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟(5464)

废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测 严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏(5470)

长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送 刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱军, 冉祥滨(5478)

澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析 郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤(5491)

小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系 肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨(5499)

磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化 张坤锋, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青(5509)

疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估 樊月婷, 昌盛, 张坤锋, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青(5522)

北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估 昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤锋, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星(5534)

平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因 孙龙, 刘廷奎, 段利民, 张文瑞, 郑国峰(5547)

三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响 张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博(5560)

不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环 刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨(5571)

2011~2019年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析 谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟(5585)

乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评估 杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇(5598)

生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制 苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元(5608)

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系 侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中(5616)

锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用 高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰(5627)

KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除 徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁(5635)

改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI) 的吸附机制 练建军, 邹洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平(5647)

桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI) 刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢颖辉, 鄢俊彬, 李娜(5657)

镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除 吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江(5667)

钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析 程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰(5676)

上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评估 李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏(5687)

重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析 马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵(5698)

典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析 官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富(5710)

基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌(5718)

香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估 陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚(5728)

地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例 刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波(5742)

新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估 杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖(5751)

肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果 伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒(5761)

微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累 杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 唯福庆, 赵鹏(5769)

产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制 姬明飞, 吴雪姣, 李晚哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩辉(5778)

硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制 高羽, 刘雨辰, 郭晓芳, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远(5789)

巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响 王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强(5798)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性 竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌(5808)

添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响 赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣(5819)

基于 g-C₃N₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性 朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠(5832)

“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析 杨柏, 秦广鹏, 郭钦(5840)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测 杨旭, 刘贤赵(5850)

基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析 张涛, 郑钧文, 孙煜琛, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛(5861)

《环境科学》第43卷(2022年)总目录 (5873)

《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607, 5741, 5768)

长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测

杨旭, 刘贤赵*

(湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湘潭 411201)

摘要: 土地利用碳排放是影响城市碳达峰、碳中和实现的重要因素. 基于土地利用遥感数据和碳排放估算模型, 得到长株潭城市群的土地利用碳排放量, 借助转移矩阵分析了长株潭城市群土地利用转移的碳传导效应. 此外, 采用马尔科夫模型预测2030年和2060年的长株潭土地利用碳排放量. 结果表明: ①1995~2018年长株潭城市群土地利用净碳排放从 810.84×10^4 t增加到 2015.41×10^4 t, 碳源/汇比整体呈上升趋势. 其中, 建设用地是主要的碳排放源, 林草地是主要的碳汇. ②不同时段地类转移引起的碳传导最终均表现为净碳排放, 在时间上呈现先增加后减少的态势. 其中以林地和耕地向建设用地转移产生的碳传导最为显著, 涉及草地、水域和未利用地的碳传导效应微弱. ③预测结果表明, 长株潭城市群的土地利用碳排放预测量处于持续上涨态势, 如若仍按目前趋势发展, 则如期实现“双碳目标”存在难度. 政府需要在加强林地的碳吸收能力以提升生态系统碳汇增量和遏制建设用地的无序扩张以减少碳源两方面着力, 加快长株潭城市群的绿色低碳建设. 上述结果为长株潭城市群开展低碳导向的城市土地利用调控提供了重要参考.

关键词: 土地利用; 碳源/汇; 碳传导效应; 马尔科夫预测; 长株潭城市群

中图分类号: X24 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5850-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.202201228

Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

YANG Xu, LIU Xian-zhao*

(School of Earth Science and Space Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Land use carbon emissions are an important factor affecting regional carbon peaks and carbon neutralization. Based on land use remote-sensing data and a carbon emission estimation model, the land use carbon emission of the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration was obtained, and the carbon conduction effect of land use transfer in the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration was analyzed using a transfer matrix. In addition, a Markov model was used to predict the land use carbon emissions of the study area in 2030 and 2060. The results showed that: ① from 1995 to 2018, the net carbon emission from land use of the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration increased from 810.84×10^4 t to 2015.41×10^4 t, and the carbon source/sink ratio showed an upward trend as a whole. Built-up land was the main carbon emission source, and forest and grassland were the main carbon sink. ② The carbon conduction caused by land type transfer in different periods finally showed net carbon emissions, which increased first and then decreased. The carbon transfers from forest and cropland to built-up land were the most significant, whereas the carbon transfer effect involving grassland, water, and unused land was weak. ③ The prediction results showed that the land use carbon emission prediction of the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration was in a continuous upward trend. If the current trend is allowed to continue, it will be difficult to achieve the “double carbon goal” on schedule. Therefore, the government needs to speed up the green and low-carbon construction of the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration by strengthening the carbon absorption capacity of the forest to improve the ecosystem carbon sink increment and by curbing the disorderly expansion of built-up land to reduce carbon sources. The above results provide an important reference for the Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration to carry out low-carbon oriented urban land use regulation.

Key words: land use; carbon source/sink; carbon conduction effect; Markov model; Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

碳达峰以及碳中和目标的提出, 得到国际社会的广泛响应, 据报道^[1-6], 土地利用变化是影响大气碳含量和全球气候变化的重要因素. 由城市土地利用变化引起的碳排放约占人类活动导致的总排放量的1/3, 是仅次于化石能源燃烧的第二大碳排放源. 因此, 针对城市层面开展土地利用碳排放研究, 对于调控和规范城市用地、促进区域低碳可持续发展、实现碳达峰碳中和具有重要意义. 目前, 关于土地利用碳排放的研究国内外学者主要集中在土地利用碳排放核算^[7-11]、土地利用碳排放机制和效应^[12-14]、土地利用碳排放预测^[15-18]以及影响因素^[19-23]等方面. 针对土地利用碳排放的核算, 国外重点研究生态系统的碳通量, 而国内多将生态系统和人为源碳排放合并共同核算. 而在土地利用的碳排放效应方面,

主要就土地利用变化对土壤碳储量和植被碳储量的影响、土地利用碳排放的时空变化特征等方面展开研究. 针对土地利用碳排放的预测则通过回归分析模型^[15]、马尔科夫模型^[16]、系统动力学(SD)模型^[17]和CLUE模型^[18]等开展. 尽管上述研究为探讨城市土地利用碳排放提供了很好的借鉴, 但较少有学者将研究视角聚焦在地类转移导致的碳排放传导效应上. 而且现有研究大多是把城市群作为一个整体进行碳排放研究, 并未考虑城市群内部地类的

收稿日期: 2022-01-22; 修订日期: 2022-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(17BGL138); 湖南省社科基金项目(18YBA151)

作者简介: 杨旭(1997~), 女, 硕士, 主要研究方向为土地利用的低碳管理, E-mail: yangxu@mail.hnust.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 1100095@hnust.edu.cn

碳传导规律.在估算城市群土地利用碳排放时,主要是选择耕地、林地和建设用地等土地利用类型,对水域、草地和未利用地的碳排放考虑较少^[24].另外,针对土地利用碳排放的预测,现有利用马尔科夫模型的研究大多基于整个研究时期建立转移矩阵对碳排放展开预测.本文在此基础上做了两点修正.其一是将土地利用碳排放分为直接和间接两部分预测,分别通过预测土地面积和能源结构得到.其二是将研究区不同时期的土地利用演化状态分别作为预测所需的转移矩阵,并作对比精度验证,据此确定用于预测的最佳转移矩阵.长株潭城市群作为中国区域一体化发展和湖南省两型社会建设的重要示范区,其社会经济发展和土地利用变化具有一定的典型性^[25].本文利用 1995~2018 年遥感影像测算长株潭城市群各地类的面积,结合土地利用的碳源-碳汇公式以及相应的碳排放/碳吸收系数估算研究区土地利用的碳排放量,分析各时段土地利用转移引起的碳传导效应,采用马尔科夫模型对 2030 年和 2060 年土地利用碳排放展开预测,以期为城市群评估碳减排压力提供参考.本研究有助于地区开展低碳导向的土地利用调控,制定科学的减排路径.

1 研究区概况

长株潭城市群位于湖南省中东部,经纬度范围分别为 111°58'~114°13'E 和 26°18'~28°41'N 之间.包括长沙、株洲和湘潭这 3 市,共 23 个县级行政单元,总面积为 2.8 万 km².2020 年年末总人口为 1 668.94 万人,占湖南省总人口的 25.1%,GDP 为 17 591.46 亿元,是湖南省的政治经济中心,也是湖南省经济发展与城市化的核心区域以及承东启西、联结南北的“金三角”.近年来,随着经济社会发展与一体化进程的不断推进,长株潭城市群不同土地利用类型转换加快,特别是建设用地不断扩张,由此引致的碳排放问题日益凸显.

2 材料与方法

2.1 数据来源

采用中国科学院资源与环境科学数据中心提供的 1995、2000、2005、2010、2015 和 2018 年 6 期遥感影像(分辨率为 30 m×30 m),结合长株潭城市群地形图和行政区划图对影像进行几何校正、配准和剪裁,并借助 ArcGIS10.2 软件进行交互式解译得到研究区耕地、林地、草地、建设用地、水域和未利用地这 6 种土地利用类型的面积.用于间接估算建设用地碳排放的 8 种主要化石能源(原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气)消费数

据来自 1996~2019 年的《中国能源统计年鉴》,对应的能源碳排放系数为 IPCC 推荐的缺省值.

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用碳排放(碳吸收)估算

耕地、林地、草地、水域和未利用地均属于非建设用地.其中,林地、草地、水域和未利用地因具有碳吸收功能视为碳汇;而耕地兼具碳源、碳汇功能,即在农业生产活动时(如农业化肥施用、农业机械使用、农膜使用和灌溉)表现为碳源,而在农作物生育期表现为碳汇.因此,本文采用直接估算法对上述 5 种土地利用类型的碳排放进行测算,表达式为:

$$E_i = S_i \times \delta_i \quad (1)$$

式中, E_i 为第 i 种土地利用类型的碳排放量; S_i 为第 i 种土地利用类型的面积; δ_i 为第 i 种土地利用类型的碳排放或碳吸收系数(其中碳排放为正,碳吸收为负).各种土地利用的碳排放或碳吸收系数确定如下:耕地主要是考虑农业生产过程中 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体的碳排放和农作物在生育期间的碳吸收,本文根据已有成果^[25,26]并结合研究区的地理位置和气候条件取 0.042 2 kg·(m²·a)⁻¹ 作为耕地的净碳排放系数(以 C 计,下同);林地的碳吸收能力与其生长环境密切相关,不同的生长条件碳吸收能力不同,本文参考方精云等^[27]的成果以及石洪昕等^[28]的成果,同时结合长株潭城市群地处亚热带、森林资源较丰富的实际,取它们的平均值作为林地的碳吸收系数;草地的碳吸收系数结合实际取 -0.002 1 kg·(m²·a)⁻¹.长株潭城市群水域用地相对复杂,既包括河流、湖泊和水塘等,又包括滩涂和水利设施.因此,综合考虑各类水域用地的功能,参考段晓男等^[29]和 Lai 等^[30]的研究成果,取 -0.025 3 kg·(m²·a)⁻¹ 作为水域的碳吸收系数.至于未利用地的碳排放研究较少,本文考虑长株潭城市群未利用地的组成(主要是荒草地、沼泽地、沙地、裸土地和裸岩等),其碳吸收系数取 -0.000 5 kg·(m²·a)⁻¹.鉴于研究区域范围较小且限于湖南省内,自然环境差异不明显,因而本文未考虑不同市县同一土地利用类型碳排放(碳吸收)系数的差异.

2.2.2 间接碳排放估算及分配

建设用地是能源消耗和产业活动的集中地,受人类活动影响最为剧烈,因而是主要的碳源.其碳排放主要是根据消耗的 8 种主要化石能源(表 1)消费量进行间接估算.计算公式为:

$$E_C = \sum E_i \times \theta_i \times f_i \quad (2)$$

式中, E_C 为建设用地碳排放量, i 为能源种类, E_i 为 i 种能源的消耗量, θ_i 为 i 种能源折标准煤系数,

表 1 主要化石能源的标准煤折算系数和碳排放系数¹⁾

Table 1 Standard coal conversion coefficient and carbon emission coefficient of main energy

能源种类	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气
折标系数(以标准煤/实物量计)	0.714 3	0.971 4	1.428 6	1.471 4	1.471 4	1.457 1	1.428 6	1.330 0
碳排放系数(以碳/标准煤计)	0.755 9	0.855 0	0.585 7	0.553 8	0.571 4	0.592 1	0.618 5	0.448 3

1) 天然气标准煤折算系数(以标准煤计)的单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,其余单位为 $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$

f_i 为来源于 IPCC 有关 i 种能源的碳排放系数(表 1)。

基于上述方法计算湖南省土地利用间接碳排放量. 选取人口、GDP、历史碳排放量(前 3 个指标表示公平性原则)、碳排放强度(效率性原则)和第三产业比重(可行性原则)构建碳排放的省域分配指标体系^[31,32],采用适合多指标综合确权的熵值法确定各指标权重,并将马海良等^[33]提出的碳排放总量测算模型作扩充使用. 据此将湖南省建设用地产生的碳排放量科学分配至长株潭城市群,以得到研究区的土地利用间接碳排放量。

2.2.3 地类转移碳排放传导估算

土地利用变化会引起碳的转移,将该过程定义为土地利用碳排放的碳传导效应. 地类转移导致的碳排放传导量取决于地类转化前后碳吸收与碳排放能力的差异以及转化的面积. 其中,地类转化面积由揭示土地利用变化数量和转移方向的土地利用转移矩阵确定^[34-37],其数学表达式为:

$$\mathbf{S}_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{N1} & S_{N2} & \cdots & S_{NN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, N 为土地利用类型的数目, \mathbf{S}_{ij} 为地类 i 转移至地类 j 的面积. 除建设用地外,其他地类之间相互转化所引起的碳传导根据土地利用转移矩阵和各地类的碳排放(碳吸收)系数的差值用式(4)估算:

$$C_i = \mathbf{S}_{ij} \times (\delta_{i1} - \delta_{i2}) \quad (4)$$

建设用地与其他地类转化引起的碳传导量, 本文是将长株潭城市群的建设用地视为在空间上同质,即忽略不同空间情景下单位面积产生的碳排放差异. 于是在研究时段 $T_1 \sim T_2$ 内,由建设用地转变成其他用地产生的碳排放转出量用式(5)计算:

$$C_i = S_{bi} \times (\delta_{T1} - \delta_i) = S_{bi} \times (E_{b1}/S_{b1} - \delta_i) \quad (5)$$

而由其他地类转变为建设用地产生的碳排放转入量则用式(6)进行计算:

$$C_i = S_{bi} \times (\delta_i - \delta_{T2}) = S_{ib} \times (\delta_i - E_{b2}/S_{b2}) \quad (6)$$

式中, C_i 为地类转化导致的碳排放传导量; δ_i 为除建设用地外的土地利用类型的碳排放系数(δ_{i1})或碳吸收系数(δ_{i2}), δ_{T1} 和 δ_{T2} 分别为在 T_1 和 T_2 年份建设用地单位面积上产生的碳排放,单位为 $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$; E_{b1} 和 E_{b2} 分别为在 T_1 和 T_2 年份建设用地产生的碳排放; S_{b1} 和 S_{b2} 分别为 T_1 和 T_2 年份建设用地的面积, S_{bi} 和 S_{ib} 分别为建设用地转移至地类 i 的面积和地类 i 转移至建设用地的面积. 本文假设同一地类内部的变化不产生碳传导。

2.2.4 马尔科夫模型预测

马尔科夫过程能够根据事件的目前状况预测其将来某一时刻可能出现的状态,遵循“无后效性原则”^[27]. 本文将马尔科夫理论应用至土地利用和能源结构两个方面,依据时间序列的变化关系求解转移概率矩阵做预测。

其一,马尔科夫过程能够定量揭示各土地利用类型之间的相互转化状况和转移速率,通过预测土地利用类型转移方向,得到土地利用的直接碳排放量. 而预测的精确程度,关键在于土地利用类型之间相互转化的转移概率矩阵 \mathbf{P}_{ij} 的确定。

$$\mathbf{P}_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ P_{N1} & P_{N2} & \cdots & P_{NN} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, N 为研究区土地利用类型数目, \mathbf{P}_{ij} 为在某研究时段内初期至期末时,由类型 i 转移为 j 的概率,并满足条件[式(8)]:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{ij} \leq 1, \\ \sum_{j=1}^N P_{ij} \leq 1. \end{cases} \quad (8)$$

土地利用类型在任意时刻的状态概率向量 $\mathbf{P}(n)$,由其初始状态概率向量 $\mathbf{P}(n-1)$ 转移概率矩阵 \mathbf{P}_{ij} 确定[式(9)]:

$$\mathbf{P}(n) = \mathbf{P}(n-1) \times \mathbf{P}_{ij} \quad (9)$$

其二,能源消费结构变动也可视为一个马尔科夫过程^[38,39]. 基于 1995 ~ 2018 年历史能源数据,运用马尔科夫模型预测长株潭城市群未来的能源结构变化. 假设在 t 时刻长株潭城市群的能源消费结构状态向量为:

$$S(t) = \{s_r(t), s_c(t), s_o(t), s_g(t), s_k(t), s_d(t), s_f(t), s_n(t)\} \quad (10)$$

$t \sim t + 1$ 时刻的转移矩阵为：

$$P_{ij}(t) = \begin{bmatrix} p_{r-c}(t) & p_{r-o}(t) & \cdots & p_{r-f}(t) & p_{r-n}(t) \\ p_{c-r}(t) & p_{c-c}(t) & \cdots & p_{c-f}(t) & p_{c-n}(t) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ p_{f-r}(t) & p_{f-c}(t) & \cdots & p_{f-f}(t) & p_{f-n}(t) \\ p_{n-r}(t) & p_{n-c}(t) & \cdots & p_{n-f}(t) & p_{n-n}(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, $s_r(t)$ 、 $s_c(t)$ 、 $s_o(t)$ 、 $s_g(t)$ 、 $s_k(t)$ 、 $s_d(t)$ 、 $s_f(t)$ 和 $s_n(t)$ 分别为原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油和天然气在能源消费中的比重; i 和 j 为能源类型,而 $p_{i-j}(t)$ 为由能源 i 转换为能源 j 的概率。

其三,马尔科夫预测模型适用性检验

为保证模型预测结果的可靠性,事先根据不同时段得出的土地利用转移矩阵结合相应的初始矩阵(各研究时段中所对应的末年地类占比)预测已知年份的地类面积占比,并分别与真实值进行比较.利用模型效应系数作为判断预测结果优劣的标准,若该值越接近于1,表明预测结果越接近真实情况^[40],预测精度越高.模型效应系数的计算公式如下:

$$W = 1 - \left[\frac{\sum (S_r - S_p)^2}{\sum (S_r - \bar{S}_r)^2} \right] \quad (12)$$

式中, W 为模型效应系数, S_r 为真实值, S_p 表示预测值, \bar{S}_r 为实际值的平均值。

3 结果与讨论

3.1 土地利用碳排放变化

基于土地利用转移矩阵分别得到了1995、2000、2005、2010、2015和2018年长株潭城市群土地利用的碳排放量.图1显示,长株潭城市群土地利用净碳排放总体呈上升趋势,24年间共增加了1204.57万t,年均增幅为50.19万t.其中,表现为碳汇作用的地类主要是林地,草地,水域和未利用地,它们的碳吸收总量下降了2.87万t.而作为碳源作用的耕地和建设用地,碳排放量总体增加1201.70万t.长株潭城市群碳源/碳汇的比值除在1995~2000年小幅下降外,其余时段均呈上升态势,特别是2018年碳源/碳汇比值达到18.69,是1995年的2.36倍,这表明长株潭城市群碳源在不断增强(或碳汇在不断下降).至于1995~2000年期间碳源/汇比处于小幅下降可能是在“九五”期间国家根据消费需求的变化,对煤炭企业采取了关停压产措施,致使原煤的产量和消费量大幅下

降,碳排放量及其占比相应降低,进而导致该时期长株潭城市群的碳源/碳汇比于2000年达到最低.至于2000~2005年碳源/碳汇比急剧上升可能是由于中国在2001年加入了世贸组织,长株潭城市群紧抓经济战略发展机遇,大力发展第二、三产业(2005年第二、三产业比重分别为44.2%和45.9%),城镇化水平大幅提升(2005年为49.3%),由于人口的急剧增加和经济的快速发展使大量区位条件较好的耕地和林地转向工矿用地和居民用地,导致对化石能源消耗迅速上升,进而使碳排放量及其占比相应增加.2005年后长株潭城市群源/汇比上升速度放缓,一方面可能是由于省域之间存在资本竞争和2008年爆发的金融危机,从而导致经济发展放缓,进而使能源消耗产生的碳排放增速下降;另一方面,湖南省自2005年推行了退耕还林草政策,加上社会低碳环保意识的增强,一些其它用地转变为林地和城市绿地,从而促使碳排放量趋于放缓。

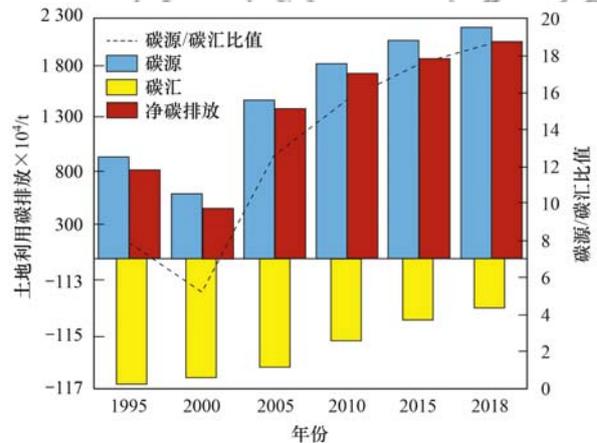


图1 长株潭城市群土地利用碳源、碳汇和源汇比变化

Fig. 1 Changes in land use carbon source, carbon sink, and source-sink ratio in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

就单个地类来看,除建设用地的碳排放和水域的碳吸收呈上升趋势外,其他地类的碳源或碳汇都有轻微的减弱(图2).以建设用地为例,在1995~2018年间,因城市化快速推进,土地集约化程度提高以及大量耕地和未利用地转化为建设用地,导致建设用地一直处于扩张态势,表现为转入速度是转出速度的17.6倍,土地利用动态度高达6.75%,用地面积净增加了976.84 km²,成为研究期间土地利用占比增加最多(占比从1995年的2.24%增加到2018年的5.73%)、扩张速度最快的地类(表2).由于建设用地的快速增长带动了能源消费的大幅提升,导致建设用地碳排放显著增加,其碳排放占比由1995年的89.74%上升到2018年的95.39%,成为碳排放占比最高的地类(图2).值得注意的是,2000

年建设用地的碳排放占比在整个研究期间最低,这可能与 1995~2000 年期间其它地类净转入建设用地的面积最少以及本身的土地利用动态度最低有关(表 2).此外,该时段国家大力调整能源政策和关停中小型高耗能燃煤电厂也可能是一个重要原因.就耕地而言,其碳排放量和占比均呈减小趋势,且变幅微小(图 2),即由 1995 年的 42.54 万 t 下降至 2018

年的 39.64 万 t.这可能是由于耕地非农化以及退耕还林草政策的实施导致耕地面积减少所致.表 2 显示,耕地面积在研究期间一直呈减少态势,其占比由 1995 年的 30.51% 下降至 2018 年的 28.44%,是所有地类中面积占比减少最多的地类.特别是 2010~2015 年,耕地转出面积为 622.04 km²,转出速度是转入速度的 1.5 倍.

表 2 1995~2018 年长株潭城市群土地利用变化¹⁾

Table 2 Land use change in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration from 1995 to 2018

年份	土地利用类型	未变化		转出		转入		净转入面积 /km ²	地类面积占比 /%	k/%
		面积 /km ²	面积 /km ²	速度 /km ² ·a ⁻¹	面积 /km ²	速度 /km ² ·a ⁻¹				
1995~2000	耕地	8 445.17	113.67	22.73	107.33	21.47	-6.34	30.51	-0.01	
	林地	17 815.81	115.70	23.14	72.27	14.45	-43.42	63.92	-0.05	
	草地	431.87	6.34	1.27	9.61	1.92	3.26	1.56	0.15	
	建设用地	601.07	28.55	5.71	49.46	9.89	20.91	2.24	0.66	
	未利用地	3.79	0.18	0.04	0.28	0.06	0.10	0.01	0.49	
	水域	482.72	8.33	1.67	33.82	6.76	25.49	1.75	1.04	
2000~2005	耕地	8 413.23	139.27	27.85	59.30	11.86	-79.97	30.49	-0.19	
	林地	17 758.56	129.52	25.90	66.83	13.37	-62.69	63.76	-0.07	
	草地	437.43	4.04	0.81	3.94	0.79	-0.10	1.57	-0.00	
	建设用地	644.27	6.26	1.25	146.29	29.26	140.02	2.32	4.30	
	未利用地	2.91	1.16	0.23	0.56	0.11	-0.60	0.01	-2.96	
	水域	506.95	9.59	1.92	12.93	2.59	3.34	1.84	0.13	
2005~2010	耕地	8 072.95	399.42	79.88	163.01	32.60	-236.41	30.20	-0.56	
	林地	17 496.42	327.53	65.51	166.20	33.24	-161.33	63.54	-0.18	
	草地	424.46	16.75	3.35	12.88	2.58	-3.87	1.57	-0.18	
	建设用地	743.51	47.04	9.41	425.60	85.12	378.56	2.82	9.58	
	未利用地	2.81	0.66	0.13	7.08	1.42	6.42	0.01	36.96	
	水域	477.25	42.56	8.51	59.20	11.84	16.64	1.85	0.64	
2010~2015	耕地	7 613.84	622.04	124.41	415.72	83.14	-206.32	29.36	-0.50	
	林地	17 091.09	570.85	114.17	435.53	87.11	-135.32	62.96	-0.15	
	草地	406.02	31.27	6.25	21.11	4.22	-10.16	1.56	-0.46	
	建设用地	1 094.08	75.02	15.00	404.80	80.96	329.78	4.17	5.64	
	未利用地	6.66	3.22	0.64	0.72	0.14	-2.50	0.04	-5.06	
	水域	491.77	44.66	8.93	69.18	13.84	24.53	1.91	0.91	
2015~2018	耕地	7 558.14	470.61	156.87	418.52	139.51	-52.08	28.63	-0.22	
	林地	17 051.08	470.00	156.67	407.04	135.68	-62.96	62.48	-0.12	
	草地	405.32	21.33	7.11	29.54	9.85	8.21	1.52	0.64	
	建设用地	1 410.17	88.67	29.56	196.27	65.42	107.60	5.34	2.39	
	未利用地	6.55	0.84	0.28	0.71	0.24	-0.12	0.03	-0.55	
	水域	518.88	41.78	13.93	41.13	13.71	-0.65	2.00	-0.04	
1995~2018	耕地	7 543.29	1014.57	44.11	433.45	18.85	-581.12	28.44	-0.30	
	林地	17 005.34	919.08	39.96	453.39	19.71	-465.72	62.25	-0.11	
	草地	393.74	43.86	1.91	41.19	1.79	-2.67	1.55	-0.03	
	建设用地	570.70	58.90	2.56	1 035.75	45.03	976.84	5.73	6.75	
	未利用地	2.22	1.75	0.08	5.04	0.22	3.29	0.03	3.60	
	水域	433.28	57.42	2.50	126.75	5.51	69.34	2.00	0.61	

1) 由于遥感影像分辨率等方面的原因,不同时期土地利用类型的总面积略有差异,但不影响分析结果; k 表示单一土地利用类型动态度指数,计算公式为: $K = \frac{U_2 - U_1}{U_1} \times \frac{1}{T_2 - T_1} \times 100\%$, 式中, U_1 和 U_2 分别为研究区内某一土地利用类型在 T_1 和 T_2 年份的面积, $U_2 - U_1$ 表示该地类在 $T_1 \sim T_2$ 时段内面积的变化; 各时段对应的地类面积占比分别表示 1995、2000、2005、2010、2015 和 2018 年的占比

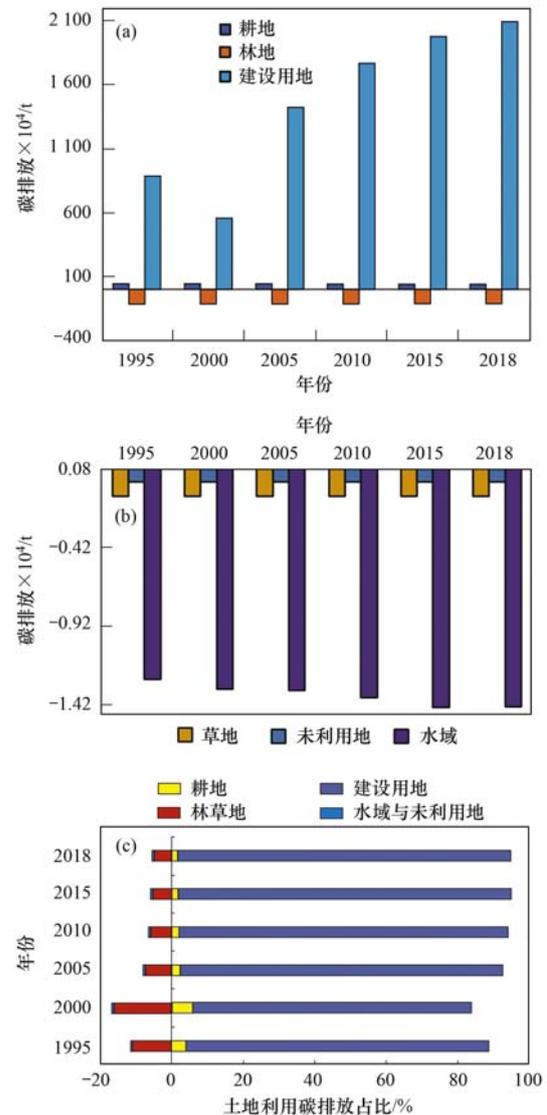
在碳汇地类中,除水域和未利用地外,林地、草地的碳吸收量及其占比均呈微幅下降趋势,占比由 1995 年的 11.06% 上升到 2000 年的 18.23% 再降低

至 2018 年的 5.01% [图 2(b)]. 林地碳吸收量占比的这种波动下降态势可能与它们持续向建设用地和耕地转移有关.从表 2 可知,在各个时段内林地转

出面积均在 43 km² 以上,整个研究期内林地、草地分别共转出 465.72 km² 和 2.67 km². 由于建设用地的持续扩张使得碳排放明显增强,这也可能是林地碳吸收占比明显下降的原因. 至于林草地的碳吸收量在 2000~2005 年下降最多,可能与该时段内林地净转化为其它地类的面积较多、变化较为活跃(动态度为 -0.18%)有关. 有研究指出^[21],当高碳密度的林地、草地向低碳密度的建设用地转移时通常表现为碳排放,也就是碳汇减少. 由于林地向其它用地转移面积最多,最终导致林地的碳吸收占比在该时段下降最为突出. 水域和未利用地的碳汇效应波动较弱,在整个期间,未利用地的碳吸收量仅增加了 2 t. 其原因是上述 2 种地类在研究区占比较少且变化较为平稳. 表 2 显示,水域和未利用地面积占比最高的年份分别为 2% 和 0.04%,加上它们本身的碳汇能力较弱,从而出现上述结果.

3.2 土地利用转移的碳传导效应

结合土地利用转移矩阵以及地类的碳源或碳汇能力,得到各时段土地利用转移的碳排放传导量. 表 3 中带星号的数值显示,研究期间各时段土地利用转移导致的碳传导效应均为净碳排放,并在时间上表现为先增加后减少的变化特征,即从第一时段(1995~2000 年)至第三时段(2005~2010 年)碳传导效应呈持续增加态势,至第五时段(2015~2018 年)则呈持续减少趋势. 在整个研究期间,碳源地类对各时段的碳排放起决定作用,其中建设用地的碳排放占碳源总量的 95% 以上,表明建设用地是地类转移中最主要的碳排放源. 从碳汇地向碳源地的转移看,林地和耕地向建设用地转移导致的碳传导效应最为显著. 表 3 显示,约有 95% 以上的碳传导是由林地和耕地转化为建设用地所致. 如由林地转移到建设用地引起的碳传导效应在 1995~2000 年为 19.29×10^4 t,至 2005~2010 年增加到 279.05×10^4 t. 尽管在 2010~2015 年和 2015~2018 年两个时段林地转移至建设用地的碳传导量有所下降,但仍维持在 232.77×10^4 t 和 114.21×10^4 t. 耕地转移至建设用地产生的碳传导效应亦呈先增加后减少的态势,且在转移幅度上多数时段超过林地(表 3). 水域、草地和未利用地转出引起的碳传导效应与林、耕地转移导致的碳传导变化类似,也是呈先上升后下降的态势. 不同的是除水域向建设用地与耕地转移产生一定的碳传导效应外(如 2005~2010 年达 18.26×10^4 t),草地和未利用地转移导致的碳传导效应很小,各时段均维持在 1% 以下,这可能与二者本身面积不大且转出较少有关.



草地碳排放归入林草地,未利用地归并为水域和未利用地

图 2 长株潭城市群土地利用碳排放变化及其占比

Fig. 2 Change and proportion of carbon emissions from land use in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

在碳源地向碳汇地的转移过程中,主要是建设用地向耕地、林地和水域等碳汇地转移. 其中,建设用地向耕地和林地转移导致的碳传导(碳吸收)量达到了 90%. 具体而言,在 1995~2000 年期间由建设用地转移至碳汇地所增加的碳吸收量为 40.07×10^4 t,除 2000~2005 年建设用地转出增加的碳汇略有下降外,其它两个时段(2010~2015 年和 2015~2018 年)均为上升态势,即由建设用地转出增加的碳吸收量均达 120×10^4 t 左右. 尽管这对日趋减弱的碳汇压力有所缓解,但仍无法遏制因建设用地扩张导致的碳排放上升. 此外,由于耕地既是碳源地也是碳汇地,因此,当其向碳汇地转移时也会增加部分碳吸收. 表 3 显示,耕地向碳汇地转移导致的碳吸收呈波动上升趋势,即由 1995~2000 年的 0.89×10^4 t 增加至 2015~2018 年的 4.09×10^4 t,其中增加的碳

表 3 1995 ~ 2018 年长株潭城市群地类转移的碳传导效应¹⁾ × 10³/tTable 3 Carbon conduction effect of land type transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration from 1995 to 2018 × 10³ t

时段	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地	水域	转出碳
1995 ~ 2000 年 (第一时段)	耕地	-6.77	-0.04	220.41	0.00	-2.08	211.53
	林地	9.26	0.54	192.89	0.01	0.13	202.83
	草地	0.09	-0.27	0.22	0.00	0.00	0.04
	建设用地	-287.39	-75.71	-0.39		0.00	-37.23
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	水域	0.29	-0.13	0.00	9.78	0.00	9.94
	转入碳	-277.74	-82.88	0.11	423.3	0.01	-39.17
	总计	-66.22	119.95	0.16	22.58	0.01	-29.23
2000 ~ 2005 年 (第二时段)	耕地	-6.83	-0.04	1 256.22	-0.01	-0.62	1 248.71
	林地	5.99	0.13	1 277.90	0.00	0.16	1 284.18
	草地	0.04	-0.16	11.69	0.00	0.00	11.57
	建设用地	-32.71	-18.18	-0.23		0.00	-2.41
	未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
	水域	0.16	-0.09	0.00	85.69	0.01	85.77
	转入碳	-26.52	-25.26	-0.15	2 631.50	0.00	-2.88
	总计	1 222.20	1 258.92	11.42	2 577.97	-0.01	82.89
2005 ~ 2010 年 (第三时段)	耕地	-14.44	-0.19	3 424.79	-0.02	-3.08	3 407.05
	林地	13.32	0.52	2 790.51	0.40	0.47	2 805.23
	草地	0.08	-0.78	30.39	0.00	-0.02	29.68
	建设用地	-441.20	-310.00	-3.23		-3.06	-88.35
	未利用地	0.00	0.00	0.00	1.27	-0.01	1.26
	水域	1.50	-1.95	0.05	181.08	0.02	180.7
	转入碳	-426.29	-327.17	-2.85	6 428.03	-2.65	-90.98
	总计	2 980.76	2 478.06	26.82	6 024.63	-1.4	89.72
2010 ~ 2015 年 (第四时段)	耕地	-41.51	-0.23	2 871.82	-0.01	-2.62	2 827.46
	林地	39.82	0.99	2 327.67	0.03	1.17	2 369.68
	草地	0.25	-1.48	24.49	0.00	-0.02	23.25
	建设用地	-634.71	-437.95	-73.71		-0.28	-53.44
	未利用地	0.01	-0.16	0.00	2.80	0.00	2.64
	水域	1.45	-0.65	0.01	108.95	0.00	109.77
	转入碳	-593.16	-481.75	-72.94	5 335.74	-0.25	-54.91
	总计	2 234.29	1 887.93	-49.70	41 35.66	2.39	54.85
2015 ~ 2018 年 (第五时段)	耕地	-39.08	-0.25	1 330.26	-0.01	-1.54	1 289.39
	林地	39.06	1.48	1 142.06	0.02	0.63	1 183.26
	草地	0.23	-0.97	13.21	0.00	-0.01	12.46
	建设用地	-674.41	-433.44	-8.61		-0.33	-51.55
	未利用地	0.01	-0.03	0.00	1.97	0.00	1.95
	水域	1.52	-0.62	0.01	66.27	0.00	67.18
	转入碳	-633.60	-474.13	-7.37	2 553.77	-0.30	-52.47
	总计	655.79	709.13	5.09	1 385.44	1.64	14.71

1) 行表示时段内某地类向其他地类转移的碳传导量,即转出碳;列为其它地类转化为某种土地利用类型时的碳传导量,即转入碳;总计表示某种地类转出碳和转入碳的和;*表示所有土地利用类型的转出碳和转入碳的和;正值表示碳排放,负值表示碳吸收

吸收有 80% 以上来自耕地向林地的转移。

从碳汇地或碳源地内部的土地利用转移来看,因受退耕还林草政策的引导,碳汇地内部主要是耕地与林地之间的转化较为活跃,碳传导量在研究期间整体呈上升态势。不同的是,耕地向其他碳汇地转移导致的碳传导效应使碳排放减少,而林地向其他碳汇地转移导致的碳传导效应却使碳排放增加(表 3)。如林地向草地、水域和未利用地转移在 2010 ~ 2015 和 2015 ~ 2018 年分别使碳排放量增加 0.22×10^4 t 和 0.21×10^4 t。原因在于林地的碳汇能力大于

其它碳汇地类,从而导致林地转移至其他碳汇地类后碳排放量增加。尽管林地的高碳汇特性也有利于其他碳汇地转移至林地时减少碳排放,但由于研究区草地和水域转移至林地的面积很少,进而使林地的碳汇增加较少。关于碳源地内部地类的碳传导主要发生在建设用地与耕地(耕地既是碳源地又是碳汇地)之间的相互转移,在此不再赘述。

3.3 土地利用碳排放预测

3.3.1 土地利用直接碳排放预测结果

将长株潭城市群不同时期的土地利用转移矩阵

分别作为概率转移矩阵进行预测,对比精度验证见表 4,之所以选择 1995~2015 年作为总研究时段,是因为可以根据 2015 年的土地利用类型初始矩阵

结合 VI 期得出的转移矩阵预测 2018 年的地类情况,有助于比较分时段预测和整体预测的精度好坏和结果差异。

表 4 长株潭城市群各土地利用类型面积占比实际值与预测值对比¹⁾

Table 4 Comparison between actual value and predicted value of area proportion of various land use types in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration

年份	面积占比/%	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地	水域	W/%
2005	实际值	0.302 0	0.635 4	0.015 7	0.028 2	0.000 1	0.018 5	
	I 期预测值	0.304 1	0.630 2	0.016 3	0.026 4	0.000 2	0.022 8	99.99
2010	实际值	0.293 6	0.629 7	0.015 6	0.041 7	0.000 4	0.019 1	
	I 期预测值	0.303 9	0.623 3	0.016 8	0.029 0	0.000 2	0.026 8	99.88
	II 期预测值	0.288 8	0.624 4	0.015 7	0.052 0	0.000 1	0.019 1	99.95
2015	实际值	0.286 3	0.624 8	0.015 2	0.053 4	0.000 3	0.020 0	
	I 期预测值	0.304 1	0.616 9	0.017 2	0.031 0	0.000 2	0.030 5	99.68
	II 期预测值	0.277 1	0.613 8	0.015 6	0.074 0	0.000 1	0.019 5	99.80
	III 期预测值	0.281 3	0.618 8	0.015 7	0.064 4	0.000 1	0.019 6	99.94
2018	实际值	0.284 4	0.622 5	0.015 5	0.057 3	0.000 3	0.020 0	
	I 期预测值	0.304 4	0.613 2	0.017 5	0.032 1	0.000 2	0.032 7	99.58
	II 期预测值	0.270 8	0.607 6	0.015 5	0.086 3	0.000 1	0.019 8	99.59
	III 期预测值	0.274 7	0.612 5	0.015 6	0.077 2	0.000 1	0.019 9	99.81
	IV 期预测值	0.279 2	0.618 4	0.015 3	0.066 8	0.000 1	0.020 2	99.96
	VI 期预测值	0.249 6	0.586 4	0.014 3	0.123 1	0.000 4	0.026 2	97.75

1) 将 1995~2000、2000~2005、2005~2010 和 2010~2015 年分别表示为 I~IV 期,总时段 1995~2015 年表示为 VI 期;W 为 2.2.4 中述及的模型效应系数

从表 4 中可以看出,任意分时段中的模型效应系数都比总体研究时段得出的结果要更接近于 1,这意味着分时段转移矩阵精度要高于整体研究。此外,对于某一确定预测时间点的土地利用状况,选择不同分时段转移矩阵会产生不同的预测结果。结果显示,采用分研究时段的转移矩阵时的模型效应系数越临近预测值,相应的模型效应系数越高,预测结果更贴于真实情况。基于上述结论并充分考

虑数据的可获得性,本文将 2018 年的地类占比情况作为初始矩阵,选择 IV 期土地利用变化情况作为转移矩阵,运用马尔科夫模型对 2030 年(实现碳达峰)和 2060 年(达成碳中和)的土地利用状态及发展趋势进行预测(表 5),得到长株潭城市群各地类的土地面积。

根据式(1)计算出长株潭城市群 2030 年和 2060 年土地利用直接碳排放预测量(表 6)。

表 5 2030 年和 2060 年长株潭城市群土地面积预测结果/km²

Table 5 Prediction results of land areas of Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration in 2030 and 2060/km²

年份	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地	水域
2030	7 286. 846 72	16 764. 196 37	431. 589 72	2 982. 349 24	2. 056 72	583. 294 14
2060	6 268. 932 31	15 269. 311 35	411. 686 71	5 483. 730 73	1. 903 09	614. 768 74

表 6 2030 年和 2060 年长株潭城市群土地利用直接碳排放预测结果 ×10³/t

Table 6 Prediction results of direct carbon emissions from land use of Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration in 2030 and 2060 ×10³/t

年份	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地
2030	362. 156 28	-1 079. 614 25	-0. 906 34	-0. 001 03	-14. 757 34
2060	311. 565 94	-983. 343 65	-0. 864 54	-0. 000 95	-15. 553 65

3.3.2 土地利用间接碳排放预测

根据数据公布情况,选择湖南省 2017 年的能源消费数据作为初始值,结合式(11)求得平均转移

概率矩阵 P,运用马尔科夫模型预测 2018 年的能源结构并对比已知真实能源情况进行精度验证(表 7)。

表 7 2018 年湖南省各能源消费量占比实际值与预测值对比

Table 7 Comparison between actual value and predicted value of energy consumption in Hunan province in 2018

项目	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	W/%
真实值	0.805 28	0.076 71	0.000 30	0.051 96	0.004 81	0.051 43	0.007 33	0.002 18	
预测值	0.781 11	0.084 21	0.000 08	0.062 37	0.005 48	0.056 33	0.007 85	0.002 57	99.85

表7中显示,模型效应系数 W 为 99.85% 接近于 1, 预测结果较好, 表明预测模型具备合理性和可靠性. 因此选择目前数据公布最近年份(2018年)的

能源消费情况作为初始向量, 结合由 1995~2018 年历史能源数据得到的平均转移概率矩阵 P , 预测湖南省 2030 年和 2060 年的能源消费结构(表 8).

表 8 2030 年和 2060 年湖南省能源结构预测结果 $\times 10^4/t$

Table 8 Prediction results of energy structure in Hunan province in 2030 and 2060 $\times 10^4/t$

年份	原煤	焦炭	原油	汽油	煤油	柴油	燃料油	天然气	省碳排放量
2030	8 573.403 16	1 135.007 15	16.007 01	843.682 75	62.521 05	768.770 56	82.371 23	44.767 08	7 328.194 85
2060	8 067.001 09	1 288.566 23	18.820 98	1 025.815 64	63.103 49	906.157 58	76.473 80	80.591 31	7 660.481 34

基于 1995~2018 年长株潭碳排放占比历史数据利用灰色预测 GM(1,1) 模型^[41] 预测 2030 年和 2060 年长株潭城市群碳排放占比并验证满足模型精度, 分别为 0.308 7 和 0.354 5, 得到长株潭城市群 2030 年和 2060 年建设用地产生的碳

排放量分别为 $2\,262.291 \times 10^4 t$ 和 $2\,715.503 \times 10^4 t$.

3.3.3 长株潭城市群土地利用碳排放预测汇总

汇总得到通过马尔科夫模型预测得到的长株潭城市群土地利用碳排放总量见表 9.

表 9 2030 年和 2060 年长株潭城市群土地利用总碳排放预测结果 $\times 10^4/t$

Table 9 Prediction results of total carbon emissions from land use in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration in 2030 and 2060 $\times 10^4/t$

年份	耕地	林地	草地	建设用地	未利用地	水域	碳排放量
2030	36.215 63	-107.961 42	-0.090 63	2 262.291 06	-0.000 10	-1.475 73	2 188.978 80
2060	31.156 59	-98.334 37	-0.086 45	2 715.503 05	-0.000 10	-1.555 36	2 646.683 36

4 建议

基于本文针对长株潭城市群土地利用变化引起的碳排放传导及土地利用碳排放量的预测结果, 保证“双碳目标”的如期实现, 在此作如下建议: ①政府要严格限制退耕还林还草和有序扩大建设用地, 适度退耕还林还湖还草, 增加林地的碳汇能力. 可以通过加强土地生态建设, 构建科学合理的低碳排放土地利用体系, 实现土地利用的“增汇减源”; 长株潭城市群实现碳达峰碳中和仍有难度; ②提高化石能源利用效率和新能源比重, 构建绿色多元化能源供应体系. ③协调产业结构、土地利用结构与经济发展的关系, 实施煤炭资源税改革, 依靠科技进步实现城市群产业链转型升级.

5 结论

(1) 1995~2018 年长株潭城市群土地利用净碳排放从 $810.84 \times 10^4 t$ 增加到 $2\,015.41 \times 10^4 t$, 碳源/汇比总体呈上升趋势, 表明研究区的碳源在增强, 而碳汇作用在下降. 其中, 碳源地类特别是建设用地对各时段的碳排放起决定作用, 而林地和草地是主要的碳汇.

(2) 不同时段长株潭城市群地类转移导致的碳传导效应最终结果均为净碳排放, 并在时间上表现为先增加(从 1995~2000 年至 2005~2010 年碳传导呈持续增加)后减少(从 2005~2010 年至 2015~2018 年呈持续减少)的变化态势; 其中以林地和耕

地向建设用地转移导致的碳传导效应最为显著, 而建设用地向碳汇地类转移增加的碳汇量无法缓解林耕地向建设用地转移产生的高碳排放. 草地、水域和未利用地转移产生的碳传导效应微弱.

(3) 根据 1995~2018 年的实际数据预测 2030 年和 2060 年土地利用碳排放量, 可以得到研究区的土地利用碳排放量一直处于上涨趋势, 这与实现“双碳”目标仍存在显著差距. 但深究其中, 不乏存在一些可喜的趋势变化: 如耕地产生的碳排放自 2015 年呈现递减状态, 作为碳源主力军的建设用地所产生的碳排放上升速率也在逐渐减缓. 草地的碳吸收量不断增加, 表明其碳汇能力在增强. 这些都体现出碳源/汇在往更加合理科学的趋势方向演化. 需要引起重视的是, 作为主要碳汇地的林地在研究期间的碳汇能力一直在降低, 预测未来林地的碳吸收量将会是更为急剧地下降. 因此, 该如何及时遏制林地的碳流失情况并增强林地的碳汇能力, 成为长株潭城市群未来发展亟待解决的重点问题.

参考文献:

- [1] Tang X J, Woodcock C E, Olofsson P, et al. Spatiotemporal assessment of land use/land cover change and associated carbon emissions and uptake in the Mekong River Basin[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256, doi: 10.1016/j.rse.2021.112336.
- [2] 范建双, 虞晓芬, 周琳. 南京市土地利用结构碳排放效率增长及其空间相关性[J]. 地理研究, 2018, 37(11): 2177-2192.
Fan J S, Yu X F, Zhou L. Carbon emission efficiency growth of land use structure and its spatial correlation: a case study of Nanjing city[J]. Geographical Research, 2018, 37(11): 2177-

- 2192.
- [3] Simmonds M B, Di Vittorio A V, Jahns C, *et al.* Impacts of California's climate-relevant land use policy scenarios on terrestrial carbon emissions (CO₂ and CH₄) and wildfire risk [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(1), doi: 10.1088/1748-9326/abcc8d.
- [4] Zhou Y, Chen M X, Tang Z P, *et al.* Urbanization, land use change, and carbon emissions: quantitative assessments for city-level carbon emissions in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, **66**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102701.
- [5] Zhao R Q, Huang X J, Zhong T Y, *et al.* Carbon footprint of different industrial spaces based on energy consumption in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, **21**(2): 285-300.
- [6] 马晓哲, 王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展 [J]. *生态学报*, 2015, **35**(17): 5898-5907.
Ma X Z, Wang Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(17): 5898-5907.
- [7] 周嘉, 王钰莹, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究 [J]. *地理科学*, 2019, **39**(12): 1955-1961.
Zhou J, Wang Y X, Liu X R, *et al.* Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, **39**(12): 1955-1961.
- [8] Wang L, Pei J, Geng J, *et al.* Tracking the spatial-temporal evolution of carbon emissions in China from 1999 to 2015: a land use perspective [J]. *Sustainability*, 2019, **11**(17): 4531.
- [9] Le Quéré C, Andres R J, Boden T, *et al.* The global carbon budget 1959-2011 [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2013, **5**: 165-185.
- [10] Houghton R A, Nassikas A A. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850-2015 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2017, **31**(3): 456-472.
- [11] Yu Z, Lu C Q, Tian H Q, *et al.* Largely underestimated carbon emission from land use and land cover change in the conterminous United States [J]. *Global Change Biology*, 2019, **25**(11): 3741-3752.
- [12] 景勇, 左玲丽, 彭文甫. 四川盆地西北部土地利用碳排放时空变化分析: 以绵阳市为例 [J]. *环境科学与技术*, 2021, **44**(6): 172-185.
Jing Y, Zuo L L, Peng W F. Spatial-temporal change analysis of carbon emission from land use in Mianyang: the case study of Mianyang [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, **44**(6): 172-185.
- [13] 杨皓然, 吴群. 基于系统 GMM 面板模型的土地利用碳排放效应研究——以中国省际面板数据为例 [J]. *土壤通报*, 2019, **50**(3): 541-549.
Yang H R, Wu Q. Carbon emission effects of land use based on system GMM panel model-taking Chinese provincial panel data as an example [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, **50**(3): 541-549.
- [14] Wang C, Zhan J Y, Zhang F, *et al.* Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **281**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125138.
- [15] Victoria M F, Perera S. Parametric embodied carbon prediction model for early stage estimating [J]. *Energy and Buildings*, 2018, **168**: 106-119.
- [16] Babbar D, Areendran G, Sahana M, *et al.* Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **278**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123333.
- [17] Wang D, Nie R, Long R Y, *et al.* Scenario prediction of China's coal production capacity based on system dynamics model [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, **129**: 432-442.
- [18] Oh Y G, Choi J Y, Bae S J, *et al.* A probability mapping for land cover change prediction using CLUE model [J]. *Journal of Korean Society of rural Planning*, 2010, **16**(2): 47-55.
- [19] Cao W, Yuan X. Region-county characteristic of spatial-temporal evolution and influencing factor on land use-related CO₂ emissions in Chongqing of China, 1997-2015 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **231**: 619-632.
- [20] Li S J, Zhou C S. What are the impacts of demographic structure on CO₂ emissions? A regional analysis in China via heterogeneous panel estimates [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2021-2031.
- [21] 冯杰, 张胜, 王涛. 中国省际土地利用碳排放及其影响因素分析 [J]. *统计与决策*, 2019, **35**(5): 141-145.
- [22] Yang B, Wang Z Q, Zou L, *et al.* Exploring the eco-efficiency of cultivated land utilization and its influencing factors in China's Yangtze River Economic Belt, 2001-2018 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **294**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112939.
- [23] Fei R L, Lin Z Y, Chunga J. How land transfer affects agricultural land use efficiency: evidence from China's agricultural sector [J]. *Land Use Policy*, 2021, **103**, doi: 10.1016/j.landusepol.2021.105300.
- [24] 马海良, 丁元卿, 庞庆华. 武汉市湖泊水域利用转变及其碳排放影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2020, **29**(2): 369-375.
Ma H L, Ding Y Q, Pang Q H. Utilization change of lake and its carbon emission in Wuhan city [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, **29**(2): 369-375.
- [25] 李键, 毛德华, 蒋子良, 等. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究 [J]. *生态经济*, 2019, **35**(8): 28-34, 66.
Li J, Mao D H, Jiang Z L, *et al.* Research on factors decomposition and decoupling effects of land use carbon emissions in Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Ecological Economy*, 2019, **35**(8): 28-34, 66.
- [26] 孙贤斌. 安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益 [J]. *自然资源学报*, 2012, **27**(3): 394-401.
Sun X B. Effects of carbon emission by land use patterns in Hefei's economic circle of Anhui Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(3): 394-401.
- [27] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981~2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, **37**(6): 804-812.
- [28] 石洪昕, 穆兴民, 张应龙, 等. 四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究 [J]. *水土保持通报*, 2012, **32**(3): 101-106.
Shi H X, Mu X M, Zhang Y L, *et al.* Effects of different land use patterns on carbon emission in Guangyuan city of Sichuan province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(3): 101-106.
- [29] 段晓男, 王效科, 逯非, 等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 463-469.
Duan X N, Wang X K, Lu F, *et al.* Carbon sequestration and its

- potential by wetland ecosystems in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(2): 463-469.
- [30] Lai L, Huang X J, Yang H, *et al.* Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010 [J]. *Science Advances*, 2016, **2**, doi: 10.1126/sciadv.1601063.
- [31] 王勇, 程瑜, 杨光春, 等. 2020 和 2030 年碳强度目标约束下中国碳排放权的省区分解[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 3180-3188.
Wang Y, Cheng Y, Yang G C, *et al.* Provincial decomposition of China's carbon emission rights under the constraint of 2020 and 2030 carbon intensity targets[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3180-3188.
- [32] 李帅. 碳排放权的总量核算与跨行政区域分配——以浙江省为例[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
Li S. Accounting for the overall carbon emission allowance and its cross-administrative regional allocation: a case of Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [33] 马海良, 张红艳, 吴凤平. 基于情景分析法的中国碳排放分配预测研究[J]. *软科学*, 2016, **30**(10): 75-78.
Ma H L, Zhang H Y, Wu F P. Research on the prediction of carbon emissions distribution based on simulation analysis[J]. *Soft Science*, 2016, **30**(10): 75-78.
- [34] 李玉, 牛路, 赵泉华. 抚顺矿区 1989-2019 年土地利用/覆盖变化分析[J]. *测绘科学*, 2021, **46**(8): 96-104, 140.
Li Y, Niu L, Zhao Q H. Analysis of land use/cover change in Fushun mining area from 1989 to 2019[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, **46**(8): 96-104, 140.
- [35] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, **69**(1): 54-63.
Wu L N, Yang S T, Liu X Y, *et al.* Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(1): 54-63.
- [36] 裴杰, 王力, 柴子为, 等. 基于 RS 和 GIS 的深圳市土地利用/覆被变化及碳效应分析[J]. *水土保持研究*, 2017, **24**(3): 227-233.
- Pei J, Wang L, Chai Z W, *et al.* Land use/cover change and carbon effect in Shenzhen city based on RS and GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, **24**(3): 227-233.
- [37] Huang H, Zhou Y, Qian M J, *et al.* Land use transition and driving forces in Chinese Loess Plateau: A case study from Pu County, Shanxi province[J]. *Land*, 2021, **10**(1): 67.
- [38] 牛东晓, 孙伟, 赵磊. 基于转移矩阵识别的马尔可夫能源结构预测模型[J]. *华北电力大学学报*, 2004, **31**(3): 59-61.
Niu D X, Sun W, Zhao L. Markov energy structure prediction model based on transfer matrix recognition[J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2004, **31**(3): 59-61.
- [39] 翁智雄, 马忠玉, 葛察忠, 等. 不同经济发展路径下的能源需求与碳排放预测——基于河北省的分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3508-3517.
Weng Z X, Ma Z Y, Ge C Z, *et al.* Projection on energy demand and carbon emission in various economic developing pathways—A case study in Hebei province [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3508-3517.
- [40] 裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. *土壤通报*, 2017, **48**(3): 525-531.
Pei L, Chen C, Dai J G, *et al.* Research on forecast trend of land use and land cover change in Daling River basin based on Markov model[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, **48**(3): 525-531.
- [41] 邓荣荣. 惯性发展情境下湖南省能否实现 2020 年减碳目标? ——基于 GM(1,1) 模型预测[J]. *资源开发与市场*, 2017, **33**(7): 802-806, 848.
Deng R R. Could Hunan province achieve the goal of carbon reduction in 2020 under the inertial scenario? —Based on GM(1, 1) models forecast[J]. *Resource Development & Market*, 2017, **33**(7): 802-806, 848.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i> (5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning (5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i> (5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i> (5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu (5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i> (5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i> (5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i> (5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i> (5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i> (5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i> (5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i> (5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i> (5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i> (5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i> (5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i> (5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i> (5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i> (5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i> (5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i> (5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i> (5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i> (5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i> (5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i> (5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i> (5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i> (5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i> (5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i> (5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i> (5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i> (5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i> (5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i> (5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i> (5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i> (5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i> (5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i> (5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i> (5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i> (5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i> (5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i> (5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i> (5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i> (5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin (5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao (5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i> (5861)