DOI: 10.20103/j.stxb.202306161285

汪托弟,徐丽萍,李智慧,佟永鹏,张茹倩,曹翠,席芸芸.双碳目标下乌鲁木齐市碳氧平衡估算与影响因素分析.生态学报,2025,45(3):1289-1302.
Wang T D,Xu L P,Li Z H,Tong Y P,Zhang R Q,Cao C,Xi Y Y.Estimation of carbon and oxygen balance and analysis of influencing factors in Urumqi city under the goal of double carbon.Acta Ecologica Sinica,2025,45(3):1289-1302.

双碳目标下乌鲁木齐市碳氧平衡估算与影响因素分析

汪托弟[1],徐丽萍[1,2,*],李智慧[1],佟永鹏[1],张茹倩[1],曹 翠[1],席芸芸[1]

1 石河子大学理学院,石河子 832000

2 绿洲城镇与山盆系统生态兵团重点实验室,石河子 832000

摘要:碳氧平衡估算可以从源头量化区域自然与社会经济系统的平衡状态,对实现“双碳”目标,助推城市高质量发展具有积极的现实意义。基于碳氧平衡理论,综合乌鲁木齐市社会经济系统的五种排碳耗氧行为和自然生态系统的五种固碳释氧来源,构建碳氧平衡估算模型,分析碳氧平衡状态和影响因素。结果表明:(1)2000—2020 年,乌鲁木齐市排碳耗氧量逐年增加,排碳量增加幅度高于耗氧量,排碳量和耗氧量的年均增长率分别为 6.49%和 5.10%,2000—2014 年为快速增长阶段,2014—2020 年为缓慢增长阶段。排碳耗氧的主要来源是工业消耗和交通运输。(2)2000—2020 年,固碳释氧量整体呈略微下降的趋势,固碳量和释氧量的年均变化率为-0.12%。研究期间草地是全市固碳释氧的关键地类,其次是林地,城镇绿地的固碳释氧潜力较大,各生态系统的固碳释氧量变化趋势与各地类面积变化趋势基本吻合。(3)近 20 年乌鲁木齐市处于碳氧非平衡状态,且不平衡的状态在逐年加剧。碳平衡指数在[-0.61,-0.88],氧平衡指数在[-0.58,-0.83],排碳与固碳之间的压力高于耗氧与释氧之间的压力,自然生态系统固定的 CO_2 和释放的 O_2 不能抵消社会经济系统排放的 CO_2 和消耗的 O_2。(4)城镇化规模、城市生态状况、能源结构和经济发展是驱动乌鲁木齐市碳氧平衡变化的极重要因素。避免城市无序扩张,构建清洁能源体系和巩固生态系统碳汇能力是调节乌鲁木齐市碳氧平衡状态的有效措施。研究结果为乌鲁木齐市“碳达峰、碳中和”目标和路径实现提供数据参考和碳氧平衡调控建议。

关键词:碳排放;碳氧平衡模型;偏最小二乘法;影响因素;乌鲁木齐市

Estimation of carbon and oxygen balance and analysis of influencing factors in Urumqi city under the goal of double carbon

WANG Tuodi[1],XU Liping[1,2,*],LI Zhihui[1],TONG Yongpeng[1],ZHANG Ruqian[1],CAO Cui[1],XI Yunyun[1]

1 *College of Science,Shihezi University,Shihezi* 832000,*China*

2 *Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology,Shihezi* 832000,*China*

Abstract: The estimation of carbon and oxygen balance can quantify the balance state of regional natural and socio-economic systems from the source, which is of positive practical significance for realizing the goal of “double carbon” and promoting the high-quality development of the city. Based on the theory of carbon and oxygen balance, this study synthesizes the five types of carbon emission and oxygen consumption behaviors of the socio-economic system and the five sources of carbon sequestration and oxygen release in Urumqi′s natural ecosystems. Furthermore, it constructs a carbon and oxygen balance estimation model to analyze the state of carbon and oxygen balance and the influencing factors. The results show that: (1) From 2000 to 2020, carbon emissions and oxygen consumption increased annually, with carbon emissions growing at a faster rate. The average annual growth rates were 6.49% for carbon emissions and 5.10% for oxygen consumption. The period from 2000 to 2014 saw rapid growth, while growth slowed from 2014 to 2020, primarily due to industrial activities

基金项目:国家自然科学基金项目(31760151);石河子大学创新发展专项项目(XJ2023002602)

收稿日期:2023-06-16; **网络出版日期**:2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xlpalw@163.com

and transportation. (2) From 2000 to 2020, carbon fixation and oxygen release showed a slight overall declining trend, with an average annual rate of change of -0.12%. During the study period, grasslands were the primary land type for carbon fixation and oxygen release, followed by woodlands, while urban green spaces demonstrated significant potential. The trends in carbon sequestration and oxygen release across ecosystems closely aligned with changes in the area of each land type. (3) Over the past 20 years, Urumqi has been in a state of carbon and oxygen imbalance, which has worsened annually. The carbon balance index ranged from −0.61 to −0.88, while the oxygen balance index ranged from −0.58 to −0.83. The pressure between carbon emissions and carbon sequestration is greater than that between oxygen consumption and oxygen release. The CO_2 sequestered and O_2 released by the natural ecosystem cannot offset the CO_2 emissions and O_2 consumption by the socio-economic system. (4) The scale of urbanization, the ecological status of the city, the energy structure and the economic development are the most important factors driving the change of carbon and oxygen balance in Urumqi. Avoiding disorderly urban expansion, building a clean energy system and consolidating the carbon sink capacity of the ecosystem are effective measures for regulating the carbon and oxygen balance state in Urumqi. This study provides data references and suggestions of carbon and oxygen balance regulation for the realization of the goal and path of "carbon peak and carbon neutralization" in Urumqi.

Key Words: carbon emissions; carbon-oxygen balance model; partial least squares; influencing factors; Urumqi

随着全球气候公约《巴黎协定》的签署,减少碳排放成为各国普遍关心的全球性问题。城市是 CO_2等温室气体的主要生产者,更是碳中和的主体[1]。在党中央统筹国内国际两个大局作出"碳达峰、碳中和"重大战略决策的背景下,客观分析城市碳氧平衡状态,减少城市碳排放、增加碳汇对城市可持续发展起着关键作用,对调节人类经济活动过程中的碳氧收支问题和助力我国"双碳"目标的实现意义重大。乌鲁木齐在落实"双碳"目标任务的过程中,面临能源结构偏煤、工业结构偏重、交通运输结构偏公等诸多挑战。碳氧平衡是一定区域人类活动排放 CO_2和消耗 O_2的总量与植被吸收 CO_2和释放 O_2的总量达到相对平衡的理论[2—5]。碳氧平衡能力的强弱对区域内生态质量的好坏和可持续发展具有重要作用。

目前有关碳氧平衡的研究主要集中在两个方面:一是碳源碳汇的研究。化石能源是重要的碳源,学术界多基于排放系数法对地区的化石能源碳排放进行核算和分析[6]。碳汇的研究最早是从森林碳汇开始的,现对农田、草原、城市绿地等生态系统碳汇的研究日益广泛[7]。碳源碳汇的研究尺度主要集中在国家[8]、区域[9—10]、省域范围[11—12],在市域范围之下的相关研究较少;从研究内容来看,主要集中在定量测度区域碳源碳汇、空间分异状况、区域差异等方面[13—15]。二是有关碳氧平衡的实证研究。各学者针对不同需求对不同区域展开,前人的研究已根据碳氧平衡理论构建了不同的碳氧平衡模型。尹锴等[16]通过计算碳氧通量构建了城市碳氧平衡模型(UCOB),认为人口呼吸,家庭、工业和交通能源的使用引起排碳耗氧,耕地、林地和草地是主要的固碳释氧源。其后的研究多是在此基础上扩展,根据研究需求确定不同的排碳耗氧和固碳释氧。尹锴等[17]在 UCOB 的基础上,增加对水体固碳释氧和对固体废弃物排碳耗氧的考虑。Li 等[2]从城市化石能源消耗和城市森林两个角度着手构建了城市森林碳氧平衡模型。杨帆等[18]将化石燃料焚烧、制造水泥和人口呼吸确定为排碳耗氧的主要来源。随着碳氧平衡研究的不断深入,学者们逐渐将碳氧平衡法引入区域生态用地需求测算和土地利用结构优化中[19—22]。

总体而言,前期对于碳氧平衡理论的研究和实证应用,对本文具有重要的参考价值。但现有的研究多集中在南京市[1]、北京市[5]、厦门市[20]、武汉市[21]等较发达城市区域,西部城市碳氧平衡相关研究并不多见。其次,已有研究对排碳耗氧和固碳释氧来源考虑不尽相同,对城市复合系统长时间序列碳氧平衡的研究仍较为鲜见。乌鲁木齐市作为新疆高质量发展的核心引擎,在产业和城镇化快速发展的同时,高污染、高能耗、高碳排产业突出,制约城市高质量发展[23]。在建设美丽新疆,构建人与自然和谐共同体战略机遇下,缓解乌鲁木齐市碳减排压力和生态环境问题迫在眉睫。因此,本研究尽可能全面考虑城市碳氧收支过程,利用社会经

济统计数据和土地利用数据对乌鲁木齐市 2000—2020 年期间的排碳耗氧量和固碳释氧量进行估算,分析乌鲁木齐市碳氧平衡的演变趋势,构建归一化碳氧平衡指数,分析影响乌鲁木齐市碳氧平衡状态,探寻其主要影响因素,提出减排增汇建议,为实现区域碳中和提供数据支持。

1　研究区与数据来源

1.1　研究区概况

乌鲁木齐市地处亚欧大陆腹地、新疆中部(86°37′33″—88°58′24″E,42°45′32″—45°0′00″N),是连接中亚、新疆与中国其他省份的枢纽城市,承担着沟通新疆南北的重任,同时也是“天山北坡经济带”和“丝绸之路”经济带核心区域的中心[24],见图 1。乌鲁木齐市土地利用类型主要以草地和裸地为主,草地的面积占全市土地利用面积的 50%左右,裸地占 30%左右,近年来草地面积略有所下降,裸地面积呈增加趋势。能源消费结构虽基本形成了以石油、煤炭、天然气等多种能源全面开发的能源格局,但仍以常规一级能源为主。随着社会经济的快速发展和城镇化进程的不断推进,乌鲁木齐市能源消耗偏煤、碳汇用地缩减的现象较为突显,碳减排压力较大。近年来,由于城市化快速发展和各项生态补偿工作的开展,需要量化分析和评价其对城市生态系统碳氧平衡有何作用与效果,所以有必要构建乌鲁木齐市碳氧平衡模型并进一步展开分析。

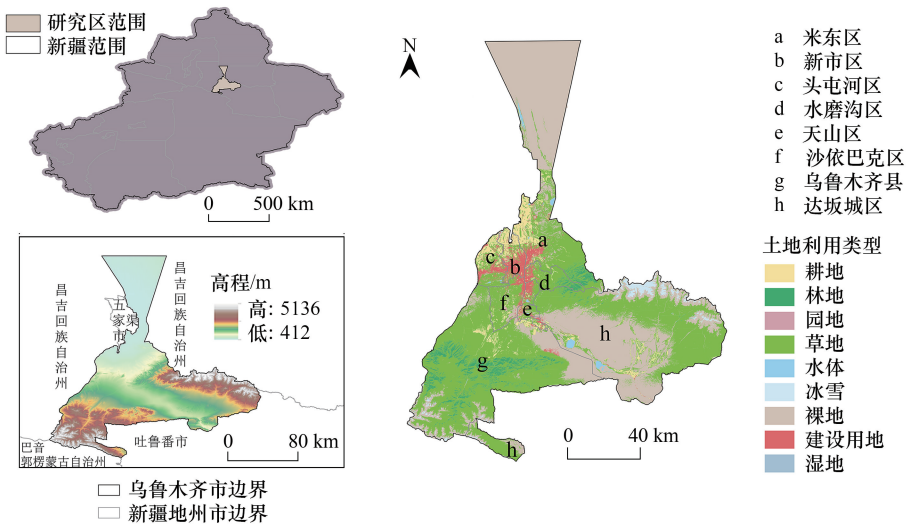


图 1　研究区示意图

Fig.1　Diagram of the study area

1.2　数据来源

本研究主要用到的数据包括土地利用数据,NPP 数据,年均降水量,年均气温,年末常住人口数,GDP,工业总产值,水泥生产量,各化石能源消费量,各交通运输方式的客货周转量,建成区面积,绿化覆盖面积以及各化石能源的相关参数。本文碳氧平衡模型中标准煤含碳/氢量,每人每天 CO_2排放量、O_2消耗量,生产每吨水泥 CO_2排放量参考学者使用较为广泛的参数值,增加本文与其他学者针对不同区域研究结果的可比性[25]。数据详情见表 1,化石能源的相关参数见表 2。

2　研究方法

2.1　研究思路

图 2 为本研究的流程图,主要包括以下几个部分:首先获取乌鲁木齐市土地利用数据和社会经济统计数据,选择排碳耗氧源和固碳释氧源,构建排碳耗氧和固碳释氧估算模型,分析近 20 年乌鲁木齐市排碳耗氧和固碳释氧的时间变化特征和来源结构。其次,构建归一化碳氧平衡指数,分析碳氧平衡状态。最后,选择可能

影响碳氧平衡的因素,使用偏最小二乘法,分析这些影响因素的重要性,最后提出碳氧平衡调控建议,为乌鲁木齐市实现双碳目标服务。

表 1 数据来源

Table 1 Data Source

数据类型 Data types	数据来源 Data source
土地利用数据(30m) Land use data	武汉大学遥感信息处理研究所[26] http://irsip.whu.edu.cn/resources/resources_en_v2.php
植被净初级生产力 Net primary productivity	地球资源数据云平台 www.gis5g.com
年均降水量 Average annual precipitation	国家地球系统科学数据中心 https://www.geodata.cn
年均气温 Average annual temperature	
年末常住人口数 Permanent population at the end of a year	《乌鲁木齐市统计年鉴》(2001—2019) 《新疆统计年鉴》(2001—2021)
工业总产值 Gross industrial output value	
水泥生产量 Volume of cement production	
化石能源消费量 Fossil energy consumption volume	
交通运输方式的客货周转量 Passenger and freight turnover of transportation mode	
作物产量 Crop yield	
化肥施用量 Fertilizer application rate	
作物草谷比 Crop grass-to-grain ratio	关于印发《生态产品总值核算规范(试行)》的通知发改基础[2022]481 号 https://zglsxy.lsu.edu.cn/2022/1021/c2743a321837/page.htm
建成区面积 Built-up area	《中国城市统计年鉴》
绿化覆盖面积 Green coverage area	
折标准煤系数 Standard coal coefficient	《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2020) https://std.samr.gov.cn/ 省级温室气体清单编制指南——发改办气候[2011]1041 号 https://www.gxdtrc.com/
二氧化碳排放系数 Coefficient of carbon dioxide emission	

表 2 各能源参考系数

Table 2 Energy reference coefficients

能源名称 Energy name	折标准煤系数 Standard coal coefficient	二氧化碳排放系数 Coefficient of carbon dioxide emission
原煤 Raw coal	0.7143kg 标准煤/kg	1.9003kgCO_2/kg
焦炭 Coke	0.9714kg 标准煤/kg	2.8604 kgCO_2/kg
原油 Crude oil	1.4286kg 标准煤/kg	3.0202 kgCO_2/kg
汽油 Gasoline	1.4714kg 标准煤/kg	2.9287 kgCO_2/kg
煤油 Kerosene	1.4714kg 标准煤/kg	3.0372 kgCO_2/kg
柴油 Diesel oil	1.4571kg 标准煤/kg	3.0998 kgCO_2/kg
电力 Electrical energy	0.1229kg 标准煤/(kw·h)	0.9770kgCO_2/(kw·h)
煤气 Coal gas	0.3570kg 标准煤/kg	2.6600 kgCO_2/kg
燃料油 Fuel oil	1.4286kg 标准煤/kg	3.1705 kgCO_2/kg
天然气 Natural gas	1.3300kg 标准煤/m^3	2.1649 kgCO_2/m^3
液化石油气 Liquefied petroleum gas	1.7140kg 标准煤/kg	3.1052 kgCO_2/kg

2.2 排碳量计算模型

在区域发展的过程中,排碳耗氧的主要来源是人类生产、生活活动。水泥工业是 CO_2 排放大户,是 2007 年《中国应对气候变化国家方案》明确指出的我国应对气候变化的重点领域[27]。因此,本文从人口呼吸、水

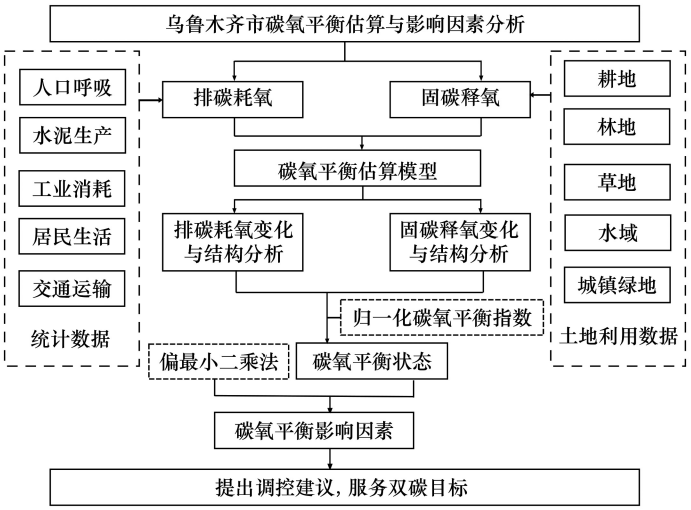


图 2　研究框架图

Fig.2　Research framework diagram

泥生产、工业消耗、居民生活和交通运输五方面入手,构建基于人类活动的排碳耗氧计算模型。

$$C_E = C_P + C_C + C_I + C_L + C_T \tag{1}$$

式中,C_E表示年 CO_2排放总量(t/a),C_P表示人口呼吸年 CO_2排放量(t/a),C_C表示水泥生产年 CO_2排放量(t/a),C_I表示工业消耗年 CO_2排放量(t/a),C_L表示居民生活年 CO_2排放量(t/a),C_T表示交通运输年 CO_2排放量(t/a)。5 种社会经济活动的排碳计算公式见表 3。

表 3　排碳量计算模型

Table 3　Carbon emission calculation model

测算项目 Measurement project	计算公式 Formula	指标解释 Interpretation of indicators
人口呼吸 Population respiration	$C_P = C_D \times P \times 365 \times 10^{-3}$	C_D表示每人每天 CO_2释放量(kg 人$^{-1}$ d^{-1}),P 表示城市年末总人口(人)
水泥生产 Cement production	$C_C = C \times C_t$	C 表示水泥年产量(t/a),C_t表示生产 1 吨水泥 CO_2排放量(t)
工业消耗 Industrial consumption	$C_I = \sum_{i=1}^{n} (U_i \times I_{CO_2})$	U_i表示某种能源的消费量(t/a),其中 i=1、2、3、4…n 表示工业消耗的原煤、焦炭、汽油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气、电等能源,I_{CO_2}表示某种能源的 CO_2排放系数
居民生活 Resident life	$C_L = \sum_{i=1}^{n} (U_i \times I_{CO_2})$	
交通运输 Transportation	$C_T = \sum_{i=1}^{n} (T_{1i} \times k + T_{2i}) \times I_{CO_2}$	T_{1i}表示某种交通方式的客运周转量(万人 km),T_{2i}表示某种交通方式的货运周转量(万 t km),i 表示公路、铁路、航空等交通方式。k 表示客货换算系数,I_{CO_2}表示 CO_2排放系数

2.3　耗氧量计算模型

由水泥生产的化学方程式可知,在水泥生产的过程中不耗氧[20]。所以耗氧量的计算考虑人口呼吸、工业消耗、居民生活和交通运输四个方面。

$$O_U = O_P + O_I + O_L + O_T \tag{2}$$

式中,O_U表示年 O_2消耗总量(t/a),O_P表示人口呼吸年 O_2消耗量(t/a),O_I表示工业消耗年 O_2消耗量(t/a),O_L表示居民生活年 O_2消耗量(t/a),O_T表示交通运输年 O_2消耗量(t/a)。各耗氧源计算公式见表 4。

表 4 耗碳量计算模型

Table 4 Carbon consumption calculation model

测算项目 Measurement project	计算公式 Formula	指标解释 Interpretation of indicators
人口呼吸 Population respiration	$O_P = O_D \times P \times 365 \times 10^{-3}$	O_D表示每人每天 O_2消耗量(kg 人$^{-1}$ d^{-1}),P 表示城市年末总人口(人)
工业消耗 Industrial consumption	$O_I = \sum_{i=1}^{n} U_i \times I_i \times (C_C \times R_{O_2/C} + C_H \times R_{O/H_2})$	U_i表示某种能源的消耗量(t/a),其中 i=1、2、3、4…n 表示工业消耗的原煤、焦炭、汽油、柴油、燃料油、天然气、液化石油气、电等能源。I_i表示某种能源折算标准煤系数,C_C表示标准煤含碳量,C_H表示标准煤含氢量,$R_{O_2/C}$表示氧元素与碳元素物质的量之比,R_{O/H_2}表示氧元素与氢元素物质的量之比
居民生活 Resident life	$O_L = \sum_{i=1}^{n} U_i \times I_i \times (C_C \times R_{O_2/C} + C_H \times R_{O/H_2})$	
交通运输 Transportation	$O_T = \sum_{i=1}^{n} U_i \times I_i \times (C_C \times R_{O_2/C} + C_H \times R_{O/H_2})$	

2.4 固碳释氧量估算模型

绿色植被是重要的“碳汇”和“氧源”[22]。因此,本文以区域内的耕地、林地、草地、水域和城镇绿地为主,构建基于土地覆被的固碳释氧量计算模型。不同类型生态系统固碳量的计算主要参考 2022 年国家发改委和统计局发布的《生态产品总值核算规范(试行)》文件中推荐的方法,耕地固碳使用固碳速率法,其他生态系统固碳使用净生态系统生产力法,释氧量依据植物光合作用每生产 1.00g 的干物质,能够固定 1.62g 的 CO_2和释放 1.20g 的 O_2的比例关系进行估算[28]。各生态系统固碳释氧量计算公式见表 5。

表 5 固碳释氧量估算模型

Table 5 Estimation model of carbon fixation and oxygen release

测算项目 Measurement project	计算公式 Formula	指标解释 Interpretation of indicators
固碳 Carbon fixation	$C_S = \sum_{i=1}^{5} C_{Si}$	C_S为生态系统年固碳量(t/a),C_{Si}表示某种生态系统的固碳量(t/a),其中 i=1、2、3、4、5 表示耕地、林地、草地、水域和城镇绿地。
释氧 Oxygen release	$O_E = \sum_{i=1}^{5} O_{Ei} = \sum_{i=1}^{5} \frac{1.2}{1.62} \times C_{Si}$	O_E表示生态系统年释氧量(t/a),O_{Ei}表示某种生态系统的释氧量(t/a)。
耕地固碳 Carbon fixation by cropland	$C_{S1} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} \times (BSS \times SC + SCSR_N \times SC_N + SCSR_S \times SC_S)$	C_{S1}表示耕地固碳量(t/a),$\frac{M_{CO_2}}{M_C}$为 C 转化为 CO_2的系数,取值为 44/12,BSS、$SCSR_N$、$SCSR_S$分别表示无固碳措施、施用化学氮肥和复合肥、秸秆全部还田的耕地土壤固碳速率(t C hm^{-2} a^{-1}),SC、SC_N、SC_S分别表示无固碳措施、施用化学氮肥和复合肥、秸秆全部还田的耕地面积(hm^2)。
林地、草地、水域和城镇绿地固碳 Carbon fixation in woodlands, grasslands, water bodies and urban green spaces	$C_{si} = \frac{M_{CO_2}}{M_C} \times NEP_i$	C_{Si}表示林地、草地、水域、城镇绿地的固碳量(t/a),NEP_i表示第 i 种生态系统的净生态系统生产力(t C/a),$NEP_i = NPP_i - RS$,NPP_i第 i 种生态系统的为净初级生产力(t C/a),RS 为土壤异养呼吸消耗碳量(t C/a),采用 Pei 等[29]建立的模型来估算,该模型已在我国西北干旱区不同类型生态系统得到应用和验证[30]。

2.5 碳氧平衡评价方法

在参考前人的碳氧平衡评价模型的基础上[21],本文构建归一化的碳平衡指数和氧平衡指数,放大排碳耗氧和固碳释氧间的差异,以便更好地反映和对比城市碳氧平衡状态。计算公式如下:

$$BC_C = \frac{C_S - C_E}{C_E + C_S} \tag{3}$$

$$BC_O = \frac{O_E - O_U}{O_U + O_E} \tag{4}$$

式中,BC_C和BC_O表示归一化碳平衡指数和归一化氧平衡指数,取值为[-1,1],当值为0,表明人类活动产生的CO_2和所需的O_2刚好可以被自然生态系统固定和获得,即区域碳氧状态刚好平衡。当值在[-1,0),表明排固碳释氧量小于碳量耗氧量,即人类生产生活的需求超出了自然生态系统的承受能力,碳氧平衡状态较差,越接近-1,碳氧平衡状态越差。当值在(0,1],表明固碳释氧量大于排碳耗氧量,即自然生态系统完全能够满足人类生产生活的需求,碳氧平衡状态较好,越接近1,碳氧平衡状态越好。

2.6　偏最小二乘法

偏最小二乘法是将多元线性回归、主成分分析以及典型相关分析结合起来的一种新型多元统计分析方法[31]。该方法既考虑自变量与因变量之间的线性关系,又考虑变量的解释能力,能够解决样本点少、变量存在多重共线性等问题[32]。偏最小二乘模型可以用变量投影重要性指标(Variable Important in Projection,VIP)来测度自变量在解释因变量时的重要性[33]。本文使用偏最小二乘法探究影响乌鲁木齐碳氧平衡的主要因素。

$$\mathrm{VIP}_j = \sqrt{\frac{p}{R_y(\mathrm{cum})}\sum_{h=1}^{m} R_{yh} W_{hj}^2} \tag{5}$$

式中,p是自变量个数,m是自变量主成分个数,$R_y(\mathrm{cum})$是各主成分对因变量Y的累积解释量,R_{yh}是主成分t_h对Y的解释量,W_{hj}是X_j与主成分t_h的相关系数。若VIP>1.0,表示自变量对因变量的影响极为重要;0.8<VIP<1.0表示自变量对因变量的影响重要;VIP<0.8表示自变量对因变量的影响不重要[34]。

碳氧平衡受到人口规模、能源结构、经济发展等多方面因素的影响[35]。本文将乌鲁木齐市碳平衡指数和氧平衡指数作为因变量,从人口规模、经济发展、能源结构、产业结构、城镇化程度和城市生态状况6个角度选取碳氧平衡的影响因素。影响因素的名称、含义、选取依据见表6。

表6　影响因素选取

Table 6　Selection of influencing factors

名称 Name	含义 Implication	选取依据 Selection basis
人口规模 Population size	人口密度/(人/km^2)	一方面,人口规模的增加直接或间接导致排碳耗氧量增加;另一方面,人口集聚效应,会在一定程度上的改善科技水平,从而降低排碳耗氧量[36]。
经济发展 Economic development	GDP/万元	经济发展的提升会改变生产和消费模式,进而改变排碳耗氧[37]。
能源结构 Energy structure	煤炭消费总量占化石能源消费总量比重/%	煤炭仍是新疆能源消费结构中的主导能源,能源结构低碳化是实现双碳目标的重要因素[38]。
产业结构 Industrial structure	工业产值占GDP的比重/%	工业占比较大,则会促进排碳耗氧量的增多,调整产业结构是实现碳减排的关键手段之一[39]。
城镇化规模 Urbanization scale	建成区土地面积/hm^2	城镇化规模既隐含着建设过程中对水泥等建材和煤炭等化石燃料的需求,同时也包含着影响居民生活范围和出行方式的含义,由此对排碳耗氧产生综合影响[40]。
城市生态状况 Urban ecological conditions	绿化覆盖面积/hm^2	城市中的绿化植物是城市固碳释氧的主体[41]。

3　结果与分析

3.1　乌鲁木齐市排碳耗氧变化

3.1.1　排碳耗氧量变化

2000—2020年,乌鲁木齐市排碳耗氧量总体呈增加趋势,排碳量增加幅度明显高于耗氧量(图3)。CO_2排放量和O_2消耗量分别增加7705.61×10^4t和3525.08×10^4t,年均增长率分别为6.49%和5.10%。乌鲁木齐市排碳耗氧变化以2014年为拐点,可以分为两个阶段:快速增长阶段(2000—2014年),缓慢增长阶段(2014—

2020 年),快速增长阶段 CO_2排放量和 O_2消耗量年均增长率分别为 8.54%和 7.00%,缓慢增长阶段 CO_2排放量和 O_2 消耗量年均增长率分别为 1.85%和 0.81%。2000—2014 年期间,排碳耗氧量不断增加可能与乌鲁木齐市经济的快速发展和城市化、工业化水平不断的提高有关[42]。自 2014 年乌鲁木齐市成为国家第三批低碳试点城市[43],随着该城市土地集约利用水平提高、产业结构优化、可再生能源的推广等,对城市排碳耗氧起到一定抑制作用。2017 年,乌鲁木齐市振兴工业经济,一定程度上使得排碳耗氧量有所回升,总体来看,2014 之后排碳耗氧增长速率趋于平缓。2020 年排碳耗氧量相较于 2019 年有所减少,CO_2排放量减少 114.09×10^4 t,O_2消耗量减少 58.03×10^4 t。2020 年由于新冠疫情防控实施交通管制,居民居家休息限制出行,中小型工业处于停工停产状态等原故对排碳耗氧量的减少具有积极贡献[44]。

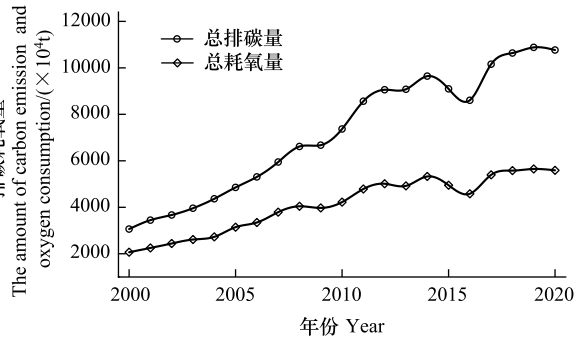


图 3 2000—2020 年乌鲁木齐市排碳耗氧量变化趋势

Fig.3 The variation trend of carbon emission and oxygen consumption in Urumqi from 2000 to 2020

3.1.2 排碳耗氧结构

在整个研究期间乌鲁木齐市排碳耗氧的主要来源是工业消耗和交通运输,工业对全市排碳耗氧起到决定性作用(图 4)。2000—2020 年各排碳耗氧来源对乌鲁木齐市总排碳量的平均贡献依次是:工业消耗(89.3%)>交通运输(5.8%)>居民生活(2.9%)>人口呼吸+水泥生产(2%);对总耗氧量的平均贡献依次是:工业消耗(92.5%)>交通运输(4.37%)>居民生活+人口呼吸(3.13%)。西部大开发以来,政府强有力的政策支持促进乌鲁木齐市工业快速发展。一直以来,乌鲁木齐工业以重工业为主,由此消耗大量化石能源导致城市排碳耗氧增加,因此,工业是乌鲁木齐降碳减排需要重点关注的对象。随着乌鲁木齐国际综合交通枢纽地位的凸显,逐步完善城市道路、公路、铁路、航空等组成的立体交通网络,使得城市交通快速发展的同时,其排放的 CO_2和消耗的 O_2一定程度上对城市环境造成了压力。

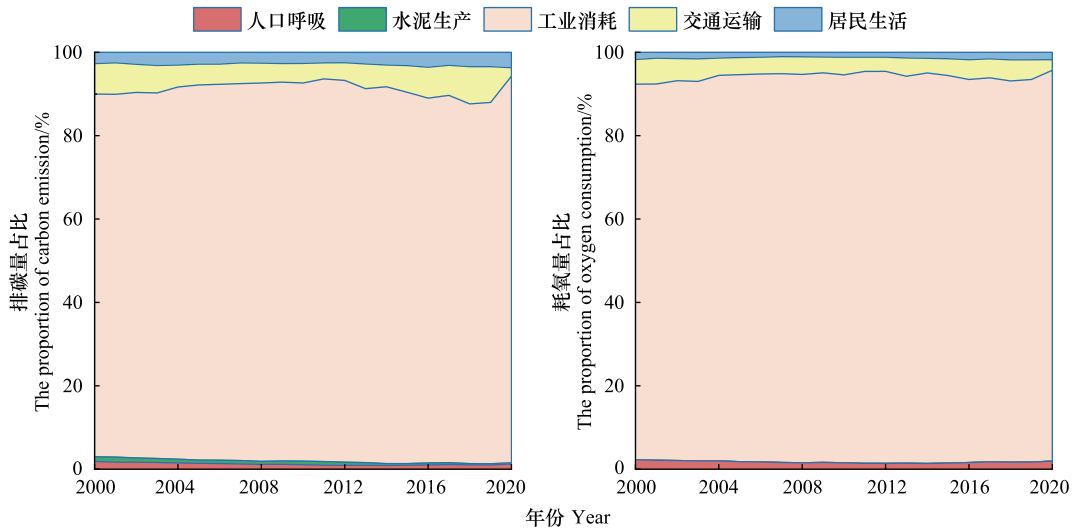


图 4 2000—2020 年排碳耗氧结构

Fig.4 Carbon emission and oxygen consumption structure from 2000 to 2020

从各排碳耗氧源来看,原煤和原油是工业排碳耗氧的主要来源、航空和公路对交通运输排碳耗氧的贡献

较大,居民生活排碳耗氧的主要来源是电力和煤气(图 5)。工业排碳的来源依次是原煤(42.77%)>原油(26.27%)>电力(19.74%)>焦炭(8.89%)>汽油+煤油+柴油+燃料油+天然气+液化石油气(2.39%);工业耗氧的来源依次是原煤(44.34%)>原油(33.66%)>焦炭(8.45%)>电力(7.05%)>燃料油(5.19%)>汽油+煤油+柴油+天然气+液化石油气(1.62%)。由此也反映了乌鲁木齐市自西部大开发以来,产业结构较为单一,主要为煤炭、石油、炼化、发电、电解铝等产业。交通运输排碳耗氧量所占比例依次是航空运输(49.52%)>公路运输(39.45%)>铁路运输(11.03%),乌鲁木齐作为我国东联西出国际大通道,面向国内国际的同时服务于疆内

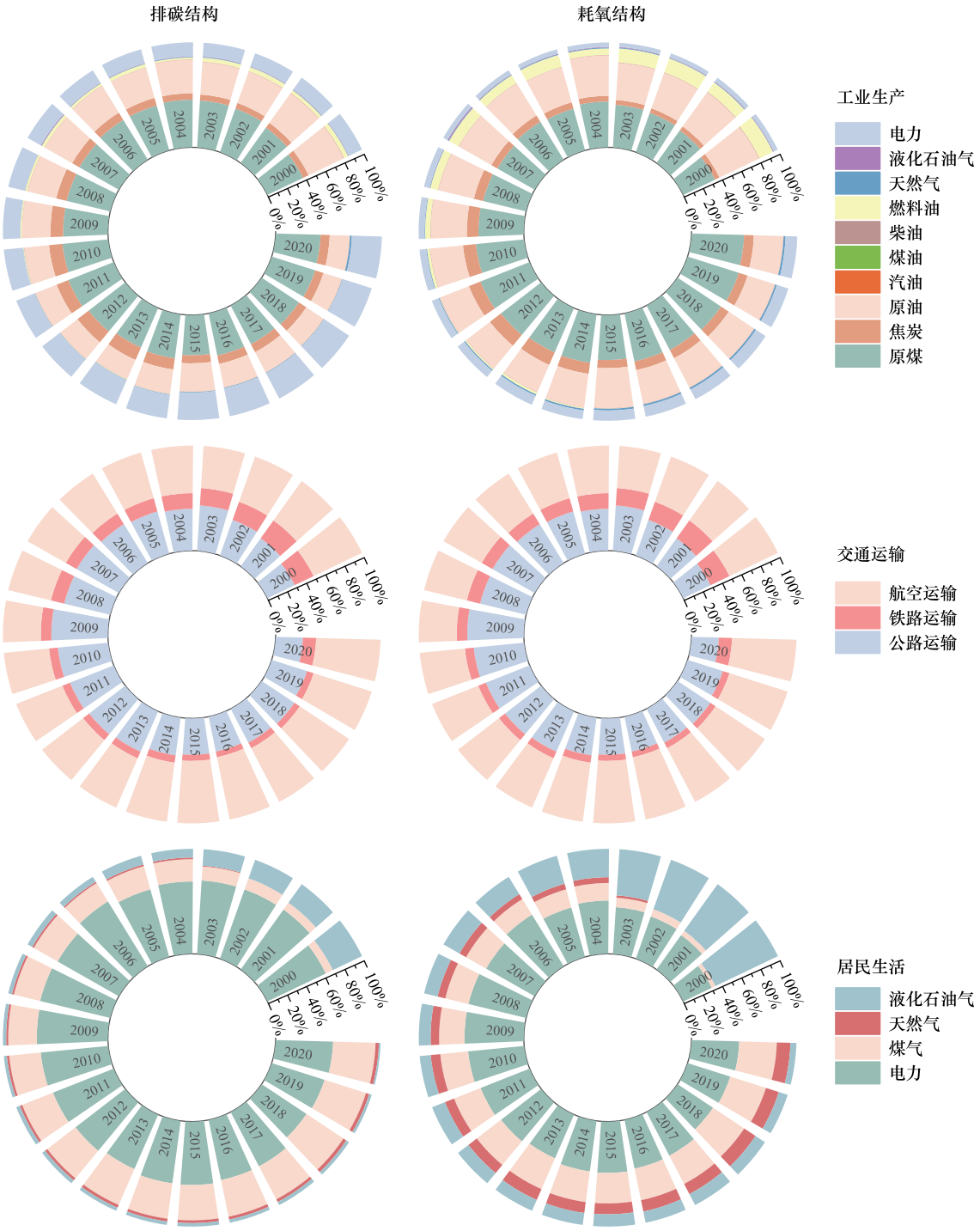


图 5　2000—2020 年排碳耗氧结构来源

Fig.5　Sources of carbon emission and oxygen consumption structure from 2000 to 2020

众多地州城市,故而航空运输对交通排碳耗氧的贡献较大。居民生活排放的 CO_2 量平均 63.03%来源于电力,其次是煤气(27.61%)、液化石油气(7.38%)、天然气(1.98%);居民生活消耗的 O_2 量平均 47.58%来源于电力,其次是煤气(23.24%)、液化石油气(21.41%)、天然气(7.76%)。由此可见,乌鲁木齐市居民生活主要对电力和煤炭的依存度较大,对天然气的利用还需进一步加强。

3.2 乌鲁木齐市固碳释氧变化

3.2.1 固碳释氧量变化

2000—2020 年,乌鲁木齐市固碳释氧量波动变化,整体呈略微下降的趋势(图 6)。CO_2 固定量和 O_2 释放量分别减少了 19.17×10^4 t 和 14.20×10^4 t,年均变化率均为-0.12%。2003 年达到固碳释氧的第一个波峰,这可能是由于乌鲁木齐市自 2001 年提出《乌鲁木齐市创建园林城市实施意见》以来,加大绿化建设的投入,提高了城市绿化覆盖率。2011 年出现第二个峰值,这可能是因为 2010 年是乌鲁木齐市创建自治区级园林城市的目标年份,经过近十年的投入,城市绿地获得可持续发展。2019 年为固碳释氧的第三个波峰,这可能是因为 2019 年受疫情管控,生态环境受到人为干扰的影响有限,生态状况较好。全市固碳释氧量增长缓慢的主要原因是:乌鲁木齐作为典型的温带半干旱绿洲城市,自身的生态用地有限,且由于水资源的限制,人工绿地建设受限[45]。植物的生物化学作用是固碳释氧的关键,提高绿化水平有利于促进固碳释氧能力的提升。2020 年乌鲁木齐绿地率为 37.4%,较 2000 年增长约 12%左右,加强生态绿地建设一定程度上抵消了人类活动对生态环境的负面影响。

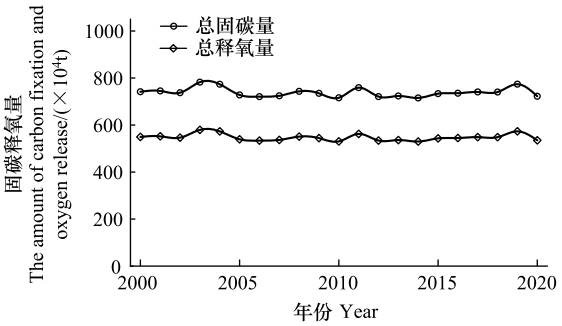


图 6 2000—2020 乌鲁木齐市固碳释氧量变化趋势

Fig.6 The variation trend of carbon fixation and oxygen release in Urumqi from 2000 to 2020

3.2.2 固碳释氧结构

草地对全市固碳释氧的贡献最大,其次是林地,城镇绿地的固碳释氧潜力较大(图 7)。研究期间,乌鲁木齐市各固碳释氧源对总固碳释氧量的平均贡献依次是草地(88.90%)>林地(9.00%)>城镇绿地(1.20%)>水域(0.54%)>耕地(0.35%)。草地对乌鲁木齐市固碳释氧的贡献较大,虽然城市快速发展,建设用地不断扩张使得草地面积有所缩减,但草地仍然是乌鲁木齐市最主要的土地利用类型。城镇绿地对乌鲁木齐市固碳释氧的贡献在逐年增大。乌鲁木齐在城镇化建设的进程中,注重生态环境建设,在创建生态园林城市的过程中使得城市绿化面积增加明显。林地的面积小于耕地,但林地的固碳释氧能力优于耕地,水域的面积和固碳释氧能力均保持相对稳定。

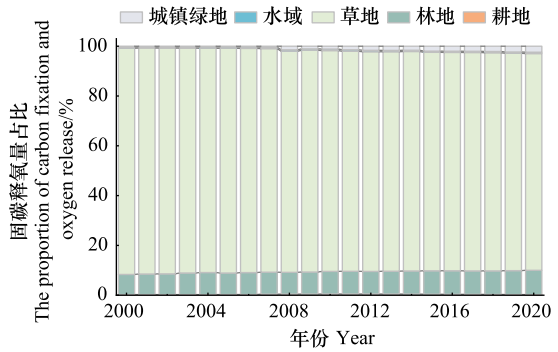


图 7 2000—2020 年固碳释氧结构

Fig.7 Carbon fixation and oxygen release structure from 2000 to 2020

研究期间固碳释氧源变化率呈波动变化(图 8)。耕地和草地固碳释氧量整体呈减少的趋势。耕地固碳释氧量先增后减,变化率波动较小,CO_2 固定量和 O_2 释放量分别减少 0.12×10^4 t 和 0.09×10^4 t,年均变化率为-0.32%。草地固碳释氧量逐年减少,变化率有所波动,CO_2 固定量和 O_2 释放量分别减少 44.77×10^4 t 和 33.17×10^4 t,年均变化率为-0.33%。林地、水域和城镇绿地固碳释氧量整体呈增加趋势。林地和水域固碳释氧量波动增加,变化率波动较大,林地 CO_2 固定量和 O_2 释放量分别增加 10.62×10^4 t 和 7.86×10^4 t,年均变化率为 0.78%,水域 CO_2 固定量和 O_2 释放量分别增加 0.49×10^4 t 和 0.36×10^4 t,年均变化率为 0.63%。城镇绿地固碳释

氧量波动增加,变化率较大,CO_2固定量和 O_2释放量分别增加 14.62×10^4t 和 10.83×10^4t,年均变化率为9.18%。总体来说,研究期间乌鲁木齐市耕地、草地的固碳释氧量均在减少,林地和水域呈现先增后减的波动趋势,城镇绿地的固碳释氧量持续增加。各生态系统固碳释氧量的变化与土地利用面积的变化密不可分,乌鲁木齐市各生态系统的固碳释氧量的变化趋势与土地利用变化基本吻合。

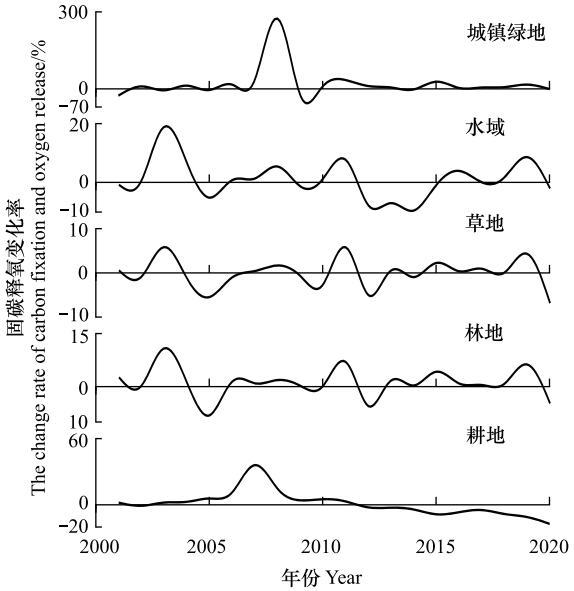


图 8　2000—2020 年乌鲁木齐市固碳释氧来源变化情况

Fig.8　Changes in sources of carbon fixation and oxygen release in Urumqi from 2000 to 2020

3.3　乌鲁木齐市碳氧平衡状态

乌鲁木齐市在整个研究期间都处于碳氧非平衡状态,而且这种不平衡的状态在逐年加剧,排碳与固碳之间的压力高于耗氧与释氧之间的压力。期间乌鲁木齐市碳平衡指数在[-0.61,-0.88],氧平衡指数在[-0.58,-0.83],碳氧平衡指数均有趋于-1 的趋势(图 9)。导致乌鲁木齐市社会经济系统和自然生态系统之间关系不平衡的原因主要来自两方面:第一,乌鲁木齐市社会经济系统的发展主要依靠化石能源燃烧。2020 年乌鲁木齐市消耗原煤 2251.97×10^4t,消耗原油 634.32×10^4t,这种以原煤消耗为主的能源结构注定会排放大量 CO_2和消耗大量 O_2,给自然生态系统固碳释氧造成较大的压力。第二,乌鲁木齐市自然生态系统本身的固碳释氧能力较弱。乌鲁木齐市草地面积占总用地面积的比重较大,但其 CO_2固定和 O_2释放能力较弱,而固碳释氧能力较强的林地只占用地面积总量的 5%左右。同时,由于研究区自身所处的地理位置,水资源缺乏,林草植被稀少等原因使得自然生态系统的状态难以满足社会经济发展的速度,社会经济和自然生态的双重作用造成乌鲁木齐市碳氧不平衡。

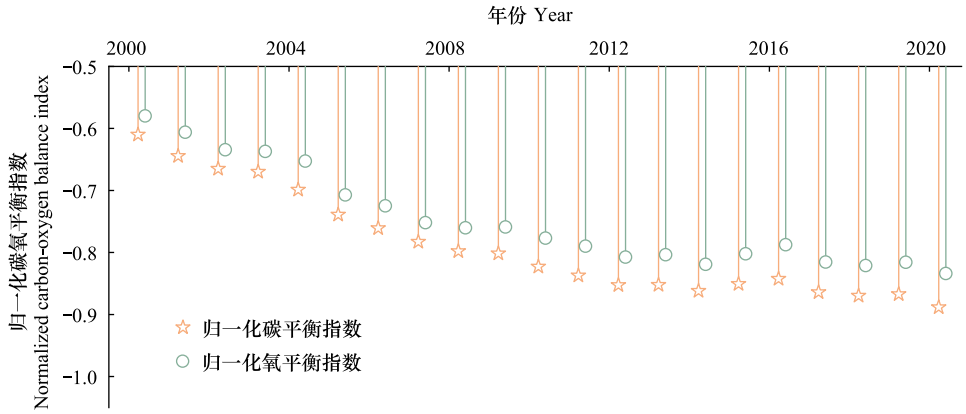


图 9　2000—2020 年乌鲁木齐市碳氧平衡指数变化情况

Fig.9　Changes in carbon and oxygen balance coefficients in Urumqi from 2000 to 2020

3.4　碳氧平衡影响因素分析

本文将影响碳氧平衡的 6 项指标作为自变量,将碳平衡指数和氧平衡指数作为因变量,利用 SIMCA-P 软件计算 VIP 值,探析各项因素对乌鲁木齐市碳氧平衡的影响程度。结果显示(图 10)城镇化规模(VIP = 1.2956)、城市生态状况(VIP = 1.2756)、能源结构(VIP = 1.0738)和经济发展(VIP = 1.0261)是驱动乌鲁木齐市碳氧平衡的极重要因素,人口规模(VIP = 0.5997)和产业结构(VIP = 0.3588)对乌鲁木齐市碳氧平衡的影响

不重要。城市扩张和城市绿化环境对乌鲁木齐市的碳氧平衡状态影响较大。近 10 年来,乌鲁木齐市进入高速发展阶段,经济快速增长,建成区面积不断增加,城市扩张速度加快[46],在建设过程中消耗大量的煤炭等化石燃料增加了城市碳氧平衡的压力。乌鲁木齐人口数量增长率大、人口密度小,因此对排碳耗氧的影响较小。产业结构对乌鲁木齐碳氧平衡影响不重要的原因在于乌鲁木齐产业一直以“三、二、一”的结构进行发展,拉动乌鲁木齐市经济增长的主要动力是第三产业,其次为第二产业[47]。在近 20 年的城市发展过程中,乌鲁木齐市第二产业所占比重由上升到下降演替。

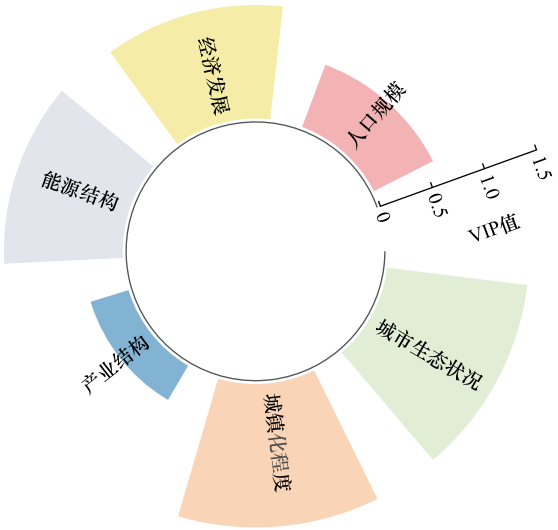


图 10 乌鲁木齐市影响碳氧平衡重要性指标

Fig.10 Importance index of carbon and oxygen balance in Urumqi

4 讨论

4.1 碳氧平衡研究

大多学者认为城市是碳排放的重要空间[48],其研究也更关注城市碳通量和碳平衡。然而,城市绿色空间能够通过植物光合作用固碳释氧[49],所以城市氧平衡也同样值得关注。城市复合系统可以被看作一个生命体,其组成部分是器官,城市的碳氧平衡则是“城市呼吸”产生的结果。长时间序列的碳氧平衡研究定量估算包括以能源消耗过程、居民生活和人口呼吸过程为核心的“城市呼吸”,能为建立和校准高分辨率排放清单、优化能源结构提供关键数据支撑,为实现“双碳”路径提供科学依据。郑颖采用 IPCC 法核算了我国部分典型城市化石能源消费产生的 CO_2 排放量,研究结果显示乌鲁木齐是高碳排放城市,工业 CO_2 排放占 90%以上[6],与本文的研究结果相似。刘晓岳关注化石燃料燃烧和人口呼吸的贡献,对我国西北地区兰州市的城市大气氧浓度进行研究[50]。使用面板数据估算碳氧平衡状态,相对于观测数据存在误差,但在观测数据不足的区域对于实现“双碳”目标提供数据支撑和验证观测数据方面具有一定意义。部分城市已将碳氧平衡方法引入到城市规划的实践。新疆碳排放核算的基础数据源缺乏,借助碳氧平衡模型,有助于理解城市碳氧平衡系统,为可持续城市规划提供数据基础。此外,在城市范围内,工业企业、城市居民是排碳耗氧的主要来源,也是低碳政策的执行者[51]。因此,可以考虑将碳氧平衡模型应用到企业与家庭层面的微观尺度进行研究。

4.2 碳氧平衡建议

实现碳达峰、碳中和是中国的远景目标,为区域的经济生态可持续发展提出了新的挑战和机遇。本研究依据碳氧平衡估算结果及影响因素分析,在实现“双碳”目标背景下,综合考虑排碳耗氧和固碳释氧,从能源产业、绿色低碳和系统碳汇等方面,提出乌鲁木齐市碳氧平衡发展建议,助力乌鲁木齐市早日实现“双碳”目标。

(1)抓住发展机遇,优化产业结构。乌鲁木齐市排碳耗氧的主要来源是工业生产所消耗的各种化石能源。实现“双碳”目标,我国非化石能源消费比重需在 2030 年达到 25%左右,2060 年达到 80%以上。在此发展目标下,“十四五”期间乌鲁木齐市提出产业结构和能源结构调整优化,控制煤炭消费,构建新型电力系统的发展目标[52]。在此发展目标下,引导企业转变用能方式,加快煤炭减量步伐,推动风能、太阳能的开发和高质量发展。同时,根据新疆维吾尔自治区工业和信息化厅等部门印发的《新疆维吾尔自治区重点领域企业节能降碳工作方案(2022—2025 年)》,乌鲁木齐市聚焦钢铁、水泥和能源等重点行业领域,建立重点领域绿色低碳标准体系、加强先进技术攻关应用,逐步推动重点领域节能降碳。大力发展数字经济、互联网经济、人工智能等低碳排、高效益的产业或是未来乌鲁木齐市高质量发展的产业方向。

(2)构建绿色交通,引导低碳出行。交通运输对乌鲁木齐市排碳耗氧的贡献也较大,实现“双碳”目标要确保交通领域碳排放增长保持在合理区间。因此,加快交通运输绿色低碳行动势在必行。城市公共交通是最节能、最低碳的机动化出行方式[53]。优先发展公共交通和轨道交通,是实现城市交通碳氧平衡的有效途径。在发展城市公共交通的基础上,积极扩大电力、氢能、天然气、先进生物液体燃料等新能源、清洁能源在交通运输领域的应用。另外,积极引导低碳出行,加强自行车专用道和行人步道等城市慢行系统建设,提升城市公共交通设施水平也很有必要。

(3)坚持系统观念,巩固碳汇能力。乌鲁木齐市固碳释氧的主要来源是草地、林地和城镇绿地,实现“双碳”目标,要注重林草碳汇开发。“双碳”目标提出到2030年全国森林覆盖率达到25%左右,2022年乌鲁木齐市森林覆盖率为15.75%,还需要在现存生态用地的基础上,坚持系统观念,推进山水林田湖草沙一体化保护和修复,严守生态保护红线,稳定现有森林、草原等生态系统的固碳作用。近十年来,乌鲁木齐市坚持做生态补偿和修复的“加法”,加大道路绿化、公共绿化和荒山绿化的力度,实施“见缝插绿”、区域绿化景观建设和生态绿化工程。这些措施在改善区域生态环境的同时也调节了城市碳氧平衡的状态。有效利用现有土地资源,见缝插针地布置口袋公园、屋顶花园、立体绿化等方式来增加城区绿量,注重绿地内的植物布置和多样性,以此来巩固城市系统的固碳释氧能力。

4.3　不足与展望

本研究结合区域现实状况,构建碳氧平衡模型估算2000—2020年间乌鲁木齐市排碳耗氧量和固碳释氧量,比较城市碳氧平衡状态。在分析影响碳氧平衡的主要因素的基础上,为乌鲁木齐市“双碳”规划提供一定的数据支撑的同时为早日实现“双碳”目标提出相关建议。但本文仍存在一些不足。首先是,在计算交通耗氧量时对交通运输方式进行趋同估算,未考虑其差异性,下一步还需要细化交通运输方面的耗氧情况。其次是,计算固碳释氧未考虑自然生态系统中规模较小的土地利用类型,对估算结果产生一定的影响,全面考虑排碳耗氧和固碳释氧的来源将对“双碳”规划更加具有指导意义。

5　结论

(1)2000—2020年,乌鲁木齐市排碳耗氧量逐年增加,排碳量和耗氧量的年均增长率分别为6.49%和5.10%,2000—2014年比2014—2020年排碳耗氧量上升趋势更快,各种排碳耗氧行为对总排碳耗氧量的贡献依次为:工业消耗>交通运输>居民生活>人口呼吸>水泥生产。

(2)2000—2020年,乌鲁木齐市固碳释氧量波动减少,固碳量和释氧量的年均变化率为-0.12%,各固碳释氧来源对固碳释氧的贡献依次为:草地>林地>城镇绿地>水域>耕地,其中,耕地和草地的固碳释氧能力在减弱,林地和水域呈现先增后减的波动趋势,城镇绿地的固碳释氧能力有所加强。

(3)2000—2020年,乌鲁木齐市处于碳氧非平衡状态,而且这种不平衡的状态在逐年加剧,排碳与固碳之间的压力高于耗氧与释氧之间的压力,自然生态系统的固碳释氧难以满足社会经济系统的排碳耗氧。

(4)城镇化规模(VIP=1.2956)、城市生态状况(VIP=1.2756)、能源结构(VIP=1.0738)和经济发展(VIP=1.0261)是驱动乌鲁木齐市碳氧平衡的极重要因素,人口规模(VIP=0.5997)和产业结构(VIP=0.3588)对乌鲁木齐市碳氧平衡的影响不重要。城市扩张和城市绿化环境对乌鲁木齐市的碳氧平衡状态影响较大。

参考文献(References):

[1] 杨璐,章锦河,王群,张宏磊,陈静,周晶.南京市生态经济系统碳氧平衡分析.资源科学,2014,36(10):2223-2230.

[2] Li D H,Mu H G,Gao Y L,Lu M,Liu C L.A GIS-Based Analysis of the Carbon-Oxygen Balance of Urban Forests in the Southern Mountainous Area of Jinan,China.Sustainability,2022,14(23):16135.

[3] 冉语卿,张驰宇,陈岚.基于碳氧平衡模型的城市公园生态效应评价研究.生态经济,2021,37(1):90-95.

[4] 彭建,汪安,刘焱序,马晶,吴健生.城市生态用地需求测算研究进展与展望.地理学报,2015,70(2):333-346.

[5] 潘学平,陈艳梅,栗亚宁.基于NPP模型的北京市分区碳氧平衡分析.生态经济,2016,32(2):160-164.

[6] 郑颖,逯非,刘晶茹,王效科.我国典型城市化石能源消费CO_2排放及其影响因素比较研究.生态学报,2020,40(10):3315-3327.

[7] 杨元合,石岳,孙文娟,常锦峰,朱剑霄,陈蕾伊,王欣,郭焱培,张宏图,于凌飞,赵淑清,徐亢,朱江玲,沈海花,王媛媛,彭云峰,赵霞,王襄

平,胡会峰,陈世苹,黄玫,温学发,王少鹏,朱彪,牛书丽,唐志尧,刘玲莉,方精云.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献.中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.
[8] Daesslé L W,Orozco A,Struck U,Camacho-Ibar V F,van Geldern R,Santamaría-del-Angel E,Barth J A.Sources and sinks of nutrients and organic carbon during the 2014 pulse flow of the Colorado River into Mexico.Ecological Engineering,2016,106:799-808.
[9] Yang X J,Ricciuto D M,Thornton P E,Shi X Y,Xu M,Hoffman F,Norby R J.The effects of phosphorus cycle dynamics on carbon sources and sinks in the Amazon Region: a modeling study using ELM v1.Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2019,124(12):3686-3698.
[10] 义白璐,韩骥,周翔,杨芳,孟醒,曹武星,黄鲁霞,象伟宁.区域碳源碳汇的时空格局——以长三角地区为例.应用生态学报,2015,26(4):973-98.
[11] 王喜,鲁丰先,秦耀辰,孙艳芳.河南省碳源碳汇的时空变化研究.地理科学进展,2016,35(8):941-951.
[12] 胡欢,章锦河,熊杰,周珺,孙晋坤.河北省碳源碳汇测算及碳减排压力分析.地理与地理信息科学,2016,32(3):61-67.
[13] 夏四友,杨宇.基于主体功能区的京津冀城市群碳收支时空分异与碳补偿分区.地理学报,2022,77(3):679-696
[14] 赵荣钦,黄贤金,彭补拙.南京城市系统碳循环与碳平衡分析.地理学报,2012,67(6):758-770.
[15] 戴尔阜,黄宇,吴卓,赵东升.内蒙古草地生态系统碳源/汇时空格局及其与气候因子的关系.地理学报,2016,71(1):21-34.
[16] Yin K,Zhao Q J,Li X Q,Cui S H,Hua L Z,Lin T.A new carbon and oxygen balance model based on ecological service of urban vegetation.Chinese Geographical Science,2010,20(2):144-151.
[17] Yin K,Lu D S,Tian Y C,Zhao Q J,Yuan C.Evaluation of carbon and oxygen balances in urban ecosystems using land use/land cover and statistical data.Sustainability,2014,7(1):195-221.
[18] 杨帆,刘海龙,尹芳,陶蕴哲.基于城市碳氧均衡的绿地生态效应评估机制研究——以株洲市为例.生态经济,2016,32(10):145-150.
[19] 曲艺,舒帮荣,欧名豪,王万茂.基于生态用地约束的土地利用数量结构优化.中国人口·资源与环境,2013,23(1):155-161.
[20] 马巾英,尹锴,吝涛.城市复合生态系统碳氧平衡分析——以沿海城市厦门为例.环境科学学报,2011,31(8):1808-1816.
[21] 陈宇,单玉红,陈银蓉.碳氧平衡约束下武汉市土地利用结构优化情景模型研究.长江流域资源与环境,2015,24(12):2030-2037.
[22] 姬盼盼,高敏华.基于 LUCC1999—2014 年新疆碳氧平衡估算.干旱区地理,2018,41(3):608-615.
[23] 刘珊珊,吴文婕,王志强.基于 DPSIR-TOPSIS 模型的乌鲁木齐市绿色发展水平测度及其影响因素.地球科学与环境学报,2023,45(4):857-868.
[24] 人民政协网.新疆政协委员建议:将乌鲁木齐升格为副省级城市.(2016-01-15)[2022-05-17].http://www.rmzxb.com.cn/c/2016-01-15/672854.shtml.
[25] 王永安,恭映璧.计算城市绿化面积的碳氧平衡法.生态经济,2002(3):62-63.
[26] Yang J,Huang X.The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019.Earth System Science Data,2021,13(8):3907-3925.
[27] 汪澜.水泥生产企业 CO_2 排放量的计算.中国水泥,2009(11):21-22.
[28] 欧阳志云,朱春全,杨广斌,徐卫华,郑华,张琰,肖燚.生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究.生态学报,2013,33(21):6747-6761.
[29] Pei Z Y,Ouyang H,Zhou C P,Xu X L.Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau.Journal of Integrative Plant Biology,2009,51(5):521-526.
[30] 潘竟虎,文岩.中国西北干旱区植被碳汇估算及其时空格局.生态学报,2015,35(23):7718-7728.
[31] 马明德,马学娟,谢应忠,马甜.宁夏生态足迹影响因子的偏最小二乘回归分析.生态学报,2014,34(3):682-689.
[32] 董建红,张志斌,张怀林,高发文,张文斌,公维民.生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制——以宁夏为例.中国人口·资源与环境,2021,31(2):162-173.
[33] 张茹倩,李鹏辉,徐丽萍.城镇化对新疆土地利用碳排放的影响及其耦合关系.生态学报,2022,42(13):5226-5242.
[34] Li P H,Zhang R Q,Xu L P.Three-dimensional ecological footprint based on ecosystem service value and their drivers:a case study of Urumqi.Ecological Indicators,2021,131:108117.
[35] 杨璐.基于碳氧平衡的南京市生态用地需求测度研究[D].南京:南京大学,2015.
[36] 王少剑,苏泳娴,赵亚博.中国城市能源消费碳排放的区域差异、空间溢出效应及影响因素.地理学报,2018,73(3):414-428.
[37] 刘佳骏,史丹,汪川.中国碳排放空间相关与空间溢出效应研究.自然资源学报,2015,30(8):1289-1303.
[38] 邓铭江,明波,李研,黄强,李鹏,吴萌."双碳"目标下新疆能源系统绿色转型路径.自然资源学报,2022,37(5):1107-1122.
[39] 王少剑,谢紫寒,王泽宏.中国县域碳排放的时空演变及影响因素.地理学报,2021,76(12):3103-3118.
[40] 宋苑震,曾坚,王森,梁晨.中国县域碳排放时空演变与异质性.环境科学,2023,44(1):549-559.
[41] 王敏,石乔莎.城市绿色碳汇效能影响因素及优化研究.中国城市林业,2015,13(4):1-5.
[42] 凯吾沙·塔依尔,黎华,古丽米热·艾尔肯,尹章才,吴浩.FLUS 与灰色预测模型支持下的乌鲁木齐地区碳排放时空演变与预测.水土保持学报,2023,37(4):214-226.
[43] 刘金芝,付万年,王志强.乌鲁木齐市土地低碳高效利用耦合协调分析.新疆职业大学学报,2022,30(3):67-73.
[44] 居鲁都孜·沙山,咎梅.新冠肺炎疫情管控期间乌鲁木齐市空气质量变化及原因分析.大气与环境光学学报,2023,18(5):479-493.
[45] 陈亚宁,王怀军,王志成,张辉.西北干旱区极端气候水文事件特征分析.干旱区地理,2017,40(1):1-9.
[46] 石天戈,时卉.基于地理探测器的乌鲁木齐城市扩张特征与时空驱动因素分析.干旱区地理,2021,44(3):867-876.
[47] 温清.乌鲁木齐市产业结构与就业结构协调性研究.合作经济与科技,2021(14):7-10.
[48] 孙兴,刘熙.中国城市碳排放效率的时空演变及影响因素——基于异质性空间随机前沿模型.地理研究,2023,42(12):3182-3201.
[49] 王晶懋,高洁,孙婷,韩都,王一凡.双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计.中国城市林业,2023,21(4):33-42.
[50] Liu X Y,Huang J P,Wang L,Lian X B,Li C Y,Ding L,Wei Y,Chen S Y,Wang Y Q,Li S X,Shi J S."Urban respiration" revealed by atmospheric O_2 measurements in an industrial metropolis. Environmental Science & Technology,2023,57(6):2286-2296.
[51] 马晨,陈前利,胡方芳,李松,丛建辉.新疆碳排放核算研究特征.资源开发与市场,2020,36(3):233-240+267.
[52] 新疆维吾尔自治区发展和改革委员会.乌鲁木齐市国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要.(2021-12-08)[2022-05-17].https://xjdrc.xinjiang.gov.cn/xjfgw/c108377/202112/bc183f6a984d4c10b0c69b01eb81f718.shtml.
[53] 赵光辉.我国交通运输碳达峰碳中和规制及政策研究.改革与战略,2022,38(4):14-30.