

阿拉尔市中心城区城市绿地碳氧平衡分析及优化策略

Analysis and Optimization Strategies of Carbon and Oxygen Balance in Urban Green Spaces within the Central Urban Area of Alar City

邵琦¹ 陈树新² 景昱茜¹ 刘旭^{1*}
SHAO Qi¹ CHEN Shuxin² JING Yuxi¹ LIU Xu^{1*}

(1.塔里木大学园艺与林学院,阿拉尔843300;2.中国林业科学研究院资源信息研究所,北京100091)
(1. College of Horticulture and Forestry, Tarim University, Alar, Xinjiang, China, 843300; 2. Institute of Resources Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing, China, 100091)

文章编号: 1000-0283(2026)03-0105-08

DOI: 10.12193/j.laing.20250428001

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2025-04-28

修回日期: 2025-07-03

摘要

城市作为人口集聚、产业发展的重要区域,是碳排放的主要来源。为探寻如何通过城市绿地空间促进城市低碳循环发展,以新疆维吾尔自治区阿拉尔市中心城区为研究对象,利用分层抽样法对阿拉尔市中心城区不同类型绿地系统进行抽样调查,再利用生物量法以及物料法,分别计算城市绿地空间的固碳释氧量以及中心城区的年度释碳耗氧量,通过对比计算结果得出城市绿地空间的碳氧收支情况。结果显示,阿拉尔市中心城区城市绿地总固碳释氧量为9.66万t,城市年碳排放量为149.2万t,年耗氧量为184.3万t,进而得出阿拉尔市中心城区碳缺口比为93.52%,氧缺口比为94.75%,其中阿拉尔市公园绿地和区域绿地固碳能力最强,工业生产和交通运输的释碳耗氧量占比最大。根据生物量异速生长方程对样地植物的计算结果,得出影响城市绿地固碳释氧量的主要因素为植物种类、植物搭配层次及绿地覆盖率。在此数据基础上,结合干旱型城市绿地的特性、城市不同区域碳排放量和碳汇量的多少,利用三源绿地理论,将阿拉尔市中心城区划分为碳源绿地、氧源绿地及近源绿地三部分,再根据分区绿地的布局形式、面积大小、植物层次等,有针对性地提出优化策略,为提升阿拉尔市绿地碳汇能力及优化绿地空间格局提供理论依据,也为其他干旱型城市绿地减排增汇提供参考。

关键词

城市绿地碳汇;碳氧平衡;植物碳汇;绿地空间格局优化;三源绿地

Abstract

This study takes the central urban area of Alar City, Xinjiang Uygur Autonomous Region, as the research object. Stratified sampling was used to conduct a survey of different types of green space systems in the central urban area of Alar City. Subsequently, the biomass and material methods are used to calculate carbon sequestration and oxygen release for the urban green space, and annual carbon release and oxygen consumption for the central urban area, respectively. The carbon and oxygen balances of urban green spaces are obtained by comparing and calculating results. The results show that the total carbon sequestration and oxygen release of urban green spaces in the central urban area of Alar City are 96 600 tons; the city's annual carbon emissions are 1.492 million tons; and the city's annual oxygen consumption is 1.843 million tons. Thus, the carbon gap ratio for the central urban area of Alar City is 93.52%, and the oxygen gap ratio is 94.75%. Among them, the park green spaces and regional green spaces in Alar City have the strongest carbon sequestration capacity. Carbon release and oxygen consumption from industrial production and transportation account for the largest share. Based on calculations of the biomass heterologous growth equation for plants in the sample plot, it is concluded that the main factors affecting carbon sequestration and oxygen release in urban green spaces are plant species, plant combinations, and green space coverage rate. Based on this data, combined with the characteristics of arid urban green spaces, the amount of carbon emissions and carbon sinks in different areas of the city, and using the theory of three-source green spaces, the central urban area of Alar is divided into three parts: carbon source green spaces, oxygen source green spaces, and near-source green spaces. Based on the layout, area size, and plant layers of the zonal green spaces, targeted optimization strategies are proposed. It not only provides a theoretical basis for enhancing the carbon sink capacity of green spaces in Alar City and optimizing their spatial patterns, but also offers a reference for reducing emissions and increasing carbon sinks in green spaces of other drought-prone cities.

Keywords

urban green space carbon sink; carbon-oxygen balance; plant carbon sink; optimization of green space spatial pattern; three-source green space

邵琦

1994年生/男/黑龙江牡丹江人/在读硕士研究生/研究方向为园林设计与城市绿地碳中和

陈树新

1997年生/男/黑龙江牡丹江人/在读博士研究生/研究方向为林业遥感

刘旭

1983年生/女/吉林长春人/硕士/副教授/研究方向为园林设计与城乡绿地碳中和

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 576745872@qq.com

城市是人口与经济活动高度集中的核心地带，也因此成为温室气体排放的重要来源。作为城市生态系统的关键组成部分，城市绿地在调节碳氧循环、提升环境质量等方面具有不可替代的生态功能^[1]。

然而，由于不同城市在城市绿地数量、植被覆盖度、物种结构、物种多样性等方面具有明显的异质性特征，且在气候条件、产业布局、人口密度等诸多方面存在明显差异，因此城市绿地在碳氧平衡调节中的作用及其效果就表现出明显的不同。对中国而言，巨大的地理空间分异使得不同类型城市在调节碳氧平衡上具有不同的特征。在中国西北部，由于大多为干旱型城市，因此在极端的气候条件影响下碳氧失衡一直是制约其社会发展以及改善人居环境的主要因素，并且直接影响着当地的人口健康。同时这也给城市绿地在减排增汇功能的实现方面带来了更多的难度和挑战。

近年来，对城市绿地碳氧平衡效应及其空间优化配置的研究不断深入，国内主要包括城市不同层面上的生态空间、城区绿地系统和绿地斑块之间的相互作用，以及如何最大化城市绿地的碳汇能力和碳汇效应的具体方法^[2]、植物种类的选择和配置对整个群落的碳吸收效率的作用^[3]；也有越来越多的研究从景观生态学和城市规划学交叉融合的视角探讨增强城市绿地系统碳汇能力的相关途径和方法^[4]。在国际上，已经发展出更为成熟的绿地碳汇评价框架和方法，代表性的如美国环境保护局使用的城市森林评估工具(i-Tree)，能够系统地搜集、量测都市中的树木资讯，并结合天气、污染物、土地使用等资料，计算评估都市绿化的整体价值；Nowak等^[5]通过生物量模型和异速生长方程可以估算单棵树木的碳储量和年固碳量，继而得出

城市森林的碳储量和年封存量；Vaccari等^[6]使用涡度协方差法测量二氧化碳通量，对佛罗伦萨城市绿地的碳排放进行了分析；Strohbach等^[7]则使用温室气体清单法和异速生长方程等方法量化了德国莱比锡城带状绿地50年的碳足迹。另外，越来越多的研究通过开发模型和遥感技术来估算城市绿地的碳汇能力。这些研究为城市碳汇计量以及减排增汇提供了有效的方法。

然而，由于城市类型多种多样，因此在减排增汇方面需要采取不同的措施和路径。尤其对于干旱型城市，探讨如何通过减排增汇改善城市生态环境质量、提升人居环境具有更为积极的意义。为了探究干旱型城市绿地如何有效提升固碳增汇，本研究选择新疆维吾尔自治区阿拉尔市中心城区作为研究的案例地，分析其城市绿地碳氧平衡缺口以及影响因素，并在此基础上提出针对性的空间优化策略，以期为阿拉尔市减碳增汇提供理论依据，同时也能为其他绿地覆盖度低、碳氧失衡的干旱型城市实现减排增汇、建设健康的绿色人居环境提供参考。

1 研究区概况及样地选取

1.1 研究区域概况

阿拉尔市位于新疆阿克苏地区，北倚天山南麓，南临塔克拉玛干沙漠北部边缘，属于典型的暖温带极端大陆性干旱气候，其气候条件严酷，夏季极端高温可达35℃，冬季极端低温可降至-28℃；年降水量少，仅40.1~82.5 mm，冬季降雪尤其稀少。由于强烈的蒸发作用，年均蒸发量高达1 876.6~2 558.9 mm。

阿拉尔市城区地势呈现西北高、东南低的平缓倾斜趋势，地表以沙壤土为主，土壤盐碱化严重。城市内常见乔木有胡杨(*Populus euphratica*)、灰杨(*Populus pruinosa*)、垂柳(*Salix*

babylonica)、银杏(*Ginkgo biloba*)等。

1.2 样地选取

根据《城市绿地分类标准(GB/T51346-2019)》^[8]，中国城市园林绿地系统分为以下5大类别：公园绿地(G1)、防护绿地(G2)、广场绿地(G3)、附属绿地(XG)和区域绿地(EG)。在样地选取过程中，重点考虑碳排放热点区域。

根据实际调查，本研究在阿拉尔市中心城区范围内共选取不同类型城市绿地样地106处(图1)，总面积66 250 m²。所有选定样地均按25 m×25 m规格设置标准样方(对于非正方形的样地，则选取相同面积的范围作为样方)，对其内部的植物胸径、株高、冠幅、植物层次进行调查。其中乔木胸径值取树干距地面以上相当于一般成年人胸高部位的直径^[9]；植物冠幅分别测量东西方向以及南北方向^[10]。

在计算中心城区总固碳释氧量的过程中，除了要计算不同绿地类型样地面积和单位生物量，还要通过遥感图像结合ENVI 5.6软件来获得中心城区不同类型绿地的总面积数据^[11-12]。绿地分类结果见图2和表1。

2 城市绿地固碳释氧量分析

绿色植物通过光合作用吸收大气CO₂并释放O₂，其强弱主要取决于植被生长状况、群落结构配置以及光温湿等环境因子的综合影响^[13-14]。当前国内外学术界普遍采用的城市绿地碳汇计量方法主要包括：生物量扩展因子法、生物量异速生长方程法、生长生物量模型法、遥感估算法、样地清查法、微气象学法等^[15]，不同的核算方法对应不同的研究范围。

本研究以生物量法作为城市绿地碳汇评估的核心方法。生物量法主要包含生物量扩

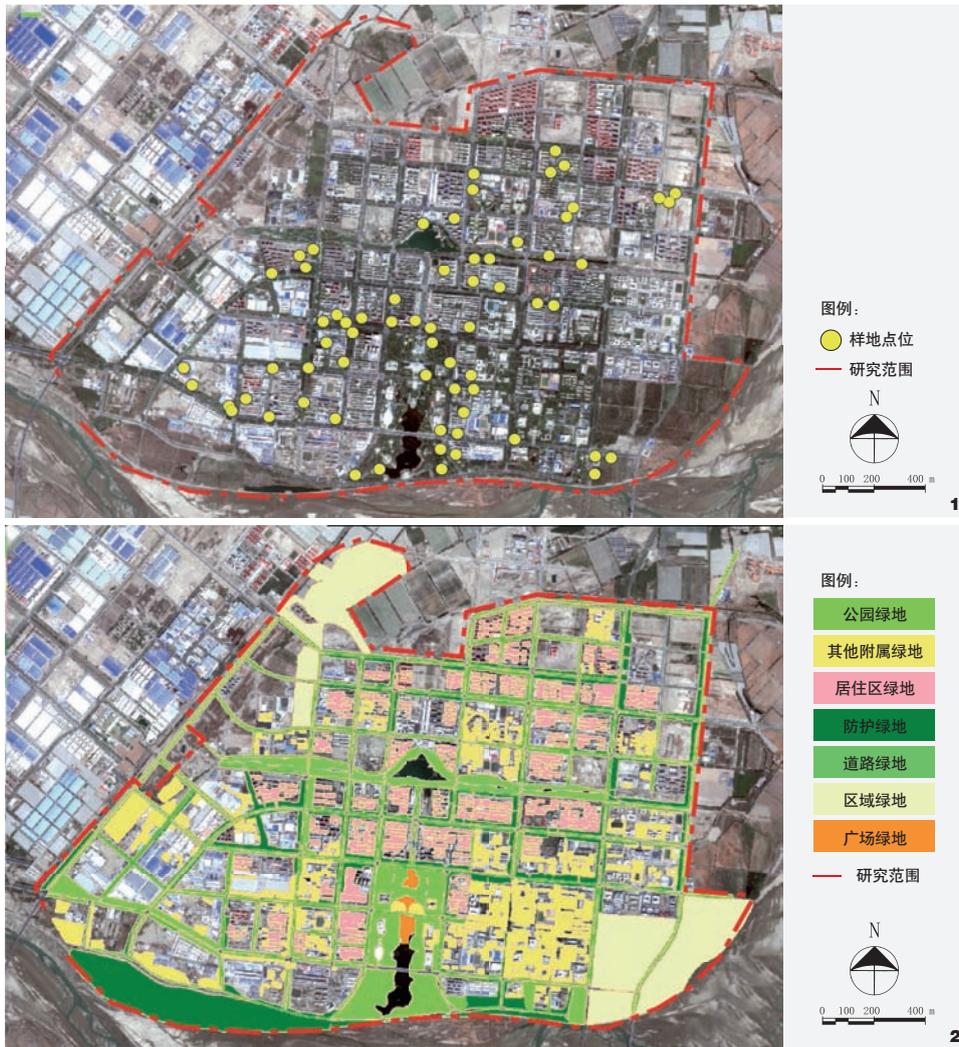


图1 阿拉尔市中心城区样地点位图
Fig. 1 Location map of sample locations in the central urban area of Alar

图2 阿拉尔市中心城区不同类型绿地分类图
Fig. 2 Classification map of different types of green spaces in the central urban area of Alar

表1 阿拉尔市中心城区不同类型绿地面积
Tab. 1 The area of different types of green spaces in the central urban area of Alar

名称 Designation	绿化覆盖面积 /hm ² Green coverage area	绿地面积 /hm ² Green land area
主城区公园绿地	227.11	261.63
主城区防护绿地	203.24	237.18
主城区广场绿地	2.12	6.29
附属绿地		
主城区道路绿地	138.73	110.99
主城区居住区绿地	110.80	113.82
其他附属绿地	418.33	331.74
区域绿地	210.54	223.24
合计	1 310.87	1 284.89

展因子法、生长生物量模型法以及生物量异速生长方程法。考虑到城市绿地系统通常不涉及木材采伐利用,在精度要求相对宽松的研究场景中,采用生物量扩展因子法具有较好的适用性^[16];生长生物量模型法利用生长生物量模型,模拟出各树种各年龄的单株材积和生物量,以国家森林资源清查面积和蓄积的数据为基础,计算各树种、各龄组单位面积蓄积量,但是依赖资源调查数据,结果误差可能较大;采用生物量异速生长方程法测算样地植物的固碳释氧功能,该方法基于生物量异速生长模型,通过测定优势树种的胸径和树高等生长参数来估算林木碳储量^[17]。相较于其他方法,该方法具有较高的计算精度,适用于本研究的定量分析需求。

2.1 样地生物量计算

基于阿拉尔市中心城区样地调查数据,将实测的植物形态参数(株高、胸径、冠幅)代入植被生物量异速生长方程中(表2),计算得到各样地的植物生物量(表3)。然后在此基础上,结合植物含碳率和释氧系数等参数,进一步估算研究区样地的碳储量^[18]。

计算结果显示,阿拉尔市中心城区公园绿地生物量最高,为274 358.8004 kg;其次为居住区绿地和公共管理用地附属绿地,分别为161 931.2255 kg和161 250.4747 kg;较低的为广场绿地和防护绿地,分别为14 368.76026 kg和28 994.733 kg。可见,不同类型城市绿地的植物生物量存在明显差别。导致这些结果的主要原因可能是不同绿地的树种多样性存在较大差异,在样地面积相同的情况下,植物多样性较高的区域生物量相对较高,反之较低。而个别虽然多样性较高但生物量较低的地区,如广场用地,可能是因为该类型绿地树种受到土壤养分、种类构成、人类活动、

表2 生物量异速生长方程^[15]
Tab. 2 Biomass hetero-rate growth equation

编号 Serial number	绿化树种 Tree species	计算公式 Computational formula
1	油松	$B = 0.8446 + 0.6640 \ln(d^2h)$
3	圆柏	$B = 131.87(d^2h)^{0.5969}$
4	刺槐	$B = 0.312 + 0.016d^2h$
7	银杏	$B = 0.044 + 0.042d^2h$
9	泡桐	$LgB = 0.9689 \lg d^2h - 1.6329$
5	女贞	$B = 0.907 + 0.01d^2h$
6	栾树	$B = 0.915 + 0.1d^2h$
10	香樟	$B = 0.937 + 0.037d^2h$
11	水杉	$B = \text{Exp}(-0.8168 + 2.1549 \lg d)$
12	马尾松	$B = 0.1309d^{2.4367}$
13	柳树	$B = 0.178d^{2.581}$
14	雪松	$B = 1.26(0.3721d^{1.2928} + 0.2805d^{1.3313})$
15	构树	$B = 1.7519(d^2h)^{1.5784}$
16	紫薇	$B = 0.895 + 0.035d^2h$
17	梧桐	$B = 0.069(d^2h)^{0.9133}$
18	枫树	$B = 0.043(d^2h)^{0.994}$
19	榆树	$B = 0.1458(d^2h)^{0.8191}$
20	杜仲	$B = 1.678 + 0.046d^2h$
21	阔叶树	$B = 0.0396(d^2h)^{0.933}$
22	针叶树	$B = \text{Exp}(-2.2796 + 2.2874 \ln d)$
23	石楠	$B = 0.310(d^2h)^{1.097}$
24	丁香	$B = 6.656h^{5.065}$
25	连翘	$B = 0.683(d^2h)^{0.715}$
26	紫薇	$B = 11.109 + 17.911 \ln h$
27	海桐	$B = 0.264(d^2h)^{0.916}$
28	木槿	$B = 2.958(d^2h)^{0.607}$
29	南天竹	$B = 18.925(C_h)^{1.656}$
30	黄杨	$B = 15.572d^{1.325}$
31	紫叶小檗	$B = 224.662(C_h)^{1.546}$
32	卫矛	$B = 68.016(A_c)^{1.021}$
33	灌木(乔木型)	$B = 0.182d^{2.487}$
34	其他灌木	$B = 100.71(A_c)^{0.925}$

注: B 为植物生物量, C 为冠幅, $A_c = \pi C_1 C_2 / 4$ (C_1 为南北方向冠幅, C_2 为东西方向冠幅), d 为胸径, h 为株高。

生长速度等的影响, 导致个体树种的生物量明显偏低。

2.2 中心城区城市绿地固碳释氧量分析

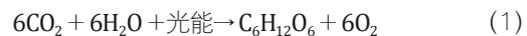
植物碳储量可通过生物量转换系数进行估算。本研究采用固定值法, 并选取0.5作为碳储量计算的转换系数^[19]。植物固碳释氧量计算见公式(1)(2)。

$$S_c = \alpha \sum_{i=1}^n A_i b_i \quad (1)$$

$$S_o = \beta \sum_{i=1}^n A_i b_i \quad (2)$$

其中, S_c 和 S_o 分别为植物生物量的固碳量和释氧量; i 表示土地类型, A_i 为第 i 种土地类型面积, b_i 为第 i 种土地类型的单位面积生物量; α 为单位生物量固碳系数, β 为单位生物量释氧系数, 转换系数均为0.5。

植物的固碳释氧量呈现稳定的化学计量关系, 该关系源自光合作用的化学平衡原理。光合作用的总反应式见化学式(1)。



从该反应式可以看出, 植物每固定1 mol的 CO_2 , 同时会释放1 mol的 O_2 , 因此, 固碳量与释氧量的摩尔比为1:1。

通过计算得出阿拉尔市中心城区不同类型绿地的固碳释氧量, 合计96 626.86 t(表4)。其中, 公园绿地和其他附属绿地的固碳释氧量较多, 分别为23 737.00082 t和25 050.46804 t。

根据植物固碳量公式可知, 单株植物固碳量与其生物量为正比例关系, 乔木因为生物量含量多, 其固碳能力最强, 灌木次之, 地被植物最弱。根据张青云等^[20]在2021年的研究可知阔叶树的固碳能力也大于针叶树; 常绿植物的固碳量大于落叶植物的固碳量。而且相同类型植被的固碳释氧能力也是不同的, 以乔木为例, 阿拉尔市中心城区样地内经过调查记录的乔木种类一共有36种, 其单株乔木固碳量见表5。计算结果显示阿拉尔市常见的36种乔木中, 固碳量较大的乔木为垂柳、胡杨、银杏、馒头柳、水杉、暴马丁香、悬铃木、新疆杨、裂叶榆、鹅掌楸、臭椿、旱柳、圆冠榆、梨树等。固碳量较大的灌木为丁香、卫矛、金叶女贞、木槿等。

绿地固碳释氧量计算结果显示, 阿拉尔市不同类型城市绿地固碳释氧量存在较大的差异, 其中, 公园绿地的单位面积固碳能力最强, 防护绿地和区域绿地次之, 广场绿地的固碳能力最弱, 大小关系依次为: 公园绿地>防护绿地>区域绿地>道路绿地>其他附属绿地>居住区绿地>广场绿地。

石铁矛等^[21]研究表明, 影响绿地固碳释氧能力的因素主要包括植物类型、绿地面积大小、植物配植形式等, 同时栽植密度也是重要影响因素之一。本研究中根据现场调查可知, 样地形状面积相同的情况下, 公园绿地植物种类最多, 种植密度大, 且多采用乔木加灌木加地被的配植方式, 植物层次丰富, 物种丰富度较高; 而防护绿地和区域绿地植物种类比较单一, 配植方式为乔木加地被, 层次简单, 且密度较低; 广场用地在相同面积的样地中, 绿化覆盖面积最少且种植形式单一,

表3 阿拉尔市中心城区不同类型城市绿地样地植物生物量

Tab. 3 Plant biomass in different types of urban green space plots in the central urban area of Alar

名称 Designation	主要树种 Chief species	样地生物量 /kg Biomass
公园绿地 (样地)	垂柳、刺柏、侧柏、悬铃木、海棠、楸子、新疆杨、刺槐、裂叶榆、家榆、沙枣、櫻桃李、紫叶李、白蜡、国槐、长枝榆、鹅掌楸、火炬树、紫叶丑李、金叶复叶槭、胡杨、臭椿、杏树、毛泡桐、山楂、旱柳、碧桃	274 358.8004
广场绿地 (样地)	元宝槭、杜梨、紫叶李、山荆子、白蜡、银杏、悬铃木、垂枝榆、山桃、皂荚、刺槐、大叶榆、侧柏、火炬树	14 368.76026
居住区绿地 (样地)	银杏、紫荆、紫叶李、白蜡、碧桃、金叶复叶槭、旱柳、悬铃木、海棠、櫻桃李、沙枣、白榆、裂叶榆、垂榆、金叶榆、夏橡、五角枫、国槐、馒头柳、桃叶卫矛、火炬树、新疆杨、臭椿、家榆	161 931.2255
公共管理用地附属绿地 (样地)	悬铃木、五角枫、白蜡、臭椿、家榆、丁香、榆叶梅、紫叶李、裂叶榆、长枝榆、刺槐、国槐、园冠榆、金叶复叶槭、海棠、栾树、山樱花、玉兰、夏橡、银杏、暴马丁香、水杉、白榆、梨树、枣树、桑树、豆梨、旱柳、火炬树、五角枫、山楂、刺柏、垂柳、新疆杨、碧桃	161 250.4747
商业用地附属绿地 (样地)	垂柳、长枝榆、杏树、碧桃、皂荚、圆柏、海棠、旱柳、山楂、胡杨、灰杨、园冠榆、国槐	36 674.84858
工业用地附属绿地 (样地)	国槐、馒头柳、金叶榆、桑树、碧桃、梨树、白蜡、元宝槭、刺槐、火炬树、圆柏、白皮松、白榆、旱柳、新疆杨、悬铃木、杏树	71 544.01
道路绿地 (样地)	悬铃木、家榆、国槐、紫叶李、白蜡、海棠、银杏、园冠榆、金叶复叶槭、栾树、黄金树、茶条槭	77 399.8355
防护绿地 (样地)	新疆杨、沙枣、胡杨	28 994.733
区域绿地 (样地)	新疆杨、沙枣、胡杨	96 649.11

表4 阿拉尔市中心城区不同类型绿地固碳释氧量

Tab. 4 The carbon sequestration and oxygen release of different types of green spaces in the central urban area of Alar

名称 Designation	中心城区绿化 覆盖面积 /hm ² Total area of green space	总碳储量 /t Total carbon storage	总释氧量 /t Total oxygen release	单位面积固碳释氧量 / (t/hm ²) Oxygen consumption and carbon release per unit area
主城区公园绿地	227.11	23 737.00082	23 737.00082	104.5176382
主城区防护绿地	203.24	15 714.37209	15 714.37209	77.31928798
主城区广场用地	2.12	60.9235435	60.9235435	28.73752052
主城区道路绿地	138.73	9 544.603715	9 544.603715	68.79985378
主城区居住区绿地	110.8	6 240.688621	6 240.688621	56.32390452
其他附属绿地	418.33	25 050.46804	25 050.46804	59.88207406
区域绿地	210.54	16 278.80289	16 278.80289	77.31928797
合计	1 310.87	96 626.85972	96 626.85972	—

缺乏灌木和地被。

3 城市绿地碳氧平衡缺口分析

城市中导致 CO₂ 释放和 O₂ 消耗的因素可以分为三个主要类别：一是化石燃料的消耗；

二是水泥的生产过程；三是人口及家畜的呼吸作用^[22]。对此，本研究从人口呼吸、水泥生产、工业消耗、居民生活和交通运输5方面入手，计算这些因素导致的释碳耗氧量^[23]，计算方法采用物料法。

3.1 中心城区城市绿地释碳耗氧量计算

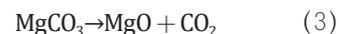
城市年碳排放量和年耗氧量的计算分别见公式(3)(4)。

$$C_e = C_p + C_i + C_t + C_f \quad (3)$$

$$O_u = O_p + O_i + O_t + O_f \quad (4)$$

式中，C_e为城市年碳排放量，C_p为人口及牲畜呼吸年碳排放量，C_i为工业生产年碳排放量，C_t为居民生活年碳排放量；C_f为交通运输年碳排放量，C_f为水泥生产年碳排放量；O_u为城市年耗氧量，O_p为人口及牲畜呼吸年耗氧量，O_i为工业生产总耗氧量，O_t为居民生活年耗氧量，O_f为交通运输年耗氧量；单位均为t/a。

水泥生产如化学式(2)(3)所示，可以看出水泥生产中几乎没有O₂的消耗，只产生CO₂。



由相关参考文献可知，标准煤的含碳系数约等于0.855 kgC/kg标准煤，CO₂的分子量为44，其中C的分子量为12。因此，1 kg的C完全燃烧后会生成3.67 kg的CO₂，结合标准煤的含碳系数，标准煤的碳排放系数=0.855×3.67≈3.138 kgCO₂/kg标准煤。而根据最新的IPCC报告显示，标准煤的耗氧系数为2.60；天然气的碳排系数为1.89，耗氧系数为2；商品混凝土的碳排放系数是0.158，耗氧系数为0.154^[24,25]。汽油折算标准煤系数为1.4714；柴油折算标准煤系数为1.4571；电力折算标准煤系数为0.1229。人口呼吸的碳排放系数为0.079，耗氧系数为0.211；牛的碳排放系数为0.217，耗氧系数为0.579；猪的碳排放系数为0.082，耗氧系数为0.219；水泥生产碳排放系数为0.136。最新碳循环研究证实，全球人为CO₂排放的归宿呈现显著的三分特征：大气存

表5 阿拉尔市中心城区单株乔木固碳量

Tab. 5 The carbon sequestration capacity of a single tree in the central urban area of Alar

乔木种类 Tree species	固碳量 /kg Fixed carbon content						
垂柳	259.52720	金叶复叶槭	7.83200	沙枣	14.30300	银杏	236.77850
悬铃木	87.83450	胡杨	275.83450	櫻桃李	5.74000	桑树	14.72250
海棠	12.60950	臭椿	46.72700	紫叶李	13.78600	夏橡	13.66850
楸子	5.67100	杏树	14.77700	白蜡	27.50000	五角枫	29.72250
新疆杨	82.38775	毛泡桐	4.38950	国槐	34.00000	馒头柳	750.22250
刺槐	32.00600	山楂	4.50000	长枝榆	55.22670	园冠榆	157.77700
裂叶榆	60.42300	旱柳	65.22650	鹅掌楸	125.22300	梨树	169.22300
家榆	30.02000	碧桃	5.22150	火炬树	29.83400	枣树	9.72250
栾树	30.27700	暴马丁香	434.22750	紫叶丑李	13.00400	水杉	217.83200

量 (32%±2%)、海洋汇 (30%±3%) 和陆地汇 (38%±3%)^[26]。由于南疆气候的特殊性,阿拉尔市地靠塔克拉玛干沙漠,年降水量十分稀少,因此本研究将区域释放的CO₂总量乘以2/3,作为估算的城市释碳量。

根据表6计算结果,在城市生产生活中碳排放量较多的三个类别分别是煤燃烧、汽油燃烧和水泥生产,碳排放量相对少一些的是电力消耗、柴油燃烧、人口呼吸以及天然气燃烧。其中标准煤燃烧、电力消耗和天然气燃烧属于居民生活范畴,主要集中在居住区绿地、商业用地附属绿地以及公共管理用地附属绿地范围内;柴油燃烧和水泥生产

属于工业生产,主要集中在工业用地附属绿地;汽油燃烧产生的CO₂主要集中在道路绿地和防护绿地。所以阿拉尔市中心城区的释碳耗氧量来源关系为:工业生产碳排放量>交通运输碳排放量>水泥生产>居民生活>人口及家畜呼吸。可见,阿拉尔市中心城区碳排放量和耗氧量主要来自化石燃料的排放,人类活动及牲畜养殖并非主要来源。

3.2 中心城区碳氧平衡缺口分析

城市碳氧平衡分析是评估城市生态系统中CO₂和O₂的输入、输出及储存状态的过程,旨在量化城市的碳排放和氧消耗,并分析其

与自然生态系统(如植被)的相互作用。平衡分析的目标是量化城市的CO₂排放和O₂消耗,并评估其与自然生态系统的补偿能力。城市的碳氧平衡缺口计算见公式(5)(6)。

$$Z_c = \frac{C_e - S_c}{C_e} \times 100\% \quad (5)$$

$$Z_o = \frac{O_u - S_o}{O_u} \times 100\% \quad (6)$$

式中, Z_c、Z_o分别表示碳缺口比和氧缺口比; C_e为城市年碳排放量, S_c为城市绿地植物固碳量; O_u为城市年耗氧量, S_o为城市绿地释氧量。

通过生物量法和物料法分别对阿拉尔市中心城区绿地内的固碳释氧量和释碳耗氧量进行计算,结果显示中心城区碳缺口和氧缺口比例分别为93.52%和94.75%(表7,表8)。阿拉尔市附属绿地中的居住区绿地、道路绿地、工业用地附属绿地的固碳释氧能力目前比较弱。通过实地调研对比统计年鉴显示,阿拉尔市中心城区公园绿地面积为261.63 hm²,而绿化覆盖面积为227.11 hm²;防护绿地面积为237.18 hm²,绿化覆盖面积为203.24 hm²;区域绿地面积为223.24 hm²,绿化覆盖面积为210.54 hm²。由此可知,阿拉尔市中心城区的公园绿地、防护绿地以

表6 阿拉尔市中心城区释碳耗氧量

Tab. 6 The carbon release and oxygen consumption in the central urban area of Alar

类别名称 Category name	数量 Quantity	碳排放量/t Carbon emission	耗氧量/t Consumed oxygen
中心城区人口	125 857 人	9 942.70300	26 555.82700
可出栏的牛	100 头	21.70000	57.90000
可出栏的猪	21 200 头	1 738.40000	4 642.80000
标准煤燃烧	630 099.9839 t	1 977 253.74900	1 638 259.95800
天然气燃烧	4 181.542 万 m ³	7 903.11438	8 363.08400
汽油燃烧	25 557.6 t	118 005.91040	97 774.17686
柴油燃烧	2 530.359 t	11 569.76238	9 586.163857
电力消耗	56 273.678 万 kwh	21 702.51791	17 981.69107
水泥生产	360 081.728 t	48 971.11501	0
商品混凝土生产	259 865 m ³	41 058.67000	40 019.21000
合计	—	2 238 167.64200	1 843 240.81100

及区域绿地的绿化覆盖面积还可以增加 81.16 hm²。虽然阿拉尔市城市绿化近些年来有着明显的改善, CO₂的吸收量和O₂的释放量不断增加, 但就中心城区而言, 碳氧平衡仍存在巨大缺口, 城市绿地在减排增汇方面的作用有待加强。

4 中心城区城市绿地优化策略

根据分析结果及现场调查发现, 阿拉尔市城市绿地在碳汇方面存在的问题主要体现在城市绿地覆盖率较低, 导致植物碳储量能力较弱, 尤其是一些工业绿地更为明显; 气候干旱导致土壤盐碱化严重, 植物生长缓慢, 局部区域植物层次单一、多样性水平较差。同时, 由于阿拉尔市城区外围是基本农田, 农田外围是防护林带及大面积的沙漠, 因此这种土地格局也导致城市绿地向外围扩展相对于其他类型城市而言难度较大, 只能限制在中心城区进行重点优化。

基于分析结果以及“三源绿地”布局理论, 针对阿拉尔市干旱型城市绿地特点, 将中心城区的城市绿地空间划分为氧源绿地、碳源绿地和近源绿地三类分别进行优化^[27]。

4.1 构建城市氧源绿地

氧源绿地特指光合效能突出、具备显著

固碳释氧功能的城市绿色空间, 通常由高密度的植被组成, 面积为0.5 hm²以上, 集中布局, 主要分布在城市中心区域周边, 起到防风固沙、滞碳防尘的作用^[28]。结合阿拉尔市中心城区的现状, 在中心城区西北部和东南部的区域绿地以及西南部的防护绿地, 因其植被密度相对较大, 碳排放量相对较少, 且处于中心城区边缘, 因此可作为其氧源绿地。但调查结果也显示, 这三处绿地覆盖度并不高, 部分地区植被退化, 土表裸露, 植物长势差, 植物空间层次单一。因此在进行优化时首先考虑增加绿化覆盖率, 并进行多样性修复, 恢复其生态功能的完整性。并且通过调整氧源绿地的边缘形态, 引入绿地斑块过渡至城区, 使中心城区能够流入更多的O₂。通过建立生态绿道、林带等连接周边分散的绿地, 使其形成连续的生态网络, 以发挥氧源绿地的整体效能。

此外, 也需要根据干旱型城市绿地植物单一化的特点增加其物种多样性, 即在保留现有植物的基础上, 补植固碳能力强且耐盐碱耐干旱的乔木, 如胡杨、银杏、垂柳等, 增加灌木和地被植物覆盖面积, 丰富植物层次以及单位面积的固碳释氧量。这种模式能有效地将城市空间与自然空间进行串联, 促进城市内外空间的对流。

表7 阿拉尔市中心城区碳缺口比
Tab. 7 The carbon gap ratio of the central urban area of Alar

二氧化碳排放量 /t Carbon dioxide emission	二氧化碳吸收量 /t Carbon dioxide absorption capacity	碳缺口量 /t Shortage of carbon dioxide	碳缺口比例 /% Proportion of carbon dioxide deficiency
1 492 111.762	96 626.85972	1 316 933.842	93.52

表8 阿拉尔市中心城区氧缺口比
Tab. 8 The oxygen gap ratio in the central urban area of Alar

氧气消耗量 /t Oxygen consumption	氧气释放量 /t Oxygen release quantity	氧缺口量 /t Oxygen deficiency	氧缺口比例 /% Oxygen gap ratio
1 843 240.811	96 626.85972	1 746 613.951	94.75

4.2 构建城市碳源绿地

碳源绿地是指那些由于人类活动或自然过程导致碳排放量较高的绿地空间。阿拉尔市中心城区西部主要为工业用地附属绿地及道路绿地, 分布着大量工业厂房。根据现场调查, 工业用地附属绿地覆盖度极低, 缺少乔木树种, 且绿地分散, 加之工业生产导致碳排放强度大, 植物碳汇效果较差, 因此需要将这部分工业用地中的绿地作为碳源绿地进行优化。

首先, 对工业用地和附属绿地区域厂房周边现有的隔离绿化带植物进行修复和补植, 增加灌木的数量和地被植物的密度, 与周边道路绿地进行衔接, 形成完善的生态网络, 提高工厂周边防护绿地的净化能力; 其次, 在工厂厂区内, 应根据工业绿地设计规范, 增加工厂内部绿地面积使其达到30%绿化率; 在生产区与办公区、生活区交界处规划建设缓冲绿地带, 有效阻隔噪声传播并净化空气污染物。

在植被选择方面, 选择对污染物(如二氧化硫、氮氧化物、粉尘等)耐受性强的植物, 选用耐旱、耐瘠薄植物(如紫穗槐、怪柳等), 减少灌溉和施肥需求, 降低维护成本; 对污染土壤进行改良或恢复, 确保植物健康生长; 在安全与维护方面, 确保绿地与生产设施之间保持安全距离, 避免植被影响设备运行或导致安全事故。另外, 要强化绿地养护措施, 包括修剪、灌溉、病虫害防治等。

4.3 构建城市近源绿地

近源绿地是指位于城市建成区内靠近污染源或高碳排放区域(如工业区、交通干道、商业区等)的绿地空间。这类绿地的主要功能是通过植被的吸附、过滤和隔离作用, 减少污染物扩散、降低噪声、改善局部微气候。

近源绿地可以是小型绿地、带状绿地或隔离绿地，形式多样，其分布特点是“大范围分散，小范围聚集”^[29]。

阿拉尔市是典型的干旱型城市，其绿地特征是面积小且分散，并且缺少彼此连通，因此可以采取点状—带状相结合的方式布置绿地，将缀块化的绿地在空间上进行连接，增加景观生态连通性，尤其靠近碳排放量大的近源绿地需要加强空间整合。中心城区内的屯垦文化公园和胡杨河滨水公园虽然面积较大，但两处综合公园缺少生态连通性。因此建议围绕屯垦文化公园与胡杨河滨水公园，以塔里木大道、青松路、虹桥路、南泥湾大道为骨架设置生态廊道；以胜利大道、井冈山大道、军垦大道、金银川路、大学路为生态网格，将中心城区内部分散的小面积绿地斑块用生态网格串联，以两处综合公园为“生态绿心”，形成覆盖中心城区的“城市绿网”，以此来完善近源绿地的整体性，促进城市内部与城市边缘氧源绿地的连接与交融，将城市西部的工业碳排放限制在一定区域内，减少CO₂扩散到城市内部。

另外，增加城市各个绿地斑块与周边绿地的连通性，以提升中心城区城市绿地的总体固碳释氧能力；同时在两处大型公园绿地周边设置街头绿地和口袋公园等绿地斑块，增加“城市绿网”的密度，强化城市绿地空间的整体性，促使城市绿地空间形成较为完整的固碳释氧体系。

5 结论

阿拉尔市中心城区绿地碳氧分析结果表明，碳氧释放与固定数量均存在较大缺口，整体上处于碳氧失衡状态，且不同的绿地类型在碳氧失衡方面表现出明显差异。一方面是因为阿拉尔市是典型的干旱型城市，气候

条件严苛，降水量少；另一方面主要源于城市绿地覆盖度有待加强，在空间布局及植物搭配上仍有优化空间，尚不能充分发挥其减排增汇功能。对此，本研究从三源绿地的角度进行绿地空间优化，将阿拉尔市城市外围以生态绿道等线性绿地串联分散的绿地节点，形成连续的生态网络；在城市内部，整合分散的小型绿地斑块，通过生态廊道（绿道、林荫带等）连接，形成覆盖中心城区的连续性生态网络，并将内外网络进行连接，提高“城市绿网”的连通度和可达性；同时，通过“绿心引领—廊道串联—斑块密布”的多层级结构，构建高效、可达、可持续的城市绿地网络，以充分发挥绿地网络的整体生态功能，提升中心城区生态韧性及人居环境质量。

注：图1、图2在阿拉尔市卫星地图（吉林一号卫星地图）基础上绘制而成；表2改绘自参考文献[15]；其余表格均由作者绘制。

参考文献

- [1] 张桂莲, 邢璐琪, 张浪, 等. 城市绿地碳汇计量监测方法研究进展[J]. 园林, 2022, 39(1): 4-9.
- [2] 刘颂, 张浩鹏. 多尺度城市绿地碳汇实现机理及途径研究进展[J]. 风景园林, 2022, 29(12): 55-59.
- [3] 依兰. 城市公园植物群落的碳收支评估及其优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [4] 翁祥凤. 基于碳汇理念下的城市景观生态设计应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [5] NOWAK D J, CRANE D E. Carbon Storage and Sequestration by Urban Trees in the USA[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(3): 381-389.
- [6] VACCARI F P, GIOLI B, TOSCANO P, et al. Carbon Dioxide Balance Assessment of the City of Florence (Italy), and Implications for Urban Planning[J]. Landscape and Urban Planning, 2013, 120: 138-146.
- [7] STROHBACH M W, ARNOLD E, HAASE D. The Carbon Footprint of Urban Green Space—A Life Cycle Approach[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 104(2): 220-229.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市绿地分类

标准GB/T51346-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

- [9] 吴益伟, 应震, 于晓庆, 等. 农科论文中a×b形式表达的探讨[J]. 农业图书情报学刊, 2012, 24(5): 145-146.
- [10] 王旭东. 城市绿地植物群落结构特征与优化调控研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- [11] 殷炜达, 苏俊伊, 许卓亚, 等. 基于遥感技术的城市绿地碳储量估算应用[J]. 风景园林, 2022, 29(5): 24-30.
- [12] 和晓彤. 面向总体规划阶段的城市绿地碳汇量估算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [13] 林刚, 肖劲松, 杜鹏飞, 等. 碳氧平衡理论在生态城市规划中的应用——以贵阳市为例[J]. 动感(生态城市与绿色建筑), 2010(4): 63-66.
- [14] 牛彦琼, 李双江, 罗晓, 等. 基于碳氧平衡法的石家庄生态用地需求研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(12): 7325-7327.
- [15] 朱敏. 西安浐灞生态区城市绿地空间植被碳储量估算研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- [16] 崔传洋. 基于二类调查数据的县级森林碳储量及碳密度测算[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [17] 徐冰, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 2000-2050年中国森林生物量碳库: 基于生物量密度与林龄关系的预测[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 40(7): 587-594.
- [18] 马陆航. 居住区绿地固碳植物配置模式及设计优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023.
- [19] 王迪生. 基于生物量计测的北京城区园林绿地净碳储量研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [20] 张青云, 吕伟娅, 徐炳乾. 华北地区城市绿地固碳能力测算研究[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 41-48.
- [21] 石铁矛, 王迪, 汤煜, 等. 城市生态系统碳汇固碳能力计算方法与影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2023, 34(2): 555-565.
- [22] 孙爽芸. 上海市城市系统碳平衡研究[J]. 项目管理技术, 2019, 17(9): 37-43.
- [23] 汪托弟, 徐丽萍, 李智慧, 等. 双碳目标下乌鲁木齐市碳氧平衡估算与影响因素分析[J]. 生态学报, 2025, 45(3): 1289-1302.
- [24] 杨璐, 章锦河, 王群, 等. 南京市生态经济系统碳氧平衡分析[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2223-2230.
- [25] 潘文, 王皓雪, 施瑞. 基于遥感的成都市碳氧平衡动态分析[J]. 科技风, 2017(2): 98-99.
- [26] 张颖, 王群, 李边疆, 等. 应用碳氧平衡法测算生态用地需求量实证研究[J]. 中国土地科学, 2007, 21(6): 23-28.
- [27] 尹沛卓, 李端杰. 基于碳汇理念的城市绿地布局优化——以日照市主城区为例[C]// 中国风景园林学会2018年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 389-394.
- [28] 刘冲. 沈北新区碳汇绿地空间优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.
- [29] 徐婷婷. 基于碳源碳汇分布的城市空间低碳布局优化研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2015.