

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

凯吾沙·塔依尔¹, 黎 华¹, 古丽米热·艾尔肯², 尹章才¹, 吴 浩³

(1. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 武汉 430070; 2. 新疆昌吉州奇台县自然资源局,

新疆 昌吉 831800; 3. 华中师范大学城市与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 自从“双碳”目标提出以来, 进行土地利用碳排放时空变化特征研究对碳减排政策的制定具有指导意义。以乌鲁木齐地区为对象, 基于 FLUS 与灰色预测模型预测 2030 年土地利用碳排放量, 并与往年相结合模拟研究区 2000—2030 年碳排放量的时空格局变化。结果表明: (1) 研究区 2000—2020 土地利用变化中林地、未利用地、水域、建设用地为正增长, 耕地与草地为负增长, 草地与耕地面积主要是向未利用地与建设用地转出, 水域与林地面积变化相对比较稳定。(2) 2000—2020 年碳排放总量呈增加的趋势, 建设用地是主要的决定因素, 研究区碳排放量呈“由南向北递增”的空间分布特点, 米东区最高, 达坂城区最低。(3) 2030 年不同情景碳排放量计算结果中, 耕地保护情景碳排放总量最高, 为 2 773.67 万 t, 生态环境情景碳排放量最低, 为 2 767.15 万 t。(4) 研究区从 2000—2030 年大部分地区趋于稳定, 变化的区域呈大聚集与零星分布的特点, 碳排放呈增加的区域主要分布于研究区中心区与北部的米东区, 呈减少的区域主要分布于南部的乌鲁木齐县与达坂城区。碳排放增加的区域在耕地保护情景达到最大, 占研究区面积的 25.4%, 碳排放减少的区域在生态环境达到最大, 占研究区面积的 13.3%。

关键词: 土地利用碳排放; FLUS 模型; 灰色预测模型; 时空演变; 预测

中图分类号: X171.1; F301.24

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)04-0214-13

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.04.027

Spatio-temporal Evolution and Prediction of Carbon Emissions in Urumqi Region Based on FLUS and Grey Prediction Model

TAYIER Kaiwusha¹, LI Hua¹, AIERKEN Gulimire², YIN Zhangcai¹, WU Hao³

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology,

Wuhan 430070; 2. Bureau of Natural Resources Qitai County Changji Prefecture Xinjiang, Changji,

Xinjiang 831800; 3. The College of Urban and Environmental Sciences, Central China Normal University, Wuhan 430079)

Abstract: Since the “two-carbon goal” was proposed, the research on the spatial-temporal variation characteristics of land use carbon emissions is of guiding significance for the formulation of carbon emission reduction policies. Based on FLUS and grey prediction model, land use carbon emissions in 2030 were predicted in Urumqi, and the spatial-temporal pattern of carbon emissions from 2000 to 2030 was simulated by combining with previous years. The results were as follows: (1) During the land use change in the study area from 2000 to 2020, the forest land, unused land, water area and construction land showed positive growth, while the arable land and grassland showed negative growth. The area of grassland and cultivated land was mainly transferred to unused land and construction land, and the area change of water area and woodland was relatively stable. (2) The total carbon emissions in the study area showed an increasing trend from 2000 to 2020, and construction land was the main determinant. The spatial distribution of carbon emissions in the study area showed an increasing trend from south to north, with the highest carbon emissions in Midong District and the lowest carbon emissions in Daban District. (3) In the calculation results of carbon emissions under different scenarios in 2030, the total carbon emissions under cultivated land protection scenario were

收稿日期: 2023-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071358, 42171415)

第一作者: 凯吾沙·塔依尔(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事元胞自动机在生态环境中的应用研究。E-mail: 757951542@qq.com

通信作者: 黎华(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地理信息系统开发与应用研究。E-mail: leon@whut.edu.cn

the highest (27.736 7 million t), while the carbon emissions under ecological environment scenario were the lowest (27.671 5 million t). (4) From 2000 to 2030, most areas of the study area tended to be stable, with large aggregation and sporadic distribution of the changing areas. The increasing area of carbon emission was mainly distributed in the central area of the study area and Midong District in the north, while the decreasing area was mainly distributed in Urumqi County and Dabancheng District in the south. The area with the largest increase in carbon emission was in the cultivated land protection scenario, accounting for 25.4% of the study area. The area with the largest decrease in carbon emission was in the ecological environment scenario, accounting for 13.3% of the study area.

Keywords: land use carbon emission; FLUS model; grey prediction model; spatio-temporal evolution; forecast

自改革开放以来,我国工业迅速发展,但也迅速成为碳排放大国。2020年9月,中国在第七十五届联合国大会上提出“双碳”目标:碳排放力争于2030年前达到“碳达峰”,并争取在2060年前实现“碳中和”。这对于我国的经济和能源来说都是巨大的压力和挑战,在发展的过程中做好节能减排,是我国首要的任务之一。

碳排放作为社会经济发展的产物,是导致温室效应的重要原因,特别是与土地利用/覆被变化有着密切的关系。土地作为陆地生态系统碳排放的载体,土地利用和土地利用结构的改变是影响碳排放的重要因素。在时空的维度揭示土地利用变化所引起的碳排放并找出针对性的碳减排途径对合理利用土地与社会经济同步提升起到参考意义。早在20世纪90年代,Houghton^[1]对土地利用的变化对大气中二氧化碳量的影响进行研究。直到现在,国内外基于土地利用变化引起碳排放的研究从未停过。其中碳排放系数法在碳排放计算中得到广泛应用,该方法通过不同土地利用面积与碳排放系数计算出不同地类的碳排放量,从而对不同区域碳排放强度的差异进行分析^[2-6];也有学者^[7-10]以不同地类作为影响因素对碳排放计算结果进行关联度分析,得出不同地类作为影响因素对不同碳排放强度的关联系数,来衡量对碳排放的相对作用大小;韩璇等^[11]构建碳足迹模型,对不同土地利用方式的碳排放和碳足迹进行了分析。除了采用碳排放系数法之外,也有学者^[12]直接采用统一数据和规范化、标准化数据处理方法,建立的城市二氧化碳排放数据集对其研究区的碳排放强度进行空间尺度的探讨。以上研究虽然能对碳排放空间格局的演变进行分析,但缺乏对未来碳排放的模拟预测。近2年由于“双碳”目标的提出,对未来的“碳”效应进行预测成为研究热点。也曾有学者^[13]通过逻辑回归的方法对未来的碳排放量进行过预测,但仅仅是通过统计模型还远不能从时空的角度模拟未来的碳排放。因此,近期的研究是以未来的土地

利用变化作为“切入点”,采用元胞自动机模型^[14]对未来的土地利用变化进行预测,对未来的碳储量进行计算,并在碳效应中通过碳储量与碳排放的比值关系推测未来碳排放的变化趋势,这样不仅达到对未来的碳排放进行预测的效果,并且也可以从时空的角度对研究区碳排放量进行探讨。史名杰等^[15]通过多评价准则(MCE)的元胞自动机模型,模拟未来的土地利用变化,耦合InVEST模型探讨了研究区过去到未来陆地生态系统碳储量的时空演变格局;也有研究^[16-18]通过设定不同的土地利用情景,预测不同情景下土地利用类型,从而得到不同情景下的碳储量;邵壮等^[19]利用FLUS模型,分别测算自然演变情景、人口疏解城市发展情景、绿色集约生态保护情景3个城市发展情景下的土地利用变化,结合InVEST模型预测不同情景下的碳储量变化;李立等^[20]通过改进FLUS模型,将POI数据纳入FLUS模型中BP-ANN算法模型中,对研究区2030年的碳储量进行预测。此类方法虽然能通过未来碳储量推测碳排放的变化趋势,但是建设用地碳储量是通过面积与碳密度系数计算得出,由于建设用地的碳排放主要来源于能源的消耗,故侧重于建设用地面积探讨碳排放不宜使用。

本文采用FLUS与灰色预测模型相结合,FLUS模型预测未来的土地利用类型,灰色预测模型预测未来的能源消耗,再通过碳排放系数法对未来的碳排放量进行计算,这样既能通过预测未来的土地利用类型计算不同地类的碳排放量,也能通过未来的能源消耗来计算建设用地的碳排放量,该方法不仅能精确的计算出不同地类的碳排放量,又能在时空的维度模拟碳排放量的分布与变化特点。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

乌鲁木齐市位居亚欧大陆腹地,地处42°45′32″—45°00′00″N,86°37′33″—88°58′24″E(图1)。由于远离海洋,气候干旱,年均降水量不到200 mm。全市面

积 $1.38 \times 10^8 \text{ km}^2$, 常住人口 355 万。乌市自然资源十分丰富, 市内煤炭储量在 $1.00 \times 10^{10} \text{ t}$ 以上, 这对乌鲁木齐的经济发展奠定了坚实的基础。乌鲁木齐是新疆的政治、经济、文化中心, 是第二座亚欧大陆桥中国西部桥头堡, 是我国联系西方的重要门户, 同时也是“一带一路”丝绸之路核心区。故对乌鲁木齐市的碳排放进行研究, 找出土地利用碳减排途径, 为乌鲁木齐市合理利用土地与生态、经济、社会效益的同步提升提供参考。

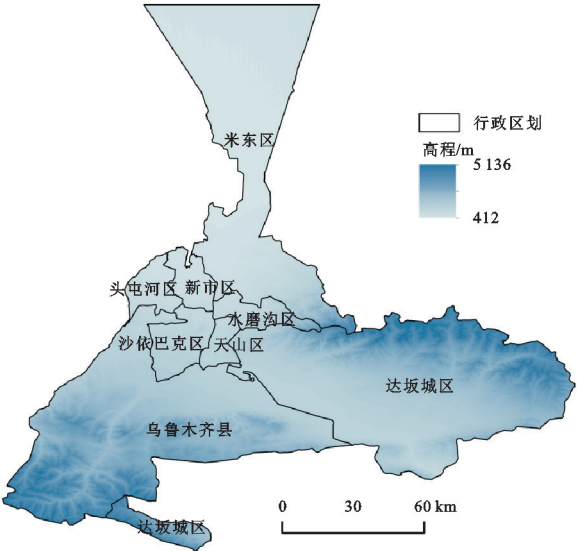


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

本文所需的数据包括能源消耗数据、土地利用数据、土地利用变化驱动因子 3 个部分, 其中土地利用变化驱动因子又细分为自然地理因素、社会经济因素、交通网络因素 3 部分。数据内容与具体来源见表 1 中对土地利用变化驱动因子数据处理的说明。(1) 自然地理因素。包括 DEM、坡度、坡向、降雨量、气温。坡度与坡向可在 ArcGIS 软件对 DEM 数据进行空间分析获得, 分辨率均为 30 m; 年均降水与年均气温是在 ArcGIS 软件中采用研究区范围内的气象站点数据并对其进行反距离加权插值(IDW)获得 30 m 分辨率的年均降水与年均气温栅格数据。(2) 社会经济因素。包括乌鲁木齐地区全市辖 7 区 1 县的人口密度、GDP, 以及到市中心距离。首先进行空间插值得到 30 m 分辨率的 GDP 与人口密度的栅格数据; 其次到市中心距离是以乌鲁木齐市政府为中心点, 在 ArcGIS 软件中通过欧式距离功能生成 30 m 分辨率的栅格数据。(3) 交通网络因素。包括到高速公路的距离, 到铁路的距离, 到城市主干道的距离。首先获取乌鲁木齐地区的高速公路、铁路、城市主干道的矢量线数据, 在 ArcGIS 软件通过欧氏距离生成分辨率为 30 m 的栅格数据。(4) 最后将以上各类驱动因子的栅格数据进行归一化处理使其取值范围在 0~255。

表 1 数据类型及来源

数据类型	数据内容与说明	数据来源
能源消耗数据	2000—2020 年乌鲁木齐地区原煤、焦炭、汽油、原油、煤油、柴油、燃料油、天然气能源的年总消耗量	《乌鲁木齐统计年鉴》 ^[21]
土地利用数据	2000 年、2010 年、2020 年一级土地利用类型数据, 分辨率为 30 m	Globeland30(http://www.globallandcover.com/)
	DEM、坡度、坡向	DEM 数据来自地理空间数据云平台(https://www.gscloud.cn/)
自然地理因素	年均降水量 年均气温 到市中心距离	自治区气象局官网(http://xj.cma.gov.cn/) 资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/)
社会经济因素	GDP 人口密度 到高速公路距离	《乌鲁木齐统计年鉴》 ^[21]
交通网络因素	到铁路距离 到城市主干道距离	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.com/)

2 研究方法

2.1 FLUS 模型

FLUS 模型主要是由 3 个部分构成, 包括人工神经网络算法模块(ANN-based Probability-of-occurrence Estimation, BP-ANN)、基于自适应惯性机制的元胞自动机模块(Self-Adoptire Inertia and Lompetition Mechanism, CA)和马尔科夫链(Markov Chain)计算模块, 是基于浮现概率和土地竞争机制进行的土地利用模拟预测模型。原理是在利用人工神经网络算法 对基期土地利用数据和各驱动因子数据

进行运算的基础上, 估算出区域内不同土地利用类型的发展概率, 将发展概率与领域权重、自适应惯性系数和转换成本相结合, 得出元胞的总体转换概率, 经过轮盘竞争机制最终得出模拟结果。并且可以通过改变领域权重、自适应惯性系数和转换成本从而进行不同情景的土地利用预测。

2.1.1 土地利用变化驱动因子 土地利用变化受自然地理、社会经济、交通网络等方面综合影响, 本研究结合乌鲁木齐地区的基本发展要求, 考虑数据的可获取性, 最终确定 11 项驱动因子见图 2。

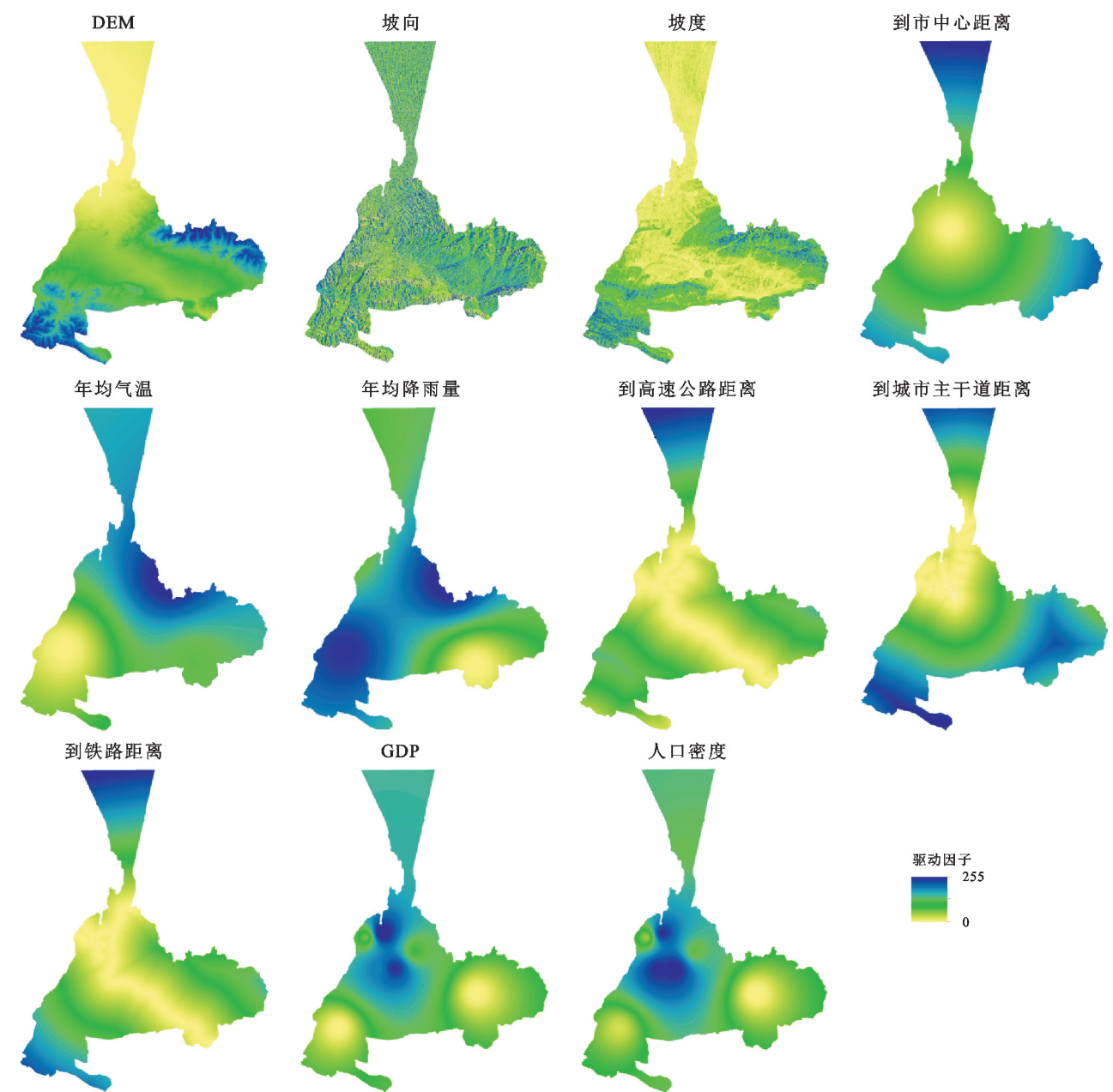


图 2 土地利用变化驱动因子

2.1.2 未来土地利用像元设定 利用 FLUS 模型中马尔科夫链模块进行未来土地利用像元预测,在 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据的基础上,预测 2030 年土地利用像元总数(表 2)。计算公式^[22]为:

$$S_{t+1}=P_{ij}S_t \tag{1}$$

式中: S_t 、 S_{t+1} 分别为 t 时刻和 $t+1$ 时刻的土地利用类型状态; P_{ij} 为 t 时刻用地类型发生转变的概率。

表 2 2000—2030 年不同土地利用类型象元总数

年份	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地
2000	1450747	289857	12099132	776071	239028	456380
2010	1296465	300270	12063300	867197	265032	523186
2020	1338435	620871	9237721	3252106	336856	837366
2030	1387143	897787	9172456	2491426	256168	1102824

2.1.3 邻域权重参数设定 邻域权重参数是用来设定不同用地类型的扩张能力,参数范围为 0~1,数值

越接近 1 表示该用地类型的扩张能力越强,当前确定参数的方法主要有经验法、无量纲量处理法和 Moore 邻域模型法^[23]。参数设定上,历史面积变化趋势作为扩张能力大小的客观依据进行赋值运算,本研究将乌鲁木齐地区 2000—2020 年各类土地利用的历史总面积变化量进行无量纲量处理,结合 3 种不同土地利用的预测情景,进而对邻域权重参数通过与经验法相结合进行赋值得到表 3。其中,通常情况下建设用地转换能力最强为 1,林地最弱为 0.01,其余地类根据历史面积趋势作为扩张能力并结合不同情景所设定的规则所赋值。无量纲量公式为:

$$X^*=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{2}$$

式中: X^* 为离差标准化值; $X_{\max}$ 为数据最大值; $X_{\min}$ 为数据最小值。

表 3 不同情景土地利用领域权重

土地利用类型	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地
自然演变情景	0.50	0.01	0.3	0.4	0.2	1
耕地保护情景	0.90	0.01	0.3	0.4	0.2	1
生态环境情景	0.01	0.80	0.8	0.4	0.2	1

2.1.4 转换成本矩阵设定 转换成本矩阵是指各土地利用类型之间的变化规则,0 表示不能转化,1 表示允许转化。当前主要有依据经验、历史变化分析、专家咨询和情景设置的方式进行参数设定,具体的取值情况可以根据不同情景的设立而取值。其中,结合土地利用变化现实情况和国家政策导向,综合考虑历史

变化和未来发展趋势,本文设立 3 种不同的情景,包括自然演变情景、耕地保护情景与生态环境情景。由于乌鲁木齐属于我国西北干旱地区水资源匮乏,根据《乌鲁木齐市水源保护区管理条例》,3 种情况中均不允许水域转换;耕地保护情景是根据《新疆维吾尔自治区基本农田保护办法(2010 年修正)》保护耕地为“红线”不受其他地类的转换;生态环境情景是根据《国家发改委 财政部 林业局 农业农村部 国土部关于印发新一轮退耕还林还草总体方案的通知》(发改西部[2014]1 772 号)退耕还草还林从而恢复生态环境厅设立。3 种不同情景的转换成本矩阵见表 4。

表 4 3 种不同情景下的转换成本矩阵

土地利用类型	自然演变情景						耕地保护情景						生态环境情景					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
e	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
f	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

注:a、b、c、d、e、f 分别表示耕地、林地、草地、未利用地、水域与建设用地;0 表示不能转化,1 表示允许转化。

2.2 灰色预测模型

灰色预测模型主要针对数量少、完整性和可靠性较低的数据序列进行有效预测,其利用微分方程来充分挖掘数据的本质,建模所需信息少,精度较高,运算简便,易于检验,也不用考虑分布规律或变化趋势。但灰色预测模型一般只适用于短期预测,适合指数型增长的预测,比如,人口数量、航班数量、用水量预测、工业产值预测等。本文以乌鲁木齐地区能源消耗总量为例,基于 2000—2020 年能源消耗对未来 2030 年的能源消耗进行了预测与精度检验。

灰色预测模型是对原始数据系列进行一阶累加生成,建立一阶线性微分方程模型,求得拟合曲线,从而对系统进行预测,过程为:

设 $x^{(0)}$ 为原始数据序列,对 $x^{(0)}$ 进行一次累加生成,得到一个生成序列 $x^{(1)}$,由此可以建立白化形式的微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u \quad (3)$$

用最小二乘法拟合得到参数 a 和 u :

$$\begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y_M \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$Y_M = \begin{bmatrix} X^{(0)}(2) \\ X^{(0)}(3) \\ \vdots \\ X^{(0)}(n) \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

微分方程式(3)所对应的时间响应函数即此次数列预测的基础公式为:

$$x^{(1)}(k+1) = \left[x^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

为提高模型预测的可靠度,采用后验差检验与残差检验进行模型精度检验,后验差比值(C)和平均相对误差($\bar{\epsilon}$)定义为:

$$C = \frac{S_2}{S_1} \quad (8)$$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n (|\text{残差值}| / \text{原始值})_i}{n} \quad (9)$$

式中: S_1 为原始数据标准差; S_2 为预测数据标准差; ϵ 为预测数据误差; $\bar{\epsilon}$ 为预测误差的均值; n 为年份。 C 的大小表明模型预测值和实际值之差的离散程度, C 越小越好,表示原始数据离散大,而预测误差离散性小,则预测精度高; $\bar{\epsilon}$ 越小则平均误差越小,表明拟合精度较高。

2.3 碳排放计算模型

土地利用碳排放有直接碳排放和间接碳排放。土地利用直接碳排放主要是指直接将土地作为劳动对象,由土地利用变化而导致的碳排放;土地利用间接碳排放是指将土地作为一个载体,在土地上进行的人为活动导致的碳排放。本文研究区土地利用类型包括耕地、林

地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 种一级地类,其中,耕地、林地、草地、未利用地与水域可作为直接碳排放地类,建设用地的碳排放主要源于人类的能源消耗等活动,故作为间接碳排放地类。

2.3.1 直接碳排放计算 土地利用直接碳排放采用碳排放系数法对不同土地利用类型的碳排放量进行计算^[6]。计算公式为:

$$E_k = \sum e_i = \sum T_i \delta_i \tag{10}$$

表 5 西北地区碳排放系数取值 单位:kg/(m²·a)

数据来源	耕地	林地	草地	未利用地	水域
张茹倩等 ^[24]	0.497	-0.628	-0.039	-0.0005	-0.0248
孟梅等 ^[9]	0.497	-0.581	-0.021	—	—
唐洪松等 ^[27]	—	-0.649	-0.039	-0.005	-0.0245
和海秀等 ^[25]	—	-0.577	-0.066	-0.005	-0.0303
樊高原等 ^[26]	0.459	-0.612	-0.025	-0.0005	-0.0253

2.3.2 间接碳排放计算 建设用地的碳排放量采用间接计算的方法。建设用地承载大量的人类活动消耗的能源,不能直接利用建设用地面积数据计算。本文通过计算在建设用地进行的生产生活活动所排放的碳排放量来间接表示建设用地的碳排放量。根据乌鲁木齐当地实际情况,本文选择煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气 8 种能源。建设用地的碳排放量计算公式为:

$$E_x = \sum e_j = \sum M_j \cdot n_j \cdot \epsilon_j \tag{11}$$

式中: E_x 为建设用地的总碳排放量(t); e_j 为 8 种能源中第 j 种能源的碳排放量(t); M_j 为第 j 种能源的年消耗量(t); n_j 为第 j 种能源的标准煤转换系数[kgce/t,kgce/(kw·h)]; ϵ_j 为第 j 种能源的碳排放系数[kg/(m²·a)]。其中标准煤转换系数来自于《中国能源统计年鉴》^[28],碳排放系数来自于 IPCC《年国家温室气体清单指南》(2006)^[29],标准煤转换系数与碳排放系数见表 6。

表 6 标准煤转换系数与碳排放系数

能源 类型	标准煤转换系数/ (kgce·t ⁻¹ ,kgce·kw ⁻¹ ·h ⁻¹)	碳排放系数/ (t·t ⁻¹)
原煤	0.7143	0.7559
焦炭	0.9714	0.8550
汽油	1.4714	0.5538
原油	1.4286	0.5857
煤油	1.4714	0.5714
柴油	1.4571	0.5921
燃料油	1.4286	0.6185
天然气	1.3300	0.4483

3 结果与分析

3.1 2000—2020 年土地利用变化分析

乌鲁木齐地区 2000—2020 年土地利用变化见图

式中: E_k 为直接碳排放总量(t); e_i 为不同的土地利用类型的碳排放量(t); T_i 为第 i 种地类的面积(hm²); δ 为第 i 种地类的碳排放系数(t/t)。其中,碳排放系数为负表明该地类在碳循环中起吸收二氧化碳的作用。本文所取不同地类的直接碳排放系数中耕地为 0.484,林地为一 0.609,草地为一 0.038,未利用地为一 0.002 7,水域为一 0.024 8,源于前人^[24-27]对西北地区研究所采用的碳排放系数均值见表 5。

3. 不同土地利用类型主要分为耕地、林地、草地、未利用地、水域和建设用地,面积由大到小依次排序为草地>耕地>未利用地>建设用地>林地>水域。通过统计不同土地利用类型的面积变化得到动态变化值(表 7)可以看出,2000—2020 年不同地类面积增长幅度中,林地、未利用地、水域、建设用地为正增长,耕地与草地为负增长,由大到小排序为未利用地>林地>建设用地>水域>草地>耕地,其中未利用地动态变化最大,变化率为 15.55%,面积增加 217 266.7 hm²;耕地动态变化最小,变化率为-0.45%,面积减小 12 588.7 hm²。表 8 为 2000—2020 年乌鲁木齐地区土地利用发生变化后的面积转移矩阵,可以看出,不同地类经过转化后的方向与转化的大小,耕地整体的动态变化为减少,主要的转出类型为草地与建设用地,这不仅表明乌鲁木齐地区退耕还草政策效果显著,也表明乌鲁木齐地区城市化建设的发展迅速;林地面积整体是呈增加,向其他地类转出的部分很少,其中主要是向草地转出;草地整体变化是呈减少,主要是向未利用地转出。从图 3 可以看出,2010—2020 年,研究区北部米东区草地大部分面积转为未利用地,这是由于该区域原本是低覆盖度草地,后来经草地覆盖度逐渐退化(NDVI<0.1),归为未利用地,说明研究区北部的米东区生态环境遭受破坏,这将对二氧化碳的总吸收量产生一定的影响。未利用地面积总体是呈增加,主要是向水域转出,这是由于研究区属于水资源匮乏的干旱区,故将一些未利用地进行人工造水等措施,来丰富水资源;水域整体是呈增加,有少部分向未利用地与草地转出;建设用地面积整体呈增加,有少部分向耕地与草地转出,其转出大小相对较小,对城市建设产生的作用较小。

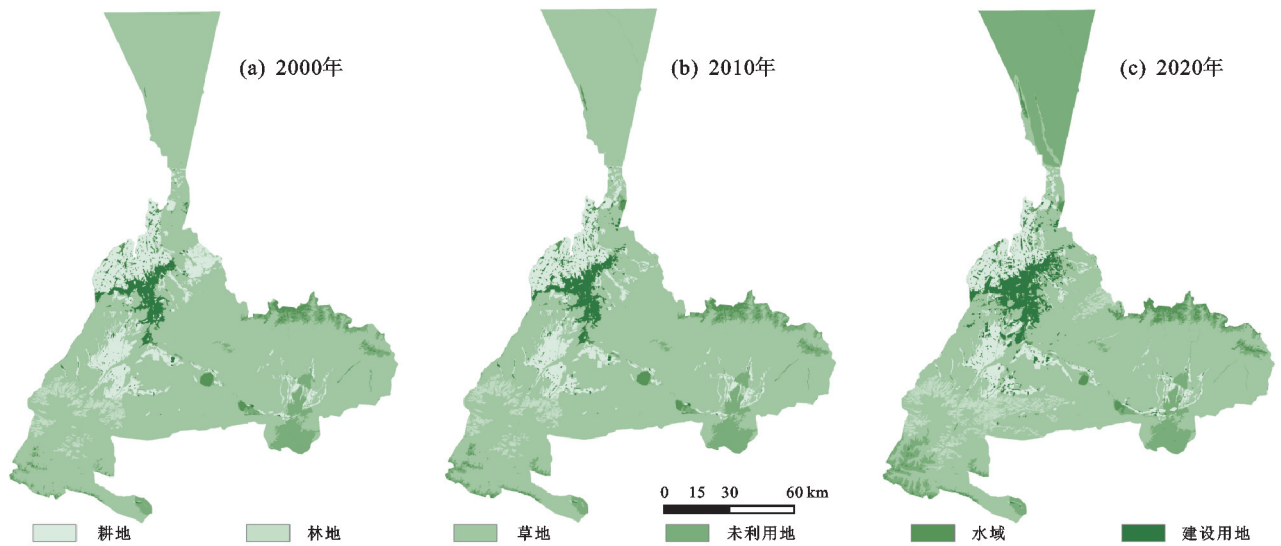


图 3 2000—2020 乌鲁木齐土地利用变化

表 7 2000—2020 乌鲁木齐地区土地利用动态变化

年份	耕地/hm ²	林地/hm ²	草地/hm ²	未利用地/hm ²	水域/hm ²	建设用地/hm ²
2000	130596.1	26064.2	1088951.5	69857.8	21449.1	41077.8
2010	116696.4	27042.8	1085729.1	78058.3	23775.1	47076.3
2020	118007.4	54747.7	815034.2	287124.5	29660.3	73809.3
20 年变化量/hm ²	−12588.7	28683.5	−273917.3	217266.7	8211.2	32731.5
20 年动态变化度/%	−0.48	5.50	−1.26	15.55	1.91	3.98

表 8 2000—2020 乌鲁木齐地区土地利用面积转移矩阵

单位:hm²

地类	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地
耕地	102031.2	352.1	15630.8	53.6	51.5	12439.6
林地	1.7	24826.7	1221.8	0	11.5	0.2
草地	13018.1	29450.4	793515.8	222581.4	6444.2	23594.1
未利用地	951.8	4.2	2038.1	61609.2	5010.8	188.4
水域	112.8	6.1	1284.1	2191.6	17764.3	52.3
建设用地	1861.1	100.8	1134.1	138.0	314.4	37526.4

3.2 2000—2020 碳排放计算结果

3.2.1 土地利用碳排放 根据乌鲁木齐地区土地利用状况,结合碳排放计算模型,计算出 2000—2020 年土地利用碳排放量(表 9)。研究区 2000—2020 年净碳排放量整体呈增长的趋势,从 2000 总净碳排放量 678.3 万 t 到 2020 年净碳排放量 2 017.41 万 t,增长近 3 倍。建设用地碳排放量与土地利用净碳排放总量增长趋势基本一致,到 2020 年建设用地碳排放量达到 2 018.13 万 t,比 2000 年增加 1 340.52 万 t,建设用地是碳排放的主要来源。因此,控制建设用地能源的消耗是抑制研究区碳排放量最有效的方法之一。耕地是另一个碳排放地类,由于研究期间耕地面积呈现波动较小,碳排放量随面积的变化从 2000 年到 2020 年整体呈减少的趋势,减少 0.63 万 t。林地和草地是主要的碳吸收来源,其中,林地的碳吸收量从 2000—2020 年一直是呈增加的趋势,直到 2020 年林地碳吸收量达到 3.33 万 t,相比 2000 年增加 1.74 万

t,说明林地对研究区碳吸收始终起着重要作用;草地碳吸收量从 2000 年到 2020 年呈减小的趋势,并且减小 1.04 万 t,这是由于从 2010—2020 年研究区北部的米东区大部分地区草地退化导致的碳吸收量减少。未利用地与水域也是属于碳吸收的地类,但吸收量相对较小,未利用地碳吸收量随面积大小波动而波动,到 2020 年碳吸收量达到最大值 0.08 万 t,增加 0.06 万 t;由于水域在研究区得到特殊的保护,碳吸收量一直是呈增加的趋势,到 2020 年达到最大值为 0.07 万 t,增加 0.01 万 t。

3.2.2 碳排放空间分布 通过碳排放计算模型计算出整个研究区不同土地利用类型的碳排放量后,基于 2000—2020 年的土地利用结果,分别对乌鲁木齐地区 7 区 1 县(达坂城区、米东区、沙依巴克区、水磨沟区、天山区、头屯河区、新市区与乌鲁木齐县)进行土地利用碳排放计算。其中耕地、林地、草地、未利用地、水域这 5 种地类可根据直接碳排放计算方法进行

计算,每个区域建设用地的碳排放量计算是关键,由于不同区域内建设用地的能源消耗是无法统计并获取数据,故通过对整个乌鲁木齐地区建设用地总的碳排放量与建设用地总的面积比值得到建设用地单位面积的碳排放量(建设用地单位面积碳排放量=建设用

地总的碳排放/研究区建设用地总面积),再通过与 8 个不同区的建设用地面积进行相乘得到(不同区域建设用地碳排放量=建设用地单位面积碳排放量*不同区建设用地的面积)。最终分别得到 8 个区域各自碳排放总量,并以空间分布的形式显示结果(图 4)。

表 9 2000—2020 年土地利用碳排放量 单位:万 t

年份	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地	碳吸收总量	碳排放总量	净碳排放量
2000	6.49	-1.59	-4.14	-0.02	-0.05	677.61	5.80	684.10	678.30
2010	5.80	-1.65	-4.13	-0.02	-0.06	1495.48	5.85	1501.28	1495.43
2020	5.86	-3.33	-3.10	-0.08	-0.07	2018.13	6.58	2023.99	2017.41

由图 4 可知,2000—2020 年乌鲁木齐地区不同区域碳排放量在空间上均呈“由南向北递增”的趋势,在 2000 年研究区碳排放最高的是新市区,碳排放量达到 315.77 万 t,最低的是达坂城区,碳排放量为 12.14 万 t;在 2010 年最高的是新市区,碳排放量达到 359.36 万 t,最低的是达坂城区,碳排放量为 24.90 万 t;在 2020 年最高的区是米东区,碳排放量达到 524.32 万 t,最低的是达坂城区,碳排放量为 65.04 万 t。表明在研究区碳排放空间分布中,北部的新市区与米东区成为研究区碳排放量相对较高的 2 个区,南部的达坂城区与乌鲁木齐县始终是碳排放量较低的 2 个

区。这是由于研究区北部的新市区是乌鲁木齐近 20 年来城市化建设最快、投资量大、GDP 最高的区域,主要是以企业为主。

米东区是属于矿产资源比较丰富,主要是以工业为主,并且从图 3 可以看出,米东区大部分草地退化等,导致的碳排放量居高。研究区南部的乌鲁木齐县与达坂城区均是地势相对较高的区,主要是以旅游业与新能源企业为主,“南山旅游风景区”是位于乌鲁木齐县,达坂城区是我国以风力发电所闻名的地区,该区一年四季风力较强,不适于城市化建设,以新能源为主,故碳排放量较低。

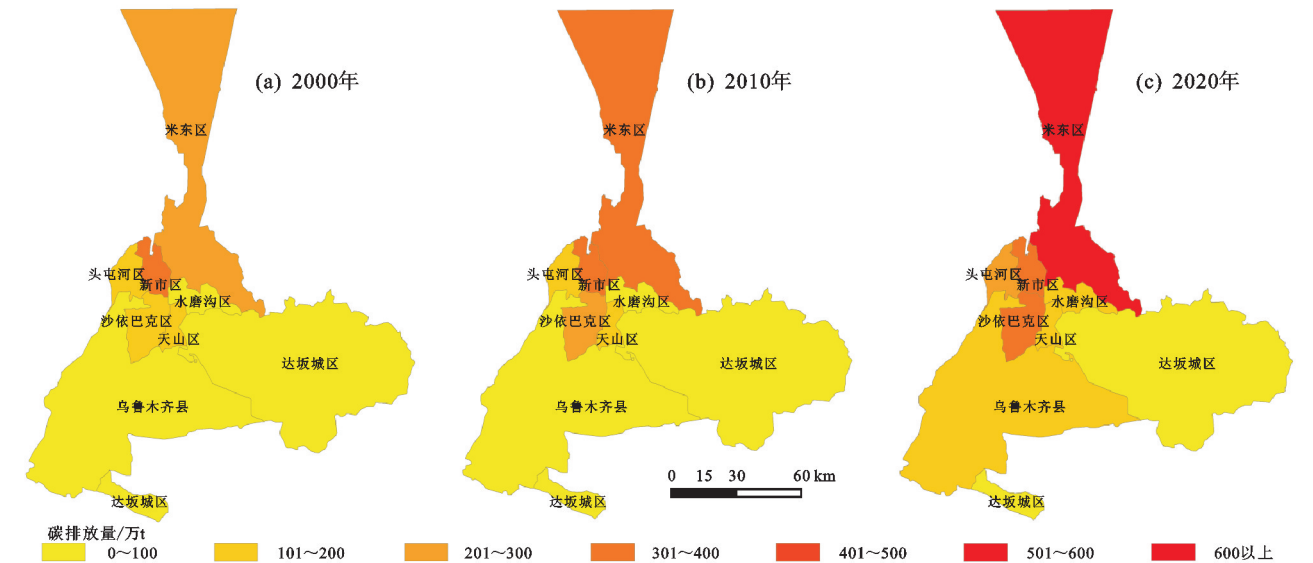


图 4 2000—2020 年乌鲁木齐地区碳排放量空间分布

3.3 未来碳排放的预测

3.3.1 2030 年不同情景下土地利用的预测 基于 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数据,采用 FLUS 模型预测 2030 年的土地利用类型,分别得到 2030 年自然演变、耕地保护、生态环境 3 种不同情景的土地利用预测结果(图 5)。首先基于 2000 年和 2010 年,采用 FLUS 模型中的马尔科夫链得到 2020 年预测的不同地类元胞总数量,以 2010 年为基期,驱动力因子均选取 2010 年的数据,通过 FLUS 模型人

工神经网络算法模块计算不同地类的适宜性概率分布,最后通过 FLUS 模型的自适应惯性机制的元胞自动机模块,预测 2020 年的土地利用类型,并与 2020 年实际的土地利用类型进行比较,得到 Kappa 系数达到 0.81(当 Kappa 系数越接近 1 表明精度越高,当 Kappa 系数高于 0.8 表明模型的精度在统计学上达到满意的状态),表明模型精度达标,方法可行。再通过同样的方法,基于 2010 年和 2020 年,采用 FLUS 模型中的马尔科夫链模块得到 2030 年不同地

类的元胞数,以 2020 年为基期,驱动力因子均选取 2020 年的数据,通过 FLUS 模型人工神经网络算法模块计算不同地类的适宜性概率分布,最后通过 FLUS 模型的自适应惯性机制的元胞自动机模块,根据不同的情景设定的领域权重、成本转换矩阵等参数赋值,得到 3 种不同情景的土地利用类型结果。

在自然演变情景预测的结果中,不同地类面积大小排序为草地>未利用地>耕地>建设用地>林地>水域,相比 2020 年唯独草地面积有所减少,减少 3.14%,其余地类面积均呈增加,其中建设用地增加量最大,增加 19.64%,说明如果按历年自然的土地利用变化规律演变,虽然能保证城市化建设速度的提高,但会导致草地面积有所减少,又因为草地是属于碳吸收的地类,故间接地影响研究区的碳吸收量,导致生态环境问题。在耕地保护情景预测的结果中,不同地类面积大小排序为草地>未利用地>耕地>建设用地>林地>水域,相比 2020 年草地与未利用地面积减小,其中草地减少 4.09%,未利用地减少

0.31%,耕地、林地、水域、建设用地面积呈增加,其中增加最大的为耕地,面积增加 13.3%,表明若按耕地保护情景演变,耕地面积明显得到增加,可以达到耕地保护的目标,与此同时,由于草地面积有所减少,同样影响研究区的碳吸收量,导致生态环境问题。在生态环境情景预测的结果中,不同地类面积大小排序为草地>未利用地>建设用地>林地>耕地>水域,与 2020 年相比耕地与未利用地面积呈减少,耕地面积减少 55.16%,未利用地面积减少 42.65%,草地、林地、水域、建设用地面积呈增加,草地面积增加 13.74%,林地面积增加 65.99%,水域面积增加 53.10%,建设用地面积增加 32.1%。若按生态环境情景演变,根据耕地与未利用地面积减少,草地、林地面积增加的结果,不仅能达到退耕还林、退耕还草的目标,同时也减少我国西北干旱地区未利用地(裸地、荒地等)的面积,水域与建设用地面积的增加,不仅缓解研究区水资源匮乏的问题,同时也提高城市化建设的速度,总体来说对研究区生态环境起到恢复的作用。

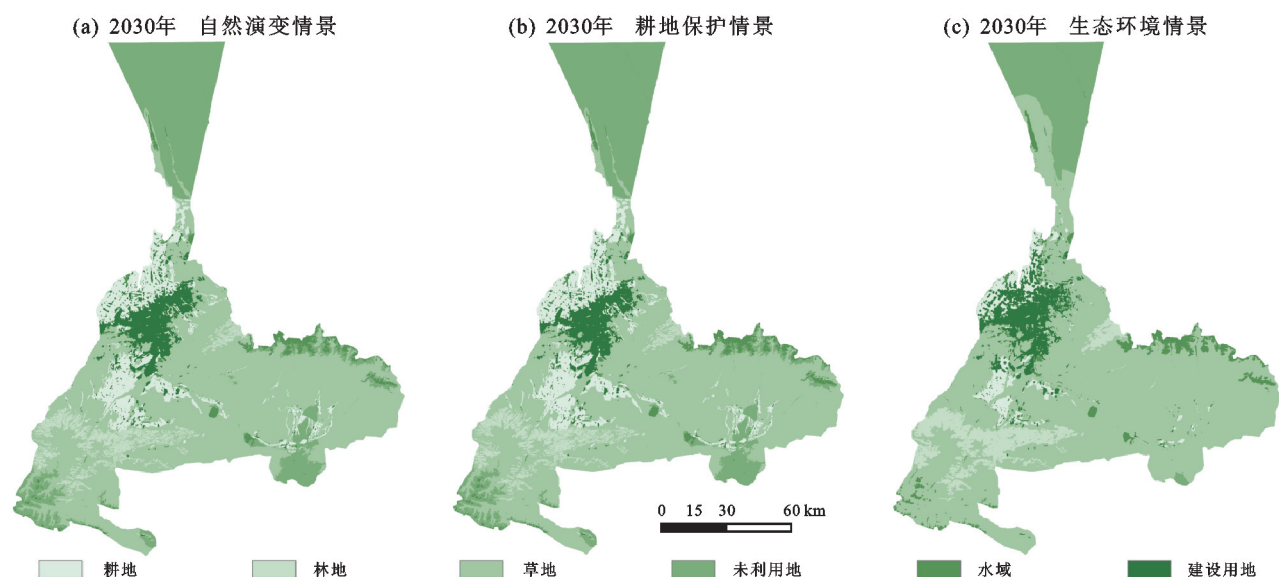


图 5 乌鲁木齐地区 2030 年不同情景土地利用类型

3.3.2 2030 年能源消耗的预测 通过对乌鲁木齐地区 2000—2020 年 8 种不同的能源消耗进行统计,采用灰色预测模型对未来 2030 年的能源消耗进行预测(表 10)。首先在建立灰色预测模型前,对时间序列进行级比检验,若通过级比检验,则说明该序列适合构建灰色模型,若不通过级比检验,则对序列进行“平移转换”,从而使得新序列满足级比值检验。此步骤目的在于数据序列是否有着适合的规律性,是否可得到满意的模型等,该步骤仅为初步检验,意义相对较小。本文所有年份中不同能源消耗数据级比值为 $e^{-(2/(n+1))} \sim e^{(2/(n+1))}$ (其中 e 为自然对数值; n 为分析的样本量),表明级比检验达标。在进行模型构建后,会得到后验差比 C 值,该值为残差方差/

数据方差;其用于衡量模型的拟合精度情况,一般后验差比值 C 值小于 0.35 则模型精度高, C 值小于 0.5 说明模型精度合格, C 值小于 0.65 说明模型精度基本合格,如果 C 值大于 0.65,则说明模型精度不合格。从表 9 可以看出,不同能源消耗所预测得到结果所对应的后验差比值均小于 0.35,表明该预测结果拟合精度较高,后验差比检验达标。进行模型构建后得到模型拟合值,以及最近 2 期(2025 年、2030 年)的预测值,最后进行模型残差检验,主要是查看原始值与预测值的相对误差值。相对误差值越小越好,一般情况下小于 20%,即说明拟合良好。从表 9 可以看出,唯独除了煤油的平均相对误差为 173.12%(由于煤油历年的数据不完全呈指数型,导致最后预测值与原始

值有所偏差),其余所有能源消耗预测的相对误差均小于 20%。除个别能源以外,大多数能源预测值与原始值的相对误差较小,总体来说,相对误差达标,预测值比较接近原始值,模型预测结果较可靠。

表 10 能源消耗预测

能源种类	能源消耗量/t							后验差	平均相对
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年	比值(C)	误差($\bar{\epsilon}$)/%
原煤	5556851	10470236	15693697	16763984	22519700	26562362	31499661	0.023	4.53
焦炭	580819	1886542	2085717	2233715	3048500	3304955	3760847	0.033	4.86
汽油	17864	11548	13245	13463	11343	12303	12264	0.133	6.19
原油	3464925	4452604	5352902	7479178	6343200	7903170	8796598	0.217	7.62
煤油	1978	20	384	54	158	174	183	0.029	173.12
柴油	27537	38037	43674	32698	24732	24571	21475	0.319	8.35
燃料油	369521	469711	140540	13258	13151	4201	1312	0.118	3.42
天然气	46283	102878	162539	216476	235211	301402	361652	0.028	6.07

3.3.3 2030 年碳排放计算 通过碳排放计算模型计算 2030 年不同土地利用碳排放(表 11),自然演变情景中净碳排放量达到 2 773.06 万 t,耕地保护情景中净碳排放量达到 2 773.67 万 t,生态环境情景中净碳排放量达到 2 767.15 万 t。由于建设用地是净碳排放主要的来源,并且不同情景中能源消耗是相同的,3 种情景中建设用地碳排放量均为 2 773.73 万 t,导致不同情景净碳排放量差异不大。耕地碳排放量在耕地保护情景中碳排放量达到最大为 6.65 万 t,在生态环境情景中碳排放量达到最小为 2.63 万 t,表明耕地保护政策可以有效的控制耕地的面积得到保护,增加

耕地碳排放量;生态环境情景中退耕还草还林可以有效地减少耕地的碳排放。草地、林地、水域是主要的碳吸收来源,均在生态环境情景中碳吸收量达到最大,林地 为 5.53 万 t,草地 为 3.52 万 t,水域 为 0.11 万 t,表明生态环境情景中林地、草地与水域得到有效保护,使碳吸收量达到最大。未利用地是其次的碳吸收来源,吸收量极少,未利用地在生态环境情景中由于部分面积向草地与林地转出,碳吸收达到最小,为 0.04 万 t。表明在 2030 年达到碳达峰主要源于建设用地碳排放,对建设用地碳排放进行有效控制是 2060 年达到碳中和最有效的途径之一。

表 11 2030 年不同情景土地利用碳排放 单位:万 t

情景	耕地	林地	草地	未利用地	水域	建设用地	碳吸收总量	碳排放总量	净碳排放量
2030 年自然演变情景	6.08	-3.59	-3.00	-0.08	-0.08	2773.73	6.74	2779.81	2773.06
2030 年耕地保护情景	6.65	-3.57	-2.97	-0.08	-0.08	2773.73	6.70	2780.38	2773.67
2030 年生态环境情景	2.63	-5.53	-3.52	-0.04	-0.11	2773.73	9.21	2776.36	2767.15

通过对乌鲁木齐地区不同区域的碳排放进行计算并得到空间分布(图 6),在未来 2030 年的碳排放量中不同情景下研究区空间分布同样是“由南向北”均呈递增的趋势,3 种情景中,米东区碳排放均超过 700 万 t,属于碳排放量最大的区,自然演变情景达到 775.37 万 t,耕地保护情景达到 764.11 万 t,生态环境情景达到 754.96 万 t。达坂城区碳排放均低于 100 万 t,属于碳排放最少的区,自然演变情景达到 77.83 万 t,耕地保护情景达到 81.10 万 t,生态环境情景达到 72.82 万 t。表明研究区中米东区属于碳排放最大的区域,由于米东区属于乌鲁木齐地区主要的工业区,对米东区碳排放进行有效的控制会对整个乌鲁木齐地区碳排放起到一定碳减排的作用。

3.4 2000—2030 年碳排放时空演变特征

分别对 2000—2030 年碳排放量与碳吸收量统计得到随时间而变化的结果(图 7)。从图 7 可以看出,

2000—2030 年自然演变情景的碳排放与碳吸收量用同一颜色表示,到 2030 年有不同颜色代表不同情景的碳排放与碳吸收变化。碳排放量从 2000—2030 年一直是呈递增的趋势,到 2030 年不同情景的碳排放量差异很小,这表明研究区总碳排放主要来源于建设用地碳排放,不同情景下其他地类对总碳排放的影响很小。若单独对碳吸收总量进行分析,碳吸收量从 2000—2030 年呈递增的趋势,相比碳排放趋势比较缓慢,到 2030 年可以看出,自然演变情景与耕地保护情景总碳吸收量几乎相等,生态环境情景碳吸收量有明显的提高,表明生态环境情景对总碳吸收量的增加有显著的作用。

为了更显著地从空间上反映研究区碳排放的变化,对 2030 年不同情景的碳排放与 2000 年的碳排放进行差值计算,再对其结果进行重分类(差值>0 为增加,差值<0 为减少,差值=0 为不变),得到每个栅

格的变化趋势(图 8)。从碳排放空间变化来看,研究区大部分区域呈不变的趋势,变化的区域具有大聚集和零星分布的特点。碳排放呈增加的区域主要聚集于研究区北部的米东区以及研究区中心区(新市区、沙依巴克区、头屯河区、天山区)交接的建设用地部分,碳排放呈减少的区域主要零星分布于研究区南部的乌鲁木齐县、达坂城区,还有少部分在研究区中部的水磨沟区。碳排放呈不变的区域在自然演变情景中达到最大,占整个研究区面积的 70.3%,表明在自然演变情景中,大部分地区碳排放变化趋于稳定。碳排放呈增加的区域在耕地保护情景中达到最大,占

研究区面积的 25.4%,表明在耕地保护情景中,由于耕地面积得到保护,并且是碳排放来源之一,同时保持城市化建设导致其他地类(草地、林地、未利用地)转出,导致更多的区域碳排放呈增加。碳排放呈减少的区域在生态环境情景达到最大,占研究区面积的 13.3%,表明在生态环境情景中,根据退耕还草还林的方案,耕地面积主要是向林地与草地转化,并且草地、林地面积得到保护的情况下,更多的地类向草地与林地转入,草地与林地作为主要的碳吸收地类,可将更多的区域转变为碳吸收地类,故生态环境情景可将碳吸收达到最大化。

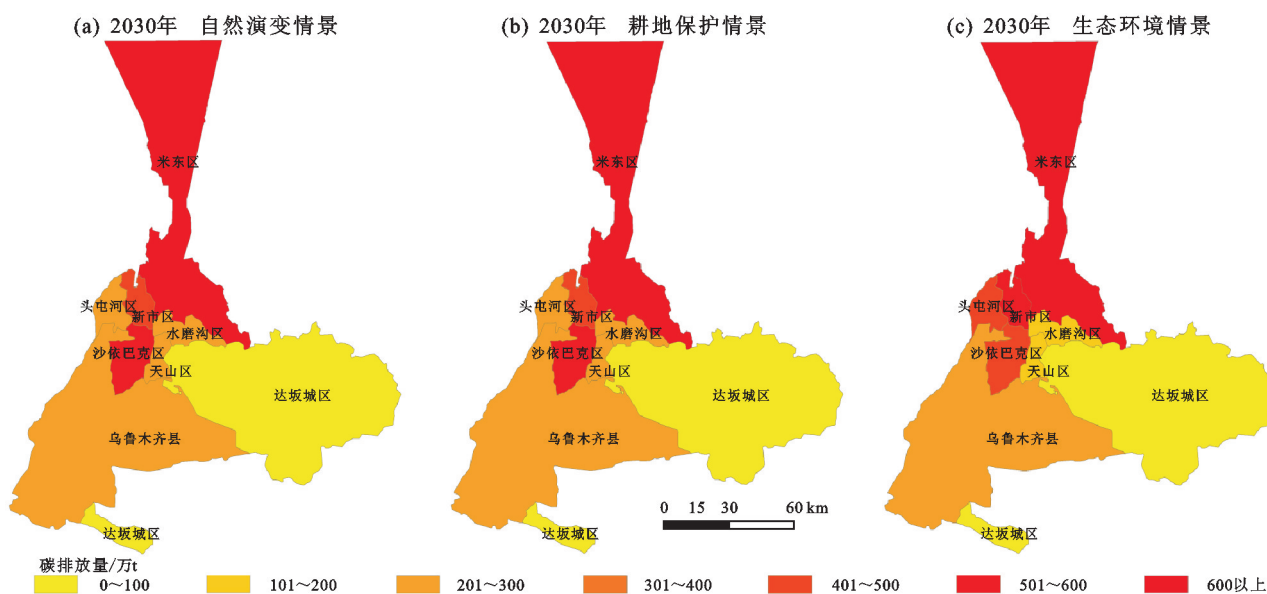


图 6 2030 年乌鲁木齐地区不同情景碳排放量空间分布

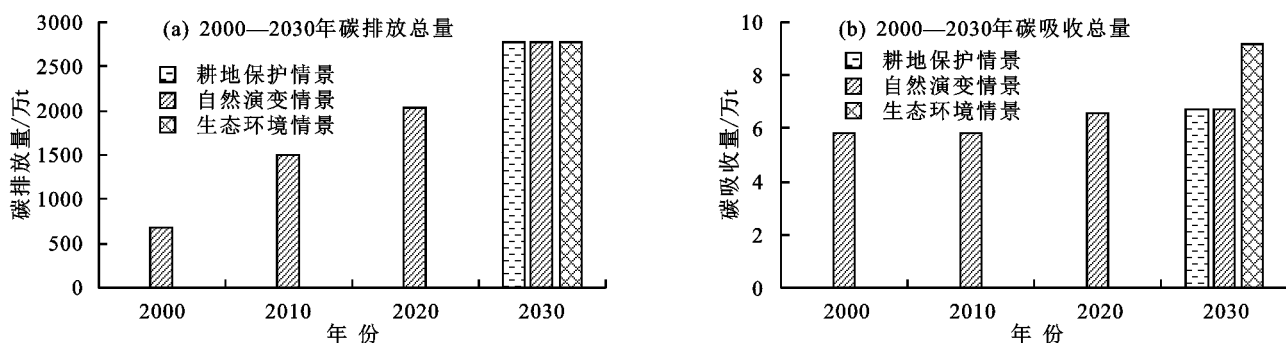


图 7 2000—2030 年乌鲁木齐地区碳排放/吸收时间变化

4 讨论

4.1 土地利用碳排放

本文采用 FLUS 模型对未来不同情景的土地利用变化进行预测,弥补了以往碳排放系数法应用于土地利用碳排放研究中^[2-13],未能在过去的时间轴上结合未来的土地利用碳排放并进行时空模拟的缺陷。根据结果分析可以得出,在过去与未来的土地利用碳排放结果中,建设用地碳排放占总净碳排放的主要比值,这也验证了在以往的研究中,建设用地起决定性作用的特点。此外,由于建设用地碳排放主要源

于人类活动的能源消耗,故采用灰色预测对未来能源消耗进行预测,并计算未来建设用地碳排放量,对近几年根据建设用地面积与碳密度系数进行碳储量^[15-19]计算,从而探讨未来建设用地碳排放变化趋势的研究提供参考。耕地作为第 2 个碳源,同时也是粮食生产的“红线”。乌鲁木齐地区近些年实施有关耕地保护政策的同时,由于乌鲁木齐市三面环山,部分地区坡度较高,不适于耕地生产,也采取了退耕还草、还林的举措。根据本文生态环境情景,适当地采取退耕还草还林对生态恢复起到一定的作用。水域与未利用地虽作为碳汇地类,碳吸收量极少。不考虑

水域与未利用地碳吸收的情况下,林地与草地作为主要的碳吸收来源,总碳吸收量与总碳排放量相比,距实现“碳中和”目标还是有很大的差距。在做到保

护林地与草地等碳吸收地类的同时,控制与减少化石能源的消耗,对乌鲁木齐地区碳减排与生态恢复起到一定积极的作用。

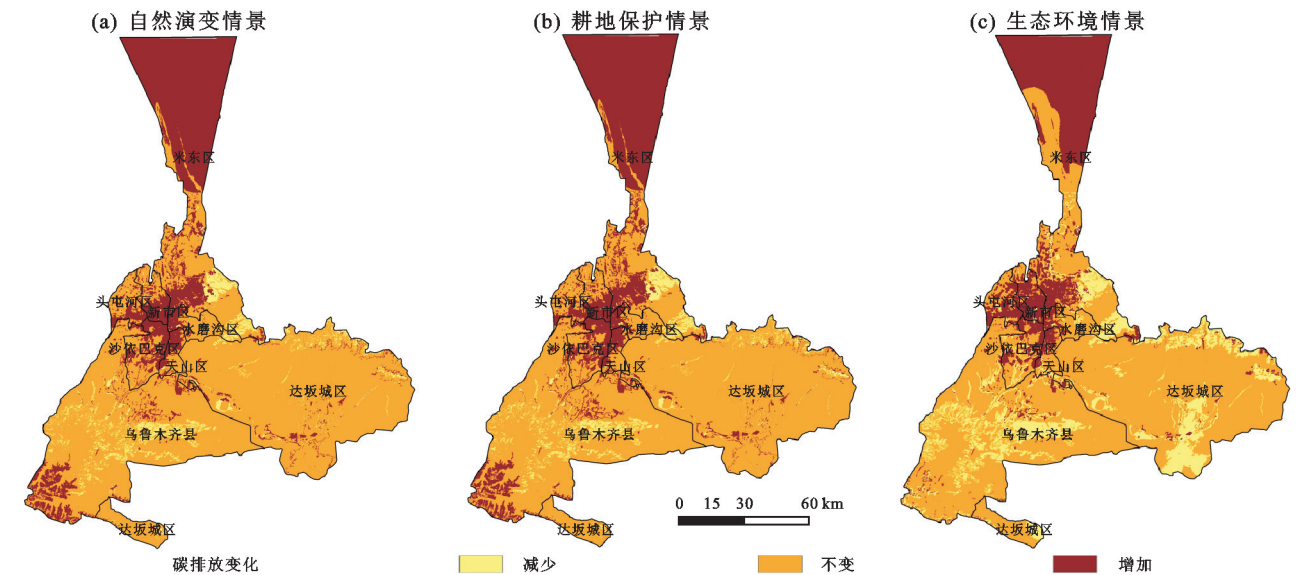


图 8 2000—2030 年乌鲁木齐地区碳排放空间变化分布

4.2 碳排放时空演变

本文计算得出总净碳排放量随时间的变化呈递增的趋势,与乌鲁木齐地区已有的碳排放研究^[9-12]结果基本一致。在 2000—2030 年,乌鲁木齐在空间分布均呈“由南向北递增”的特点。碳排最高的区由北部的新市区转变为米东区。由于过往米东区是独立的市级行政区,不属于乌鲁木齐管辖范围,新市区是当时乌鲁木齐的主要工业区。后来米泉市撤市与乌鲁木齐合为一体,米东区转变为乌鲁木齐主要的工业区,导致在 2020 年研究区北部的草地大部分退化,生态环境遭受破坏。除此以外,本研究发现,在过去到未来碳排放空间变化中,研究区中部的建设用地与北部米东区是主要的碳排放呈增加的区域。除了对能源消耗进行全局的控制与减少以外,应局部地对米东区工业园进行碳减排约束。乌鲁木齐作为新疆维吾尔自治区首府,城市化建设的基础上,保护耕地不受变化会导致碳排放量达到最大,一定程度的退耕还草还林可使生态环境得到恢复,并有效缓解碳排放带来的压力。

4.3 研究不足

本文基于 2000 年、2010 年、2020 年 3 期土地利用数据,以每 10 年间的土地利用转换规则与变化趋势为依据,对未来 2030 年的土地利用类型进行预测,未能考虑到研究区阶段性的经济社会发展对预测结果的影响,这将导致预测结果与实际有所偏差。此外,在对未来建设用地碳排放进行预测时,由于不能保证一些新能源数据在研究时间段内的可获取性,只

考虑 8 种能源消耗,并且也未能涉及到碳减排等政策规制的约束性,这将影响未来建设用地碳排放量预测结果的准确性。

5 结论

(1)乌鲁木齐地区 2000—2020 土地利用变化中,林地、未利用地、水域、建设用地为正增长,耕地与草地为负增长。其中动态变化率最大的是未利用地,为 15.5%;动态变化率最小的是耕地,为 -0.45%。面积转移矩阵中,草地与耕地主要是向未利用地与建设用地转出,表明城市化建设的同时研究区生态环境也遭受到了破坏,水域与林地面积变化相对比较稳定。

(2)通过碳排放计算模型计算 2000—2020 年研究区碳排放量,得到 2000—2020 年净碳排放量呈增长的趋势,建设用地与耕地是碳源,其中建设用地碳排放量与总净碳排放量趋势基本一致,并且对研究区总净碳排放量起决定性作用。林地与草地是主要的碳汇,林地碳吸收量呈增加的趋势,草地由于大量面积转出导致碳吸收量呈递减。从空间分布来看,碳排放量呈“由南向北递增”的趋势,由于北部新市区与米东区是企业与工业聚集区,碳排放量相对较高。南部乌鲁木齐县与达坂城区由于地势较高,主要是以旅游业与新能源为主,碳排放量相对较低。

(3)通过 FLUS 模型与灰色预测模型相结合预测 2030 年 3 种不同情景的土地利用碳排放,不同情景碳排放总量中,建设用地碳排放量占决定性比值。由于耕地作为碳源并且得到保护,导致耕地保护情景碳排放总量最高,为 2773.67 万 t。生态环境情景中

林地与草地得到恢复导致生态环境情景总碳排放量相对最低,为 2767.15 万 t。

(4)对乌鲁木齐地区 2000—2030 年碳排放量变化从时空的角度去分析,随时间的变化碳排放总量呈递增的趋势,不同情景碳排放总量相差很小,碳吸收总量在生态环境情景有明显的提高。在空间分布中,大部分区域趋于稳定,碳排放变化的区域呈大聚集与零星分布的特点。碳排放增加的区域主要分布于研究区中心区域与北部米东区,在耕地保护情景中面积达到最大,占研究区 25.4%。碳排放减少的区域主要分布于研究区南部的乌鲁木齐县和达坂城区,并且在生态环境情景中面积达到最大,占研究区的 13.3%。

参考文献:

- [1] Houghton R A. The annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use 1850—1990[J]. *Tellus B: ChemiCal and Physical Meteorology*, 1999, 51(2): 298-313.
- [2] 刘学荣,杨琳,王颖,等.基于土地利用变化的东北地区碳排放效应研究[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(2): 107-114.
- [3] 刘锋,杨木壮,赵冠伟,等.基于土地利用变化的广州市碳排放效应分析:以近 20 年为例[J]. *农业与技术*, 2022, 42(4): 73-79.
- [4] 韩鹏鹏,陈劲松,韩宇.基于遥感的区域土地利用变化碳排放效应研究[C]//《环境工程》2018 年全国学术年会论文集(下册). 深圳:中国科学院深圳先进技术研究院, 2018: 887-892.
- [5] 文枫,鲁春阳.重庆市土地利用碳排放效应时空格局分异[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 257-262, 268.
- [6] 郑永超,文琦.宁夏自治区土地利用变化及碳排放效应[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(1): 207-212.
- [7] 李彦旻,沈育生,王世航.基于土地利用变化的安徽省陆地碳排放时空特征及效应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 182-188.
- [8] 马远,刘真真.黄河流域土地利用碳排放的时空演变及影响因素研究[J]. *生态经济*, 2021, 37(7): 35-43.
- [9] 孟梅,崔雪莹,王志强.乌鲁木齐市土地利用结构与碳排放的关联测度研究[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(2): 178-182, 188.
- [10] 张余,姜博,赵映慧,等.东北地区城市土地利用碳排放效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(7): 209-217.
- [11] 韩璇,宋宇加.基于净生态系统生产力模型的山西省不同土地利用类型碳足迹分析[J]. *江西农业学报*, 2022, 34(3): 214-220.
- [12] 阿依吐尔逊·沙木西,艾力西尔·亚力坤,刘晓曼,等.乌鲁木齐土地利用碳排放强度时空演变研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(2): 139-146.
- [13] 路昌,雷国平,张慧,等.黑龙江省哈尔滨市不同土地利用类型的碳排放效应分析[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 245-250.
- [14] 赵莉,杨俊,李闯,等.地理元胞自动机模型研究进展[J]. *地理科学*, 2016, 36(8): 1190-1196.
- [15] 史名杰,武红旗,贾宏涛,等.基于 MCE-CA-Markov 和 InVEST 模型的伊犁谷地碳储量时空演变及预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(6): 1010-1019.
- [16] 杨洁,谢保鹏,张德罡.基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, 29(6): 1018-1029.
- [17] 韩敏,徐长春,隆云霞,等.西北干旱区不同土地利用情景下的碳储量及碳源/汇变化模拟与预估[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 335-344.
- [18] Liang Y J, Hashimoto S, Liu L J. Integrated assessment of land-use/land-cover dynamics on carbon storage services in the Loess Plateau of China from 1995 to 2050[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 120: e106939.
- [19] 邵壮,陈然,赵晶,等.基于 FLUS 与 InVEST 模型的北京市生态系统碳储量时空演变与预测[J]. *生态学报*, 2022, 42(23): 9456-9469.
- [20] 李立,胡睿柯,李素红.基于改进 FLUS 模型的北京市低碳土地利用情景模拟[J]. *自然资源遥感*, 2021, 35(1): 81-89.
- [21] 乌鲁木齐市统计局.乌鲁木齐统计年鉴(2000—2020)[M]. 北京:中国统计出版社, 2000—2020.
- [22] 丛佃敏,赵书河,于涛,等.综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定:以天水市规划区(2015—2030 年)为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(1): 14-26.
- [23] 王旭,马伯文,李丹,等.基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- [24] 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[J]. *生态学报*, 2022, 42(13): 5226-5242.
- [25] 和海秀,周洪华,白如霄.基于土地利用变化的新疆塔城地区碳排放特征分析[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 373-380.
- [26] 樊高原,杨俊孝.土地利用结构、经济发展与土地碳排放影响效应研究—以乌鲁木齐市为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(10): 177-184.
- [27] 唐洪松,马惠兰,苏洋,等.新疆不同土地利用类型的碳排放与碳吸收[J]. *干旱区研究*, 2016, 33(3): 486-492.
- [28] 国家统计局统计司.中国能源统计年鉴(2020)[M]. 北京:中国统计出版社, 2020.
- [29] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: IGES, 2006.