

灰色系统理论预测畜禽粪便生物能源潜力

张璐怡¹, 杨鑫², 田永兰^{3*}

¹上海威派格智慧水务股份有限公司, 上海

²三峡新能源绥德发电有限公司, 陕西 榆林

³华北电力大学工程生态学与非线性科学研究中心, 北京

收稿日期: 2023年5月2日; 录用日期: 2023年6月1日; 发布日期: 2023年6月9日

摘要

灰色理论因其算法简单、运算速度快、短期预测效果好等优点被广泛应用于能源预测等多个领域, 数据的时空尺度对于预测精度有重要的影响。本研究利用灰色GM(1,1)、灰色GM(1,5)、灰色线性回归组合及其加权灰色模型对全国和京津冀地区的畜禽粪便可收集量折标煤量进行模拟和预测, 分析6年、9年、12年和15年四种时间尺度下的模拟精度, 预测未来五年的能源潜力, 并分析预测合理性及灰色模型的适用性。结果发现, 1) 能源潜力预测的最优模型和时间尺度依赖于生物质的种类和空间尺度; 2) 全国和京津冀畜禽粪便可收集折标煤量模拟和预测效果最好的分别是12年时间尺度下的灰色GM(1,5)模型和9年时间尺度下灰色线性回归组合模型, 平均误差为1.51%和1.52%; 3) 预测2021~2025年的生物质能源潜力, 全国畜禽粪便可收集折标煤量呈缓慢下降趋势, 而京津冀地区呈现先下降后增加的趋势。研究结果可为全国和京津冀地区的畜禽粪便生物质资源的开发提供理论指导。

关键词

灰色系统理论, 关联度分析, 时空尺度, 畜禽粪便, 折标煤量

Prediction of Bioenergy Potential of Livestock and Poultry Manure by Grey System Theory

Luyi Zhang¹, Xin Yang², Yonglan Tian^{3*}

¹WPG (Shanghai) Smart Water Public Co. Ltd., Shanghai

²Three Gorges New Energy Suide Power Generation Co. Ltd., Yulin Shaanxi

³Research Center for Engineering Ecology and Nonlinear Science, North China Electric Power University, Beijing

Received: May 2nd, 2023; accepted: Jun. 1st, 2023; published: Jun. 9th, 2023

*通讯作者。

Abstract

Grey theory has been widely used in many aspects including energy prediction due to its advantages of simple algorithm, fast operation speed and good short-term prediction effect. The spatial and temporal scale of the data is very important for the prediction accuracy of grey models. This research fits and predicts the collecting standard coal quantity of livestock feces in whole China and Beijing-Tianjin-Hebei region. The models used in this research include grey GM(1,1), gray GM(1,5), combination of gray linear regression and weighted grey linear regression model. The durations of data are set as 6 years, 9 years, 12 years and 15 years. Furthermore, the bioenergy potential in the next 5 years is predicted. The rationality of prediction and applicability of different grey models are analyzed. The main results are as follows: 1) The optimal model and time scale of energy potential prediction depend on the types and spatial scale of biomass. The gray GM(1,5) model with an average error of 1.51% is the best model to simulate and predict the collecting standard coal quantity of livestock feces in China; 2) The optimal model for simulating and predicting the collecting standard coal quantity of livestock feces in Beijing-Tianjin-Hebei region is gray linear regression combined model on a 9-year time scale, with an average error of 1.52%; 3) The bioenergy potential from 2021 to 2025 is predicted. The collecting standard coal quantity of livestock feces in China will decrease slowly, while that in Beijing-Tianjin-Hebei region will decrease first and increase later. The results of this research are expected to provide theoretical guidance for reutilization of livestock feces in China and Beijing-Tianjin-Hebei region.

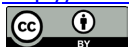
Keywords

Grey System Theory, Correlation Degree Analysis, Spatial and Temporal Scale, Livestock Feces, Standard Coal Quantity

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

能源是人类社会生存、国民经济发展的必备资源和重要战略物资。根据《中国能源发展前沿报告(2021):“十三五”回顾与“十四五”展望》[1]和《中国能源统计年鉴 2020》,我国能源年消耗量占世界能总消耗量的 20%以上,而且呈现上升的态势,能源需求压力上升。与此同时,我国农作物秸秆、禽畜粪便、生活垃圾等生物质废弃物资源十分丰富,但开发利用不足。对未来生物质废弃物产量及能源潜力预测关系到工程建设选址和政策制定等方面,是生物质能源综合利用的前提条件。因此,准确合理的预测生物质产量和能源潜力,对于生物质能源开发利用具有重要意义。

目前对生物质开发利用潜力的研究主要集中在资源总量测算与能效评价两个方面。一些学者从宏观层面对某种生物质废弃物进行定量分析,但涉及生物质废物种类不全面,缺乏区域层面,而其它方面的研究多以定性分析为主。灰色系统理论以“部分信息已知,部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为和演化规律的正确把握和描述。该理论具有所需因素少,模型简单等优势,因此自诞生以来,发展速度快,研究应用广泛。尤其是对于运行机制并不十分明确,许多因素空间又难以穷尽,而且缺乏

建立一个确定关系的信息系统时,灰色系统这一理论为解决相关问题提供了新的尝试和新的方法。生物质废弃物的可收集量与农作物品种、收获方式、播种面积、环境因素等有密切的关系,是多种因素综合作用的结果,生物质废弃物产量也具有某种灰色性,可看成是既有一定已知信息又含有未知信息的灰色系统。因此,有一些研究将灰色系统理论应用到生物质废弃物产量的预测中。吴晓红等[2]通过对2001~2013年杭州市城市生活垃圾现状的分析,得出杭州市城市生活垃圾数量逐年增长的结论,平均年增长率为9.52%,且在2004、2006、2007、2008、2010年增长速度较快,均超过10个百分点,在此基础上建立灰色预测GM(1,1)模型,对未来20年的城市生活垃圾产量进行预测。然而,GM(1,1)模型本身仅从数据序列本身去寻找数据变化规律,并没有考虑其他相关影响因素对可收集量的影响,因此相对误差略高,精度较低,需要对模型进行改进或者组合模型的方法以提高模拟精度。

基于灰色关联度分析的GM(1,N)模型可有效提高预测精度。韩建忠等[3]用灰色关联分析研究了民乐县禽畜养殖数量主要影响因素,并预测了未来养殖数量和畜禽养殖粪便排放量。马云倩等[4]采用LASSO-GM(1,N)组合模型对2020年中国粮食产量进行预测,运用LASSO模型筛选出对粮食产量产生显著影响的因素:有效灌溉面积、化肥施用量、农村用电量、农业机械总动力、粮食作物播种面积以及谷物单位面积产量,将这6个因素作为输入因子构建粮食产量预测模型GM(1,6)。苏海军等[5]针对GM(1,N)模型在模拟与预测方面的不足,提出了GM(1,N)模型的一种优化组合方式。Ye等[6]根据关联分析结果,提出了多变量的GM(1,N)来预测间隔灰度序列,为了验证这部小型模型的有效性,建立了对中国长江三角洲的交通拥堵程度与其相关因素之间的关系,并预测未来五年在该地区城市交通拥堵程度的发展。Xiao等[7]建立了一种改进的GM(1,N)模型的页岩气井生产率预测,重点是从现有的传统GM(1,N)方法的预测误差的原因出发,通过处理与预测数据相关的数据序列,改进的GM(1,N)模型考虑了原始生产数据的波动,反映了相关因子的影响下原始数据的趋势,因此更准确地预测原始数据的波动幅度和方向。

构建灰色组合模型也是提高预测精度的有效途径。灰色组合模型是将灰色系统模型(主要是GM(1,1)模型)或灰信息处理技术融入传统模型后得到的有机组合体。GM模型具有弱化序列随机性,挖掘系统演化规律的独特功效,它对一般模型具有较强的融合力和渗透力。将GM模型融入一般模型建模的全过程,实现功能互补,能够使预测精度大大提高。崔胜先等[8]用灰色关联分析方法分析黑龙江省农作物秸秆可收集量的影响因素,计算各因素关联度大小,比较了GM(1,1)模型预测和基于GM(1,1)的多元回归模型两种预测方法的模型模拟精度,并预测了2010~2015年黑龙江省农作物秸秆可收集量。王涛等[9]在SAS环境下,运用灰色系统理论对陕西省农作物秸秆可收集量进行预测,以草谷比和可收集系数估算2005~2015年陕西省农作物秸秆可收集量,以农村就业人口、农作物播种面积、农用化肥施用量和农业机械总动力作为影响农作物秸秆可收集量的4个主要因素进行灰色关联度分析,在SAS环境下利用GM(1,1)灰色模型和基于GM(1,1)的多元回归模型对2016~2020年的陕西农作物秸秆可收集量进行预测,并对模型精度与误差进行分析比较。Hu [10]采用最常用的灰色预测模型GM(1,1)模型来预测对镁材料的需求,为了提高GM(1,1)模型的预测精度,利用神经网络对其残差修正。研究发现,灰色Verhulst模型在预测农作物秸秆的折标煤量时预测效果优于GM(1,1)等单独的灰色理论模型,且10年时间尺度下的预测精度要明显高于7年、12年和15年,全国地区的预测精度为99.69%和99.72%,高于京津冀和河北省地区的预测精度[11]。

此外,还可以通过对灰色理论模型进行改进以适应不同的预测需求。李夏培[12]以北京市农产品物流需求为研究对象,采用灰色GM(1,1)模型为基本方法,使用Matlab软件,借助蚁群算法求出了单个模型的权数,构建出灰色线性回归组合模型,对“十三五”时期北京市农产品的物流需求进行预测。卢阳[13]针对新时期下金融产品推出周期短,可建模数据少的特性,构建了一种少数据建模的灰色线性回归组合

金融预测模型针对传统 GM 模型中忽略了数据的线性变化规律,对传统的 GM 模型进行改进,加入线性部分,构建了灰色线性组合金融预测模型,并给出了灰色线性组合金融预测模型的参数识别算法。Zeng 等[14]利用自适应智能灰色模型预测我国天然气需求,分别采用所提出的新模型、离散灰色模型、甚至差分灰色模型和经典灰色模型,模拟 2002~2010 年中国天然气需求和 2011~2014 年的预测需求。Men 等[15]根据江苏省 2007 年的最新统计数据,通过筛选,建立了具有对数新开发系数的优化灰色模型,对 2008~2012 年江苏省农村社会总产值进行了实证分析和预测研究。Huang 等[16]构建了具有优化背景值系数的多元区间灰度分数累积内涵预测模型,将区间灰度数时间序列转换为核序列和半径序列,最后将该模型应用于我国的清洁能源预测。Wu 等[17]利用一种新颖的分数阶灰色模型 FAGMO(1,1,k)对中国的核能消费进行了探讨,引入分数累积生成矩阵,利用该模型对中国的核能消费进行了预测。

上述研究表明,灰色理论模型应用到生物质废弃物的能源潜力预测中具有较大的潜力,将灰色模型与关联度分析、其它模型联系构建组合模型可以有效的提高预测精度。然而,目前的研究大部分局限于单一层次,忽略了数据的时空尺度对灰色系统理论模型预测精度的影响,以及灰色系统理论在不同生物质废弃物产量预测中的适用性。本课题组前期研究发现,在不同空间尺度下,选择合适的时间尺度对提高灰色模型及其组合模型预测农作物秸秆折标煤量的精度时十分必要[11],由此推断在畜禽粪便折标煤量的预测中,同样需要研究时空尺度对不同模型预测精度的影响,以此获得更准确的预测结果。截止目前,尽管部分研究关注到了畜禽粪便折标煤量估算和预测的重要性[18][19],然而关于不同时空尺度对灰色系统理论预测畜禽粪便折标煤量的影响尚没有研究。尤其是近年来,随着我国畜牧业的大力发展和京津冀协同发展战略的实施,以精准预测为基础的畜禽粪便生物质能源潜力分析日趋重要。因此,本研究以全国和京津冀地区的禽畜粪便及其相关因素数据为基础,通过灰色关联分析确定影响禽畜粪便的主要影响因素,采用 GM(1,1)及其拓展形式进行模拟和预测,讨论在畜禽粪便生物能源潜力预测中灰色系统理论的适用性以及及时空尺度对预测精度的影响,以期指导畜禽粪便的资源化再利用。

2. 数据处理与模型方法

2.1. 数据来源

本研究所需要的基础数据主要来源于中国统计年鉴、中国畜牧兽医年鉴、中国环境年鉴和中国环境统计年鉴,北京统计年鉴、天津统计年鉴、和河北统计年鉴。所涉及的牲畜包括牛、羊、马、驴、骡、猪、家禽和兔。统计年鉴中的牲畜数量分为出栏数和存栏数两种,对于出栏数少且生长周期长的大牲畜,如牛、羊、马、驴和骡全部按年底存栏数计算,生长周期按 365 天计算,猪、家禽和兔按出栏数计算。牲畜粪便折标煤量可由牲畜饲养量、排泄系数、饲养周期、可收集系数和折标煤量系数计算得出[20][21][22]。计算禽畜产量可收集折标煤量的公式如下:

$$ES = \sum_{i=1}^n P_i \times m_i \times t_i \times \alpha_i \times \eta_i = \sum_{i=1}^n P_i \times M_i \times \alpha_i \times \eta_i \quad (1)$$

其中, ES 为可收集牲畜粪便折标煤量, P_i 为 i 类牲畜的数量, m_i 为 i 类牲畜的饲养周期, t_i 为 i 类牲畜每天的粪便排放量, M_i 为 i 类牲畜在饲养周期内的总粪便排放量, α_i 为 i 类牲畜粪便的可收集系数, η_i 为 i 类牲畜粪便的折标煤系数。计算所得的全国和京津冀地区农作物秸秆、禽畜粪便折标煤量见表 1。

灰色关联度分析所需要的数据包括全国和京津冀地区人口数、人均可支配收入、全国和京津冀地区农村劳动力、农作物播种面积、化肥施用量、灌溉面积、农业机械总动力和仔畜幼禽及产品畜生产资料价格指数(表 2)。

Table 1. Standard coal quantity of collectible livestock manure in China and the Beijing-Tianjin-Hebei region
表 1. 全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量

年份	禽畜粪便可收集量折标煤量(万吨)	
	全国	京津冀
2006	62922.9	5286.6
2007	60878.6	3294.5
2008	62888.9	3360.2
2009	64973.3	3356.7
2010	63849.7	3220.0
2011	62719.5	3220.8
2012	63887.7	3298.5
2013	64386.8	3303.3
2014	65527.5	3424.6
2015	64703.4	3368.1
2016	62827.2	3245.7
2017	63483.6	3166.1
2018	62728.9	3030.9
2019	57059.8	2679.8
2020	57622.3	2620.0

Table 2. Factors related to grey correlation analysis
表 2. 灰色关联分析涉及到的相关影响因素

数据类别	指标
农作物秸秆可收集量	化肥施用量
	灌溉面积
	农作物播种面积
	农业人口数
	农业机械总动力
禽畜粪便可收集量	秸秆可收集量
	仔猪幼禽及产品畜生产资料价格指数
	农业人口数
	机械总动力
	可支配收入

2.2. 灰色关联分析

针对秸秆可收集量、生产资料价格指数、农业人口数、机械总动力和可支配收入这 5 个因素 15 年数据进行灰色关联度分析，并且以禽畜粪便折标煤量作为母序列，研究 5 个相关因素与禽畜粪便折标煤量的关联度。经过计算，全国禽畜粪便可收集折标煤量关联度分析结果见表 3，其中禽畜粪便折标煤量与秸秆可收集量关联度最高，为 0.843；机械总动力关联度接近，为 0.828；农业人口数和生产资料价格指数的关联度分别为 0.784 和 0.680；关联度最低的是可支配收入，为 0.574。

Table 3. Correlation degree analysis of collectible standard coal quantity of livestock manure in China
表 3. 全国禽畜粪便可收集折标煤量关联度分析

年份	折标煤量	秸秆可收集量	生产资料价格指数	农业人口数	机械总动力	可支配收入
2006	62922.9	22498.8	88	58288	72522.1	7228
2007	60878.6	22810.5	144	60633	76589	8583
2008	62888.9	24201.1	131	62403	82190	9956
2009	64973.3	24194.7	82	64512	87496	10977
2010	63849.7	24826.6	100	66978	92780	12519
2011	62719.5	26203.3	137	69927	97734	14550
2012	63887.7	27282.1	104	72175	102559	16509
2013	64386.8	28043.9	100	74502	103906	18310
2014	65527.5	28392.4	97	76738	108506	20167
2015	64703.4	29154.2	108	79302	111728	21966
2016	62827.2	29029.3	126	81924	97245	23812
2017	63483.6	29188.4	94	84343	98783	25973
2018	62728.9	29145.8	89	86433	100371	28228
2019	57059.8	29470.0	145	88426	102758	30732
2020	57622.3	29739.8	156	90220	105622	32188
关联度		0.843	0.680	0.784	0.828	0.574

京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量关联度分析结果见表 4。其中，农业人口数与京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量的关联度最高，为 0.901；其次是秸秆可收集量和机械总动力，关联度分别为 0.864、0.836；关联度最低的是可支配收入，为 0.650。

Table 4. Correlation degree analysis of collectible standard coal quantity of livestock manure in Beijing-Tianjin-Hebei region

表 4. 京津冀禽畜粪便可收集折标煤量灰色关联度分析

年份	折标煤量	秸秆可收集量	生产资料价格指数	农业人口数	机械总动力	可支配收入
2006	5286.6	1532.6	83.0	4850.9	9724.7	10821.6
2007	3294.5	1611.3	140.0	4785.1	10039.9	12106.9
2008	3360.2	1657.6	135.0	4708.7	10389.0	13800.2
2009	3356.7	1629.8	89.0	4617.4	10727.9	15111.5
2010	3220.0	1637.4	105.0	4648.4	11015.1	16775.0
2011	3220.8	1741.6	153.0	4600.5	11198.3	18643.8
2012	3298.5	1746.9	110.0	4538.6	11363.0	20794.5
2013	3303.3	1773.3	102.0	4464.6	11548.3	22454.2
2014	3424.6	1756.7	95.0	4406.1	11691.1	24497.2
2015	3368.1	1744.0	104.0	4274.8	11835.6	27202.3
2016	3245.7	1769.9	133.0	4091.0	8016.4	29489.8
2017	3166.1	1892.1	101.0	3988.3	8178.7	32017.8
2018	3030.9	1822.3	89.0	3896.5	8179.8	34588.2
2019	2679.8	1844.9	137.0	3817.4	8313.4	37468.5
2020	2620.0	1860.5	142.0	3571.4	8454.3	38805.2
关联度		0.864	0.747	0.901	0.836	0.650

2.3. 灰色模型建模过程

本研究所用到的灰色模型及其组合模型建模方法参考已发表的专著和论文[11] [23] [24], 概括说明如下。

2.3.1. GM(1,1)模型

GM(1,1)模型仅利用系统行为数据序列建立预测模型, 属于较为简捷实用的单序列建模方法。在时间序列数据情形, 只涉及有规律的时间变量; 在横向序列数据情形, 只涉及有规律的对象序号变量, 而不涉及其他解释变量, 是应用相对简便同时又能够挖掘出有实际价值的发展变化信息的建模方法, 因而应用非常广泛[12]。GM(1,1)的建模过程同参考文献[11]。预测序列为:

$$\hat{X}^{(0)} = (\hat{x}^{(0)}(2), \hat{x}^{(0)}(3), \dots, \hat{x}^{(0)}(n)) \quad (5)$$

其中: $x^{(0)}(k) \geq 0, k=1,2,3,\dots,n$ 。

2.3.2. GM(1,N)模型

当系统中包含多个相关的变量, 可以利用考虑了折标煤量影响因素的多变量灰色预测模型 GM(1,N) 来建模分析。设系统有特征数据序列:

$$X_1^{(0)} = (X_1^{(0)}(1), X_1^{(0)}(2), \dots, X_1^{(0)}(n)) \quad (6)$$

相关因素序列:

$$X_2^{(0)} = (X_2^{(0)}(1), X_2^{(0)}(2), \dots, X_2^{(0)}(n)) \quad (7)$$

⋮

$$X_N^{(0)} = (X_N^{(0)}(1), X_N^{(0)}(2), \dots, X_N^{(0)}(n)) \quad (8)$$

令 $(i=1,2,\dots,N)$ 的 1-AGO 序列为 X_i^1 , 其中

$$X_i^1(k) = \sum_{k=1}^n X_i^0(k), i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

生成的紧邻均值序列:

$$Z_i^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(Z_i^{(1)}(k) + Z_i^{(1)}(k-1)) \quad (10)$$

其中: $k=2,3,\dots,n$ 。

根据灰色理论建立微分方程 GM(1,N):

$$x_1^{(0)}(k) + az_1^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^1(k), i=1,2,\dots,n \quad (11)$$

其中, $-a$ 称为发展系数, b_i 称为驱动系数, $b_i x_i^1$ 称为驱动项。

引入矩阵向量记号:

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} -Z^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \\ -Z^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_N^{(1)}(3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -Z^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \cdots & x_N^{(1)}(n) \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x_1^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

采用最小二乘法可求得 u :

$$u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (13)$$

解得还原值:

$$\hat{X}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k) \quad (14)$$

基于灰色关联度分析结果(表 3 和表 4), 本研究采用 GM(1,5)模型预测全国和京津冀地区的畜禽粪便可收集折标煤量。

2.3.3. 灰色线性回归组合模型

灰色线性回归组合模型可改善原线性回归模型中没有指数增长趋势和 GM 模型中没有线性因数的不足, 故该组合模型更适用于既有线性趋势又有指数增长趋势的序列[23] [24]。

由经典 GM(1,1)模型的原理可知,

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = \left[X^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] \exp(-at) + \frac{b}{a} \quad (15)$$

其形式可记为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = C_1 \exp(vt) + C_2 \quad (16)$$

用线性回归方程及指数方程的和来拟合累加生成序列:

$$\hat{X}^{(1)}(t) = C_1 \exp(vt) + C_2 t + C_3 \quad (17)$$

其中, 参数 v 及 $C_1 C_2 C_3$ 待定。

设参数序列:

$$Z(t) = \hat{X}^{(1)}(t+1) - \hat{X}^{(1)}(t) = C_1 \exp(vt) [\exp(v) - 1] + C_2, t \in [1, n-1] \quad (18)$$

令 $Y_m = Z(t+m) - Z(t)$, 则可得

$$v = \ln \frac{Y_m(t+1)}{Y_m(t)} \quad (19)$$

将式(17)中的 $\hat{X}^{(1)}$ 换成 $X^{(1)}$, 由式(18)可得 v 的近似解 \tilde{v} , 取不同的 m 可得不同的 \hat{v} , 以他们的平均值作为 v 的估计, 经分析 $m=1, 2, \dots, n-3$, 计算的 \hat{v} 的个数为 $\frac{(n-2)(n-3)}{2}$, 故得:

$$\hat{v} = \frac{\sum_m^{n-3} \sum_t^{n-2-m} \tilde{v}_m(t)}{\frac{(n-2)(n-3)}{2}} \quad (20)$$

令 $L = \exp$, 则:

$$\hat{X}^{(1)}(t) = C_1 L(t) + C_2 t + C_3 \quad (21)$$

利用最小二乘法求得 $C_1 C_2 C_3$ 的估值。令:

$$Y = [x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)]^T, \quad C = [C_1 C_2 C_3]^T, \quad A = \begin{bmatrix} L(1) & 1 & 1 \\ L(2) & 2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ L(n) & n & 1 \end{bmatrix}$$

则有 $Y=AC$ ，从而得：

$$C=(A^T A)^{-1} A^T Y \quad (22)$$

可得到生成序列的预测值为：

$$\hat{X}^{(1)}(t)=C_1 \exp(\hat{V}t)+C_2 t+C_3 \quad (23)$$

原始序列的预测值为：

$$\begin{cases} \hat{X}^{(0)}(1)=\hat{X}^{(1)}(1) \\ \hat{X}^{(0)}(t+1)=\hat{X}^{(1)}(t+1)-\hat{X}^{(1)}(t) \end{cases} \quad (24)$$

2.3.4. 加权灰色线性回归组合模型

加权组合模型的建立与非加权组合预测模型的建立基本相似，不同的是在前者中，对时间序列、对可靠性、对时间成正比例变化的数据序列，分别给以不同的权值[24]，定权如下：

$$P_i=R^{i-1}, i=1,2,3,\dots,n \quad (25)$$

式中， R 为精度递增因子， $R \in [1,2]$ ，通常取 $R=1.5$ ，有 $p=\begin{bmatrix} p_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & p_n \end{bmatrix}$ ，则有待估计参数：

$$C=(A^T P A)^{-1} A^T P Y \quad (26)$$

2.4. 模型检验

采用相对误差检验模型预测精度，分别计算其平均相对百分比误差(以下统称平均误差)，以及近6年(2015~2020年)平均相对百分比误差(以下统称2015~2020年平均误差)。

3. 结果与讨论

3.1. 全国禽畜粪便可收集量折标煤量灰色模型预测分析

分别在6年、9年、12年和15年四种时间尺度下采用GM(1,1)、GM(1,5)、灰色线性组合及其加权模型对全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量进行模拟和预测，结果见图1。从图中可以看出，GM(1,1)和灰色线性回归组合模型的模拟误差随时间尺度的增加而增加；GM(1,5)和加权灰色线性回归组合模型的误差均呈现先降低后增加的趋势，前者短时间尺度下的模拟误差最大，后者则是长时间尺度下的模拟误差更高。从误差结果来看，对全国禽畜粪便可收集折标煤量模拟和预测效果最好的是12年时间尺度下的灰色GM(1,5)，平均误差为1.51%。

结合图2未来五年的预测趋势可以看出，在6年、9年、12年时间尺度下灰色线性回归组合及其加权模型未来预测值都出现了明显骤增骤降现象，考虑到国家对于肉类食品供应的宏观调控政策，这种大幅度的波动不符合实际情况。如图2(c)所示，灰色GM(1,5)12年时间尺度下的未来预测值平稳下降，没有出现大幅度变化，符合其受各种因素制约的实际。综上，对于全国禽畜粪便可收集折标煤量模拟和预测最好的是12年时间尺度下的GM(1,5)。

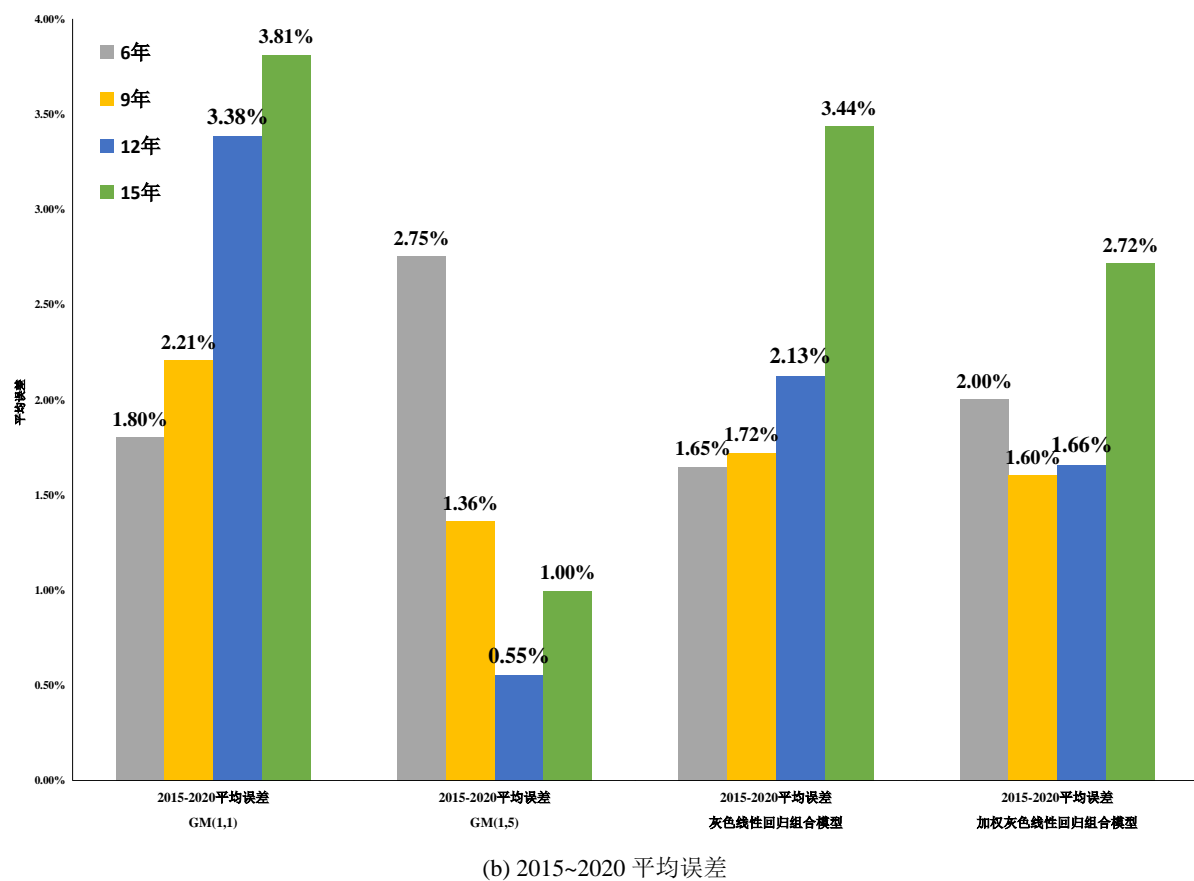
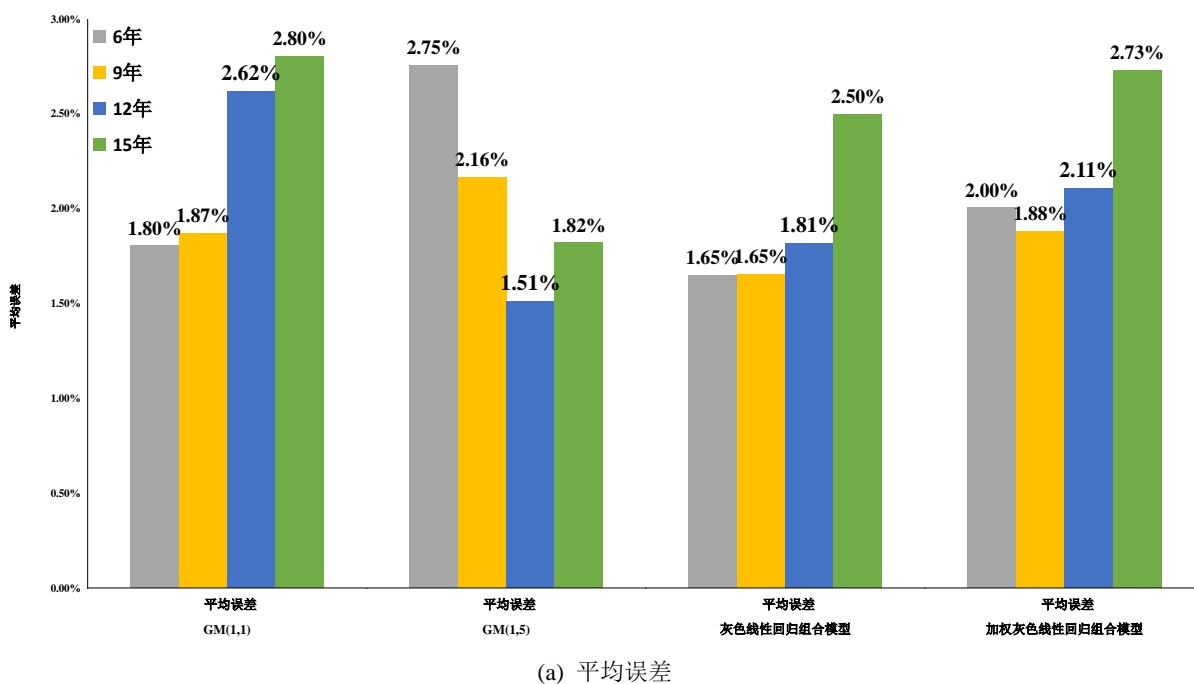
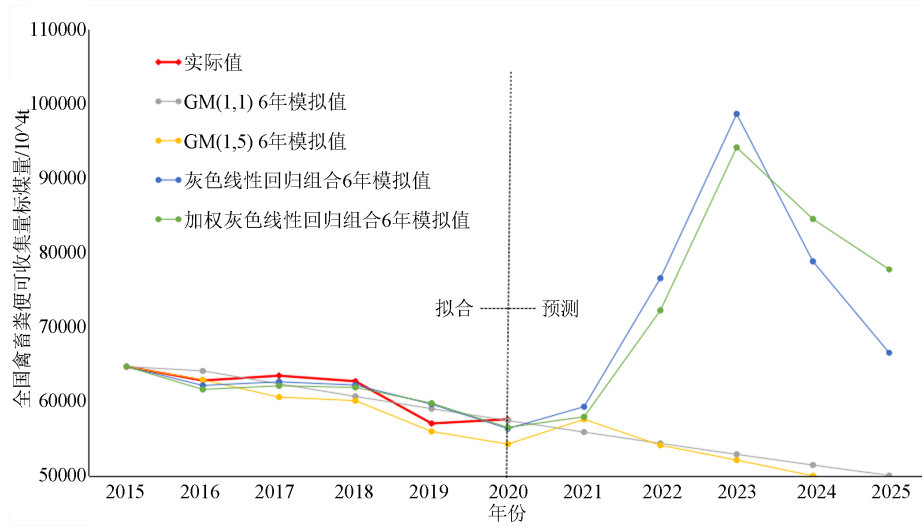
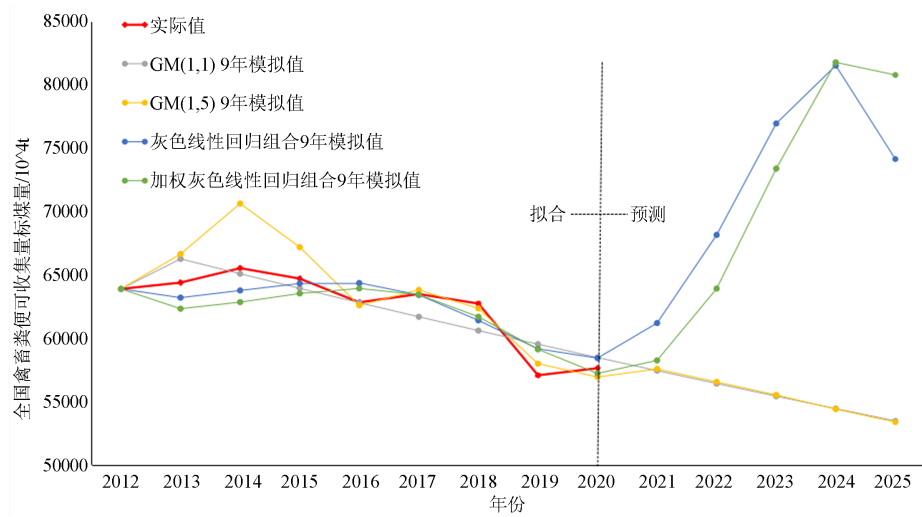


Figure 1. Comparison of the average error (a) of different models and the average error from 2015 to 2020 (b) for the collectible standard coal quantity of livestock manure in China

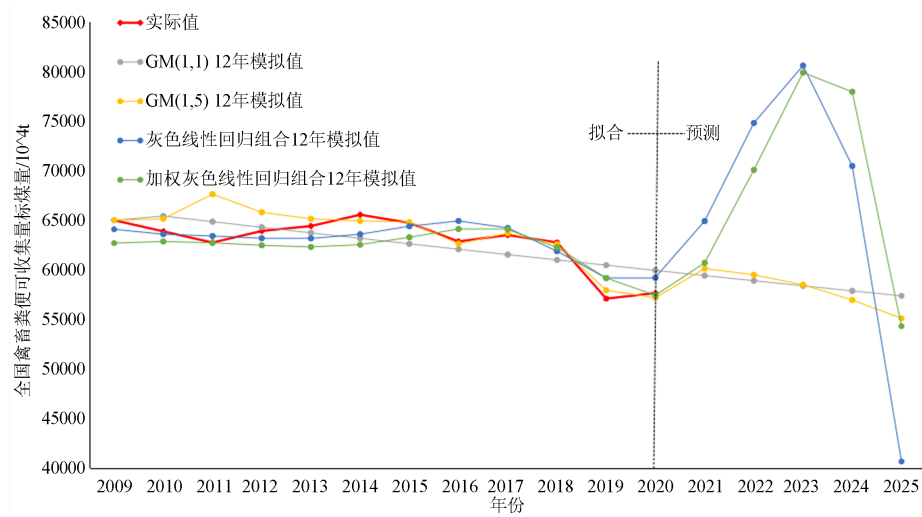
图 1. 全国禽畜粪便可收集折标煤量不同模型平均误差(a)和 2015~2020 年平均误差(b)误差对比



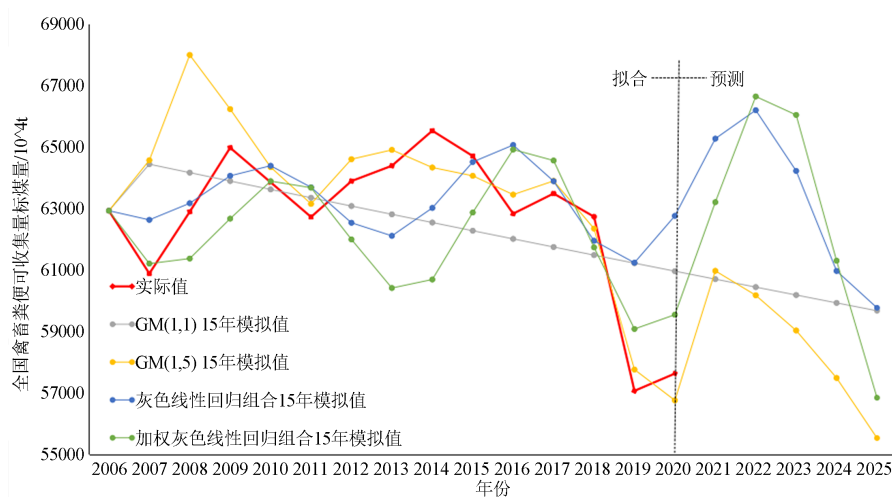
(a) 6 年时间尺度



(b) 9 年时间尺度



(c) 12 年时间尺度



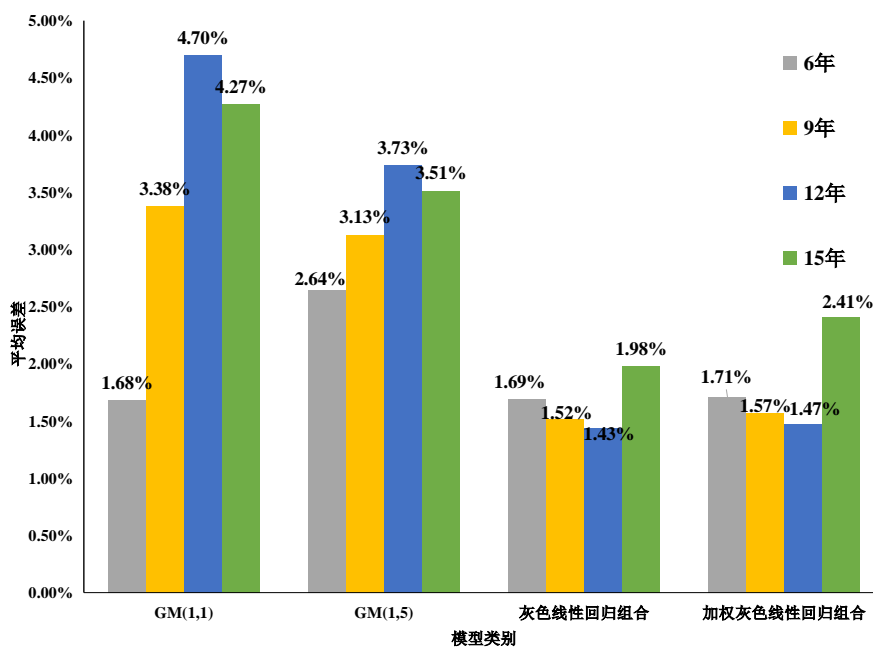
(d) 15 年时间尺度

Figure 2. Simulation and prediction of the collectible standard coal quantity of livestock manure in China using different models at four time scales

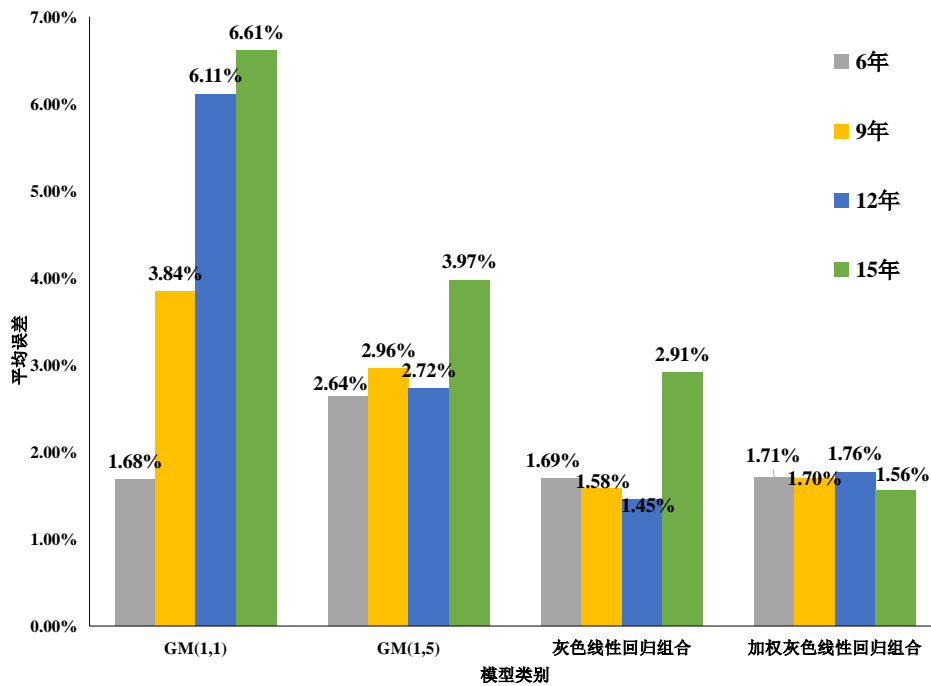
图 2. 全国禽畜粪便可收集量折标煤量四种时间尺度下不同模型模拟和预测

3.2. 京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量灰色模型预测分析

对比四种模型在不同时间尺度下模拟和预测京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量的结果,从图 3 可以看出,在 6 年时间尺度下,GM(1,1)、灰色线性回归组合模型及其加权模型的平均误差相近,明显低于 GM(1,5) 的平均误差。随着时间尺度的增加,GM(1,1) 的平均误差明显高于灰色线性回归组合模型及其加权模型的平均误差。卢阳[13]基于灰色线性回归组合模型进行金融预测,其平均误差为 0.36%。本文中全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量的模拟误差都高于 0.36% 的,可能是由于全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量数据特点造成的。



(a) 平均误差

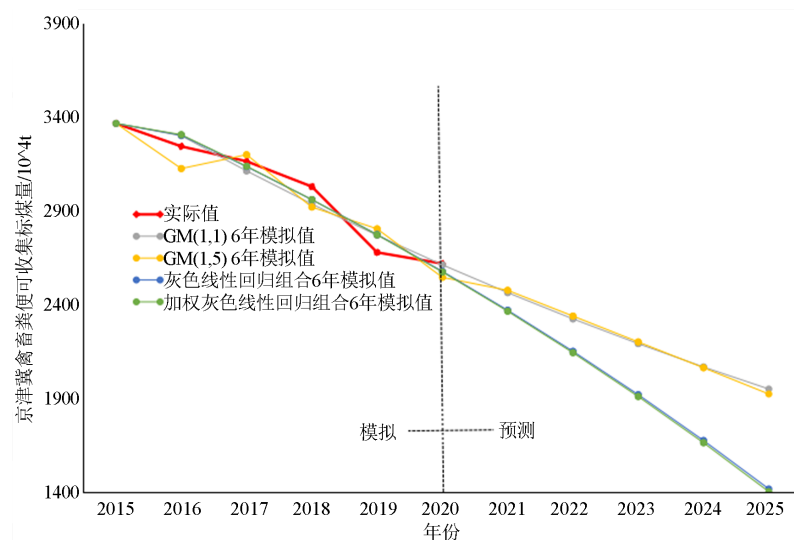


(b) 2015~2020 年平均误差

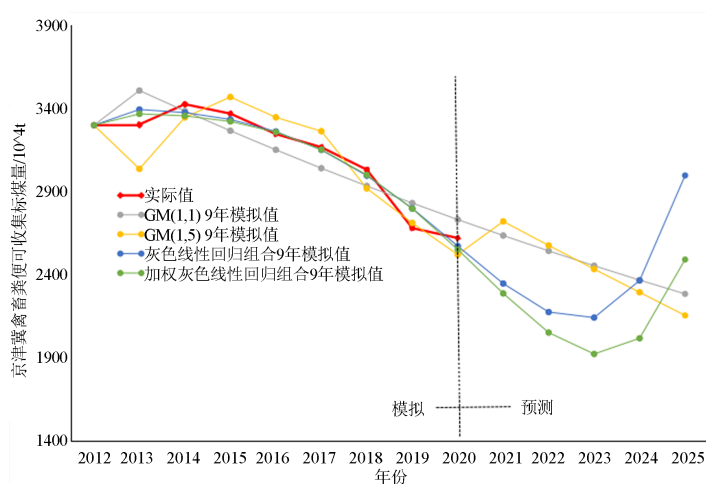
Figure 3. Comparison of the average error (a) of different models and the average error from 2015 to 2020 (b) for the collectible standard coal quantity of livestock manure in Beijing-Tianjin-Hebei region

图 3. 京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量不同模型平均误差(a)和 2015~2020 年平均误差(b) 误差对比

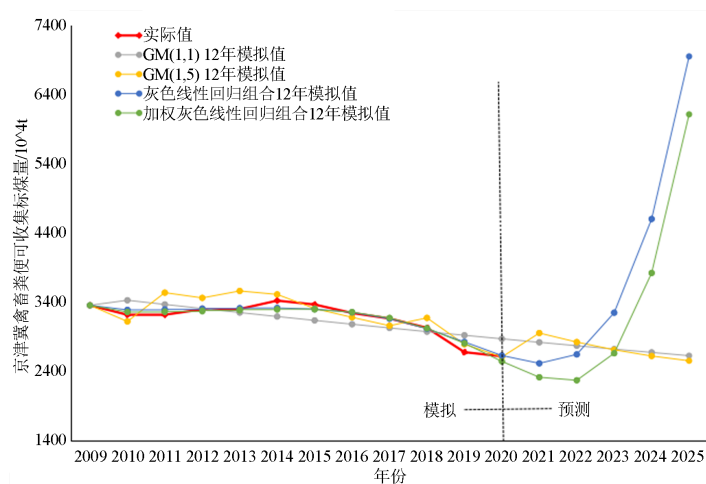
虽然平均误差最低的是 12 年时间尺度下的灰色线性回归组合及其加权模型,但是这两种模型未来五年的预测值在 2023 年后呈近似指数增长(图 4),不符合实际。相比之下,6 年和 9 年时间尺度下灰色线性回归组合模型及其加权模型的模拟误差较为接近。综合考虑,在未来预测值相对合理的情况下,灰色线性回归组合模型 9 年时间尺度下的模拟和预测最好,其平均误差为 1.52%。



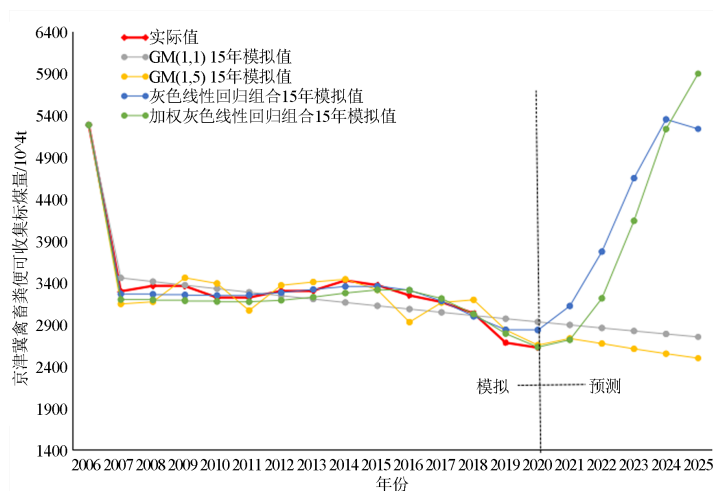
(a) 6 年时间尺度



(b) 9 年时间尺度



(c) 12 年时间尺度



(d) 15 年时间尺度

Figure 4. Simulation and prediction of the collectible standard coal quantity of livestock manure in Beijing-Tianjin-Hebei region using different models at four time scales

图 4. 京津冀地区禽畜粪便可收集量折标煤量四种时间尺度下不同模型模拟和预测

总结全国和京津冀地区禽畜粪便可收集量折标煤量不同模型不同时间尺度下平均误差和 2015~2020 年平均误差可知, 对全国禽畜粪便可收集折标煤量模拟和预测效果最好的是 12 年时间尺度下的灰色 GM(1,5), 平均误差为 1.51%; 对京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量来说, 9 年时间尺度下灰色线性回归组合模型的模拟精度最好, 平均误差为 1.52%。在之前的研究中, 刘莉等[25]以北京市密云县檀营乡 5 年的禽畜粪便当年产量为数据源, 用 GM(1,1)预测了畜禽粪便产量, 平均相对误差为 4.38%; 李夏培等[14]以北京市 9 年的农产品物流总额为源数据, 基于灰色线性回归组合模型对农产品物流需求进行预测, 平均误差为 2.19%; 马云倩等[4]以全国 25 年的粮食产量为源数据, 基于 LASSO 与 GM(1,N)模型对中国粮食产量进行预测, 其平均误差为 3.13%。上述研究的误差结果均高于本研究的平均误差, 由此可知, 筛选合适的模型以及时间尺度对于精确预测特定区域生物质废弃物产量和潜力十分重要。

结合全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量 2006~2020 年的变化趋势和数据特点可以得出, 灰色 GM(1,N)适合整体波动大的数据类型, 灰色线性回归组合及其加权模型则适合波动幅度不大且有一定总体趋势的数据类型, 而灰色 GM(1,1)模型并不适合这两类对于其数量级波动性很明显的的数据。

根据最优时间尺度和模型的预测结果, 全国和京津冀地区未来五年的禽畜粪便可收集折标煤量见表 5。可以看出, 全国禽畜粪便可收集折标煤量未来总体稳定, 下降趋势很小, 而京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量呈现先下降后增加的趋势。从全国范围来看, 畜牧业发展势头迅猛, 但是养殖规模化率和粪污综合利用率逐渐提高[26], 因此可收集折标煤量总体保持稳定。从京津冀地区来看, 2023 年之前的禽畜粪便折标煤量降低符合近年来的发展趋势, 这主要受限于京、津、冀三地技术创新等方面的差异所致; 随着协同创新力度的加深和协同机制的创新, 京津冀地区的畜牧业将在资源、生态、科技、服务、组织协同等方面达到新的发展阶段[27], 可能进一步提高畜禽粪便生物质的能源潜力。

Table 5. Prediction of livestock manure collectable standard coal quantity in China and the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2021 to 2025(Unit: 10,000 tons)

表 5. 2021~2025 年全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量预测结果(单位: 万吨)

区域	2021 年	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年
全国	60104.2	59466	58461.5	56929.9	55077.8
京津冀	2346.5	2175.0	2141.6	2364.6	2996.4

4. 结论

时空尺度是影响灰色系统理论预测精度的重要因素。本研究利用灰色 GM(1,1)、灰色 GM(1,5)、灰色线性回归组合及其加权四种灰色模型对全国、京津冀地区两个空间尺度下的禽畜粪便可收集量折标煤量进行拟合和预测, 分析在 6 年、9 年、12 年和 15 年四个时间尺度下的拟合精确度, 解析了时空尺度对灰色模型在禽畜粪便折标煤量预测精度的影响, 并预测了未来五年的能源潜力, 得出以下结论:

1) 对全国和京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量灰色关联度最大的因素分别是秸秆可收集量和农业人口数, 关联度分别为 0.828 和 0.901, 模拟和预测相对最合理的是分别是 12 年时间尺度下的灰色 GM(1,5)模型和 9 年时间尺度下的灰色线性回归组合模型, 其平均误差分别为 1.51%和 1.52%。

2) 预测 2021~2025 年, 全国禽畜粪便可收集折标煤量未来总体稳定, 下降趋势很小, 而京津冀地区禽畜粪便可收集折标煤量呈现先下降后增加的趋势。

本研究在统一折标煤量量纲的基础上, 揭示了不同时空尺度对畜禽粪便能源潜力预测中灰色系统理论的适用性以及预测精度的影响, 获得了较为准确的预测结果, 符合全国和京津冀地区畜牧业发展及粪污综合利用趋势, 研究结果可为全国和京津冀地区的能源开发、灰色系统理论应用于其他领域的时空尺度选择提供参考。

基金项目

本研究受到国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101003)的资助。

参考文献

- [1] 史丹. 能源蓝皮中国能源发展前沿报告(2021): “十三五”回顾与“十四五”展望[M]. 社会科学文献出版社, 2022.
- [2] 吴晓红. 基于 GM(1, 1)灰色预测模型的杭州市生活垃圾年产量数据预测[J]. 智库时代, 2019(3): 111, 116.
- [3] 韩建忠, 杜旺兵, 王天琼. 环境污染第三方治理背景下畜禽养殖粪便排放量预测研究[J]. 农业开发与装备, 2018(7): 36, 39.
- [4] 马云倩, 郭燕枝, 王秀丽, 孙君茂. 基于 LASSO 与 GM(1, N)模型的中国粮食产量预测[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(7): 30-35.
- [5] 苏海军, 邵艺. 一种优化组合的 GM(1, N)模型[J]. 四川文理学院学报, 2013, 23(5): 7-10.
- [6] Ye, J., Dang, Y. and Yang, Y.J. (2020) Forecasting the Multifactorial Interval Grey Number Sequences Using Grey Relational Model and GM (1, N) Model Based on Effective Information Transformation. *Soft Computing*, **24**, 5255-5269. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-04276-w>
- [7] Luo, X.H., Yan, X.Q., Chen, Y.S., Y, M. and Li, J.W. (2020) The Prediction of Shale Gas Well Production Rate Based on Grey System Theory Dynamic Model GM (1, N). *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, **10**, 3601-3607. <https://doi.org/10.1007/s13202-020-00954-w>
- [8] 崔胜先, 谢光辉, 董仁杰. 灰色系统理论在黑龙江省农作物秸秆可收集量预测中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 123-130.
- [9] 王涛, 宋喜芳, 常小箭, 赵永峰, 王辉. 灰色系统理论在陕西省农作物秸秆可收集量预测中的 SAS 应用[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(6): 186-189.
- [10] Hu, Y.C. (2020) Constructing Grey Prediction Models Using Grey Relational Analysis and Neural Networks for Magnesium Material Demand Forecasting. *Applied Soft Computing*, **93**, Article ID: 106398. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106398>
- [11] 陈浩, 赵兵舰, 杨柳叶, 田永兰, 田旺, 吕玮, 张化永. 时空尺度对灰色系统理论预测秸秆折标煤量的影响研究[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 241-252.
- [12] 李夏培. 基于灰色线性组合模型的农产品物流需求预测[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2017, 16(1): 120-126.
- [13] 卢阳. 基于灰色线性回归组合模型的金融预测方法[J]. 统计与决策, 2017(10): 91-93.
- [14] Zeng, B. and Li, C. (2016) Forecasting the Natural Gas Demand in China Using a Self-Adapting Intelligent Grey Model. *Energy*, **112**, 810-825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.090>
- [15] Men, K.P. and Zhang, N. (2009) Forecast of Rural Gross Social Output Value in Jiangsu Province Based on Optimized Grey Model. *Asian Journal of Agricultural Research*, **37**, 4353-4354.
- [16] Huang, H.L., Tao, Z.F., Liu, J.P., Cheng, J.H. and Chen, H.Y. (2021) Exploiting Fractional Accumulation and Background Value Optimization in Multivariate Interval Grey Prediction Model and Its Application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **104**, Article ID: 104360. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104360>
- [17] Wu, W.Q., Ma, X., Zeng, B., Wang, Y. and Cai, W. (2018) Application of the Novel Fractional Grey Model FAGMO (1, 1, k) to Predict China's Nuclear Energy Consumption. *Energy*, **165**, 223-234. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.09.155>
- [18] 邓爱平, 周敏. 环境约束下的四川省畜禽养殖业结构优化研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(22): 85-91.
- [19] 邢红, 赵媛, 王宜强. 江苏省南通市农村生物质能源潜力估算及地区分布[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 3480-3489.
- [20] 宓春秀. 江苏省生物质能源供给能力评价及影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学经济管理学院, 2018.
- [21] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国农业大学农学院, 2018.
- [22] 刘刚, 沈镭. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19.
- [23] 刘思峰, 等. 灰色系统理论及其应用(第八版) [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [24] 王娉, 胡冬清. 加权灰色线性回归组合模型的 MATLAB 程序实现[J]. 江西测绘, 2013(3): 52-53.

- [25] 刘莉, 孙振钧, 刘成国, 孙月. 灰色理论 GM(1, 1)模型在畜禽粪便产量预测中的应用[J]. 农业环境科学学报, 2007(S2): 728-730.
- [26] 农业农村部. 农业农村部文件《“十四五”全国畜牧兽医行业发展规划》 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-12/22/content_5663947.htm, 2021-12-24.
- [27] 祝丽云, 蒋桂娥, 张冰颖. 可持续发展视角下京津冀奶业协同创新机制及路径研究[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 50-56.