

南京都市农业农地利用碳排放测算及趋势预测

王琦, 黎孔清, 朱利群

(南京农业大学 人文与社会发展学院, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 测算南京市都市农业农地利用碳效应, 为发展都市农业的其他城市提供可借鉴的低碳经验。[方法] 基于化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕 6 个主要方面的碳源, 测算南京市 1996—2014 年的农地利用碳排放量, 综合林地、草地、园地 3 个主要方面的碳汇变化特征, 探索农地利用方式变化导致的碳效应。并基于灰色 GM(1,1) 模型预测南京市农地利用碳排放量趋势。[结果] 1996—2014 年南京农地利用碳排放量总体呈现“上升—波动—平稳下降”的 3 阶段特征, 纵向来看, 2005—2014 年林地碳汇、草地碳汇有所下降, 但变化趋势不同。横向来看, 由于各区承载的城市功能不同, 区域碳汇差异较大。从农地利用方式变化的碳效应来看, 2000—2008 年南京市因生态退耕产生碳汇呈先上升后下降的变化趋势, 建设占用导致的碳排放量变化趋势呈现 Z 字形上升。基于灰色 GM(1,1) 模型采用等维递补预测方法, 预计到 2020 年该市农地利用碳排放量为 1.11×10^5 t。[结论] 南京市农地利用碳排放的变化趋势与经济发展和都市农业发展进程密切相关。林地、草地面积的减少降低了原本不高的碳汇效应, 并且由于经济发展与城市建设需要, 持续上升的建设占用碳排放对南京市碳效应影响巨大。

关键词: 农地利用方式; 碳排放; 灰色 GM(1,1) 模型; 南京市都市农业

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0288-07

中图分类号: X321

文献参数: 王琦, 黎孔清, 朱利群. 南京都市农业农地利用碳排放测算及趋势预测[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 288-294. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 20170510. 001; Wang Qi, Li Kongqing, Zhu Liqun. Estimation of carbon utilization and prediction of agricultural land use in urban agriculture of Nanjing City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 288-294. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 20170510. 001

Estimation of Carbon Utilization and Prediction of Agricultural Land Use in Urban Agriculture of Nanjing City

WANG Qi, LI Kongqing, ZHU Liqun

(College of Humanities and Social Development, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] The carbon effect of urban agricultural land was estimated in Nanjing City to provide development experience for other cities with urban agriculture. [Methods] The carbon emissions from agricultural land in Nanjing City were calculated from 1996 to 2014 based on six main carbon sources of chemical fertilizers, pesticides, agricultural film, agricultural diesel, irrigation and tillage. At the same time, the variations of three main carbon sinks, including forest land, grassland, garden, were explored to illustrate the carbon effects of agricultural land use changes. In the end, the trend of carbon emissions from agricultural land in Nanjing City was predicted based on the gray GM(1,1) model. [Results] From 1996 to 2014, the carbon emissions from agricultural land use in Nanjing City showed a three-stage variation of “rising-fluctuating-steady decline”. Chronically, the carbon sinks of both forest land and grass land decreased from 2005 to 2014, but their decreasing rate was different. From the view of regional comparison, due to the city carrying function was different, regional carbon sinks differed greatly. In terms of the carbon effect of the change of

收稿日期: 2017-02-10

修回日期: 2017-02-21

资助项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目“南方稻田不同施肥措施的净减排潜力及推广机制优化研究”(15YJCZH246); “基于生态文明的区域土地利用碳排放效应及减排政策研究”(14YJC630058); 中国博士后科学基金项目(2015M570463); 江苏高校哲学社会科学研究项目(2015SJD087, 2014SJD072); 江苏省自然科学基金项目(BK2015068); 南京农业大学中央高校基本科研业务费人文社科基金育才项目(SKYC2017019)

第一作者: 王琦(1996—), 辽宁省朝阳市人, 本科生, 研究方向为区域农业与低碳排放方面。E-mail: 11614103@njau.edu.cn。

通讯作者: 朱利群(1975—), 江西省资溪县人, 博士, 教授, 主要从事区域农业发展方面研究。E-mail: zhulq@njau.edu.cn。

agricultural land use, the carbon sequestration in Nanjing City from 2000 to 2008 increased at first and then decreased; and carbon emission caused by construction occupancy experienced a Z-shaped variation. Based on the gray GM(1,1) model, the isobar metric forecasting method was used. It was estimated that the agricultural carbon use in the city will be 1.11×10^5 t by 2020. [Conclusion] The trend of carbon use in Nanjing City was closely related to the economic development and the process of urban agriculture development. The reductions of forest land and grass land area reduced the original carbon sink effect. And as a result from economic development and urban construction needs, the continued growth in construction land have great impact, which will result in a large number of carbon emissions in Nanjing City.

Keywords: agricultural land use; carbon emission; gray GM(1,1) model; urban agriculture of Nanjing City

由碳排放导致的全球气候变暖问题严峻,现已成为人类社会实现可持续发展的重大挑战。随着工业化与城镇化的推进,农业生产的单位面积投入(化肥、农药、农膜等)不断增加,导致农地利用碳排放问题显现。据测算,农业温室气体排放约占全球排放总量的14%,已成为仅次于电热生产的第二大排放源(IPCC,2007)。我国作为农业大国,农业温室气体排放约占全国排放总量的17%(中国环境与发展国际合作委员会,2004),正面临着巨大的减排压力。南京市是我国东部地区重要的中心城市,同时也是重要的农业和商品粮基地之一,于上个世纪90年代提出发展都市农业,即以现代化城市资源为依托,以资源、环境、生态、经济、科技、社会等协调发展为宗旨的可持续现代农业系统。经过多年发展,总体上完成了城郊型农业向都市型农业的过渡^[1-2]。碳效应已然成为当前的一个研究热点,新型农业发展模式的农地利用碳效应研究更有待人们探索。

近年来,很多学者从全国范围^[3]、地区范围^[4],以及省域范围^[5-6]对区域碳排放的阶段特征及主导因素进行了研究。对于碳排放测算方法的研究,厘清各用地类型的碳流通过程,构建城市系统垂直碳通量核算体系,明确各碳通量来源的测算方法^[7],从低碳经济角度去综合评价和分析区域土地利用水平^[8]。对于碳排放影响因素的研究,国内外研究常采用的分析方法有迪氏对数指标分解法(LMDI)、IPAT模型、STIRPAT模型、Laspeyres指数法、Kaya恒等式等^[9]。经济发展与碳排放也是专家学者研究的热点。学者们对低碳经济这一人类的必然选择进行了广泛的研究^[10-12],基于数据测算,Honlitz-Eakin等^[13]认为人均碳排放与人均GDP之间具有倒U形关系,而Shafik^[14]研究发现人均碳排放与人均GDP之间呈现单调递增的线性关系。已有研究主要针对碳排放量较大或生态环境脆弱的区域,基本反映碳排放现状,能涵盖所有影响碳排放的因素,但少有人对特定类型的区域农业农地利用碳排放进行研究。同时,基于影响因素对碳排放量趋势进行研究,偶然因素的干扰降

低了预测值的准确性。在此,本文测算南京市都市农业农地利用碳效应,并基于灰色GM(1,1)模型预测该市农地利用碳排放量趋势。理论上,研究成果是对现有研究体系的重要补充。现实中,不仅有利于南京农地利用碳排放量的减少,也为我国发展都市农业的其他城市提供可借鉴的低碳发展经验。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域与数据来源

南京地处我国东部地区,是国务院批复确定的中国东部地区重要的中心城市。其都市农业发展可以分为两个阶段:①1996—2001年,农业产业结构调整阶段;②2001年至今,农业功能调整阶段。2001年以来,南京市逐步将农业纳入整个城市发展进程,推进农业产业结构调整以及功能性的完善^[15]。以加强生产功能为基础,不断拓展其服务功能以及生态功能,该市功能性结构调整初现端倪^[16]。初步实现了均衡、协调和可持续发展^[17]。南京市农业生产主要分布在浦口区、栖霞区、雨花台区、江宁区、六合区、溧水区和高淳区,2014年该市实现农林牧渔业总产值383亿元,同比增长9.2%,占该市GDP的2.5%,建设“菜篮子”基地 1.33×10^4 hm²,叶菜自给率超过80%。农业服务功能发展方面,该市累计建成休闲农业景区(景点)250个,其中国家级12个,打造出高淳国际慢城、六合茉莉花村等一批休闲农业亮点,2013年休闲农业实现综合收入46亿元^[18]。生态功能方面,在中国各地区低碳经济发展进程评估研究中,江苏省被列为有效率省市,排名仅次于上海市^[19]。南京作为省会城市,在发展低碳经济过程中的贡献不言而喻。

所需各年份数据均来自《南京统计年鉴》、《南京国土资源公报》。其中化肥、农药、农膜、柴油数据以南京市当年实际使用量为准;翻耕数据以南京市当年农作物实际播种面积为准,农业灌溉则以当年南京市实际灌溉面积为准。

1.2 农地利用碳效应的估算方法

农地利用的碳效应是指农业生产活动过程中直接或间接作用于农地而引发的碳排放与碳吸收。以往研究表明,耕地利用的碳排放主要来源于 6 个方面:① 化肥生产和使用过程中所导致的农地直接或间接的碳排放;② 农药生产和使用过程中所导致的碳排放;③ 农膜生产和使用过程中所引起的碳排放;④ 由于农业机械运用而直接或间接消耗化石燃料(主要是农用柴油)所产生的碳排放;⑤ 农地翻耕破坏土壤有机碳库,大量有机碳流失到空中所形成的

碳排放;⑥ 灌溉过程中电能利用间接耗费化石燃料所形成的碳释放。碳吸收效应主要测算林地、草地、园地 3 个方面,因农作物生长过程汇聚的碳元素最终通过人类的消费和秸秆焚烧转换、释放,所以农作物碳吸收作用不纳入测算。碳排放(吸收)估算公式如下:

$$E = \sum E_i = \sum T_i \cdot \delta_i$$

式中: E_i ——指各种类型土地碳排放(吸收)量; T_i ——各碳排放(吸收)源的量; δ_i ——各碳排放源的排放(吸收)系数,分别归纳出农地碳排放(吸收)系数(表 1)。

表 1 主要土地碳效应系数及参考来源

碳效应	碳源/碳汇	排放(吸收)系数	参考来源
碳源	化肥	0.895 6 kg/kg	West ^[20] 、美国橡树岭实验室
	农药	4.934 1 kg/kg	美国橡树岭国家实验室 ^[21]
	农膜	5.18 kg/kg	IREEA ¹
	柴油	0.5927 kg/kg	IPCC ²
	翻耕	312.6 kg/km ²	中国农业大学生物与技术中心 ^[22]
	灌溉	25 kg/km ²	Dubey ^[23]
碳汇	林地	0.49 t/(hm ² ·a)	黄贤金等 ^[24]
	草地	0.002 1 t/(hm ² ·a)	方精云等 ^[25]
	园地	0.21 t/(hm ² ·a)	IPCC ²

注: IREEA 为南京农业大学农业资源与生态环境研究所; IPCC 为联合国气候变化政府间专家委员会。

1.3 灰色 GM(1,1)预测模型的建立

灰色预测模型就是将原始信息数据序列通过一定的数学方法处理后,将其转化为动态微分方程来描述原系统的内在特征,建立抽象系统的动态演变预测模型^[26]。设由 $n+1$ 个原始数据组成的原始数列为 $X^{(0)}$,对 $X^{(0)}$ 进行一次累加生成得到 $X^{(1)}$ 。GM(1,1)模型的一阶线性常系数微分方程标准型公式为:

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

为提高模型的预测精度以及可靠性要进行模型检验,包括残差检验、级比偏差检验、关联度检验和后验差检验。 C 为方差比, P 为小概率误差, MG(1,1)模型精度等级如表 2 所示,精度等级越小越好,4 级为不合格。

表 2 MG(1,1)模型精度等级

精度等级	方差比 C	小概率误差 P
1	<0.35	>0.95
2	<0.5	>0.8
3	<0.65	>0.7
4	≥ 0.65	≤ 0.7

2 结果与分析

2.1 南京市农地利用碳排放特征分析

根据上文中给出的碳排放测算公式和碳源系数,定量测算南京市 1996—2014 年农地利用碳排放(表

3)。结果表明,南京都市农业农地利用碳排放量有所下降,由 1996 年的 2.04×10^5 t 减少至 1.26×10^5 t,增长了一 0.38 倍,年均增长率达到 -2.64%。从各生产要素碳排放量构成份额看,化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕碳排放量占总排放量的比重均值依次为 63.8%、10.6%、14.2%、8.0%、2.7% 和 0.5%,其中,化肥、农药和农膜是农地利用碳排放的主要来源。1996—2014 年化肥、农药施用所导致的碳排放量有减少的趋势,化肥对碳排放量减少的贡献超过百分之百;农膜 1996 年排放量仅为 1.41×10^4 t,到 2014 年增长到 2.72×10^4 t,年均增长率为 3.71%,2004 年碳排放量超过农药,成为排放量占比第二的物质投入。而翻耕、农用柴油、灌溉带来的碳排放量变化不明显,有不同程度的增加或减少。

从总量上看,南京市都市农业农地利用碳排放量呈有所下降,并且碳排放强度变化轨迹与此基本一致(图 1),但计算碳排放总量的环比增速可以看出,南京市农地利用碳排放总量具有阶段性特点,且增加(减少)幅度呈波动趋势(图 2),进一步将南京市农地利用碳排放总量划分为 3 个阶段:

第 1 阶段,1996—2001 年南京市农地利用碳排放量呈增长态势,年均增长率为 4.51%。其中,化肥、农药碳排放量均有所增加,农膜碳排放虽比重较小,但 5 a 间增长了 1.41 倍。该阶段南京市农业正经历从城

郊农业向都市农业转变的过程,农业产业结构调整是这一阶段该市农业发展的主旋律,农业生产还处于粗放生产的状态,对化肥、农药以及农膜需求较高。此时的农业产值的增长是以高投入为代价的。

第 2 阶段,2002—2011 年南京市农地利用碳排放量呈现波动趋势,碳排放量有所下降,但年际变化波动性很大,下降最快年份的环比增速为 -13.63%,2012 年下降程度最小,环比增速为 -1.22%。其中,2003,2006 和 2008 年下降程度较大。探究其内在原因,这与南京市经济发展和都市农业发展进程密切相关。2002 年以来,村集体经济的兴起与繁荣使得许多农民转向二、三产业,一部分农民选择了进城务工,农

业在国民经济中的份额不断降低,导致农业经营者对生产资料的需求减少。同年,在南京市都市农业发展思路的指导下,生态农业、观光农业等现代化农业发展模式开始推进,并以呈现农业丰富功能性为目标。除此之外,这一阶段各种农业发展模式还在探索阶段,并且受市场因素影响较大,缺少发展经验使得农地利用产生的碳排放量变化波动明显。

第 3 阶段,2012—2014 年南京市农地利用碳排放量虽呈现下降趋势,但下降幅度并不大,平均下降 1.5%。这主要是现代化农业改革发展一定程度,对技术、资源等要求越来越高,农地利用碳排放量下降程度逐渐放缓。

表 3 南京市 1996—2014 年农地利用碳排放情况

年份	化肥/ 10 ⁴ t	农药/ 10 ⁴ t	农膜/ 10 ⁴ t	农用柴油/ 10 ⁴ t	灌溉/ 10 ⁴ t	翻耕/ 10 ⁴ t	总计/ 10 ⁴ t	环比 增速/%	碳排放强度/ (t·hm ⁻²)	环比 增速/%
1996	14.21	2.66	1.41	1.45	0.50	0.13	20.36		0.48	
1997	14.75	3.00	1.67	1.56	0.49	0.13	21.61	6.14	0.51	6.25
1998	16.32	3.26	1.99	1.61	0.49	0.13	23.81	10.18	0.55	7.84
1999	16.16	2.98	2.52	1.59	0.50	0.13	23.87	0.25	0.56	1.82
2000	16.82	2.95	2.41	1.49	0.5	0.1	24.26	1.63	0.55	-1.79
2001	17.25	2.99	3.02	1.54	0.49	0.09	25.39	4.66	0.58	5.45
2002	16.48	2.82	3.23	1.53	0.49	0.09	24.63	-2.99	0.56	-3.45
2003	14.62	2.56	2.86	1.38	0.48	0.08	21.97	-10.80	0.53	-5.36
2004	14.38	2.28	2.66	1.46	0.47	0.08	21.33	-2.91	0.53	0.00
2005	13.31	2.94	2.61	1.59	0.48	0.08	20.99	-1.59	0.52	-1.89
2006	12.04	1.81	2.43	1.31	0.48	0.08	18.14	-13.58	0.52	0.00
2007	11.07	1.59	2.34	1.31	0.48	0.08	16.87	-7.00	0.49	-5.77
2008	8.86	1.47	2.4	1.28	0.48	0.08	14.57	-13.63	0.42	-14.29
2009	8.45	1.29	2.46	1.24	0.47	0.08	13.98	-4.05	0.41	-2.38
2010	8.07	1.2	2.68	1.29	0.47	0.08	13.79	-1.36	0.41	0.00
2011	7.57	1.05	2.6	1.38	0.45	0.07	13.11	-4.93	0.39	-4.88
2012	7.34	0.98	2.67	1.39	0.49	0.07	12.95	-1.22	0.39	0.00
2013	7.21	0.94	2.72	1.39	0.47	0.07	12.9	-0.39	0.40	2.56
2014	6.92	0.89	2.72	1.41	0.54	0.07	12.56	-2.64	0.39	-2.50

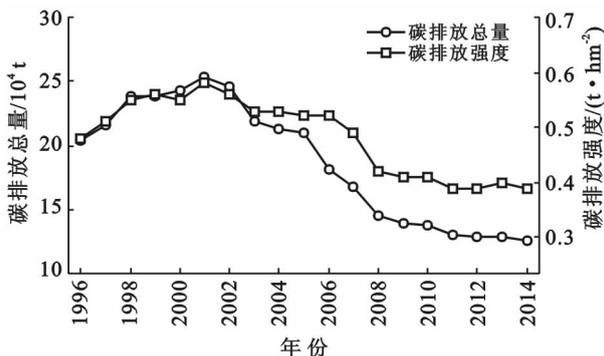


图 1 南京市 1996—2014 年农地利用碳排放量及排放强度

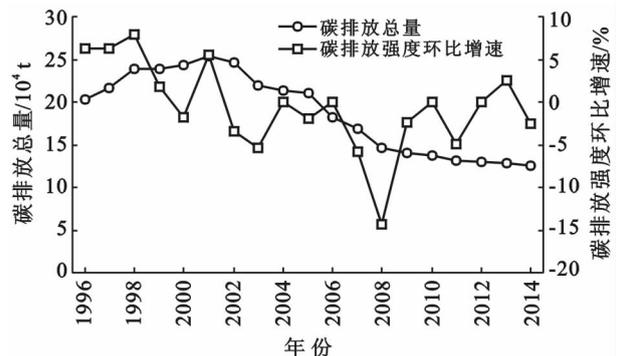


图 2 南京市 1996—2014 年农地利用碳排放总量和环比增速

2.2 南京市林地、草地、园地碳汇变化特征分析

南京市林地碳汇从 2005 年的 3.62×10^4 t 下降到 2014 年的 3.52×10^4 t, 年增长率仅为 -0.32% 。2005 年以来林地面积呈现波动下降的态势, 多数年份间“上升—下降”趋势交替显现, 2005—2008 年下降趋势最为明显。南京市一直在国家“退耕还林”与“守住 18 亿亩耕地红线”间寻找发展的平衡。随着南京市草地面积的减少, 草地碳汇呈现下降趋势, 从 1.07 t 骤降至 0.37 t。2001 年以来南京市逐步完善城市建设, 撤县设区、加快脚步建设现代化都市。尽管南京市草地面积并不大, 但经济发展与城市建设需要威胁着草地资源, 带来的环境影响也不可小觑。南京园地碳汇从 2005 年的 2.0×10^3 t 增长到 2014 年

的 2.30×10^3 t, 增长 18.01% (表 4)。南京市都市农业的发展极大的繁荣了当地的果蔬种植, 与此同时, 高淳国际慢城、江宁金花村、六合茉莉花村、浦口珍珠村等一批休闲农业也不断建成, 这对碳汇增加有明显的正向促进作用。

从各区碳汇来看, 由于承载的城市功能不同, 区域碳汇差异较大。2014 年林地碳汇最多的江宁区为 1.12×10^4 t, 最少的秦淮区仅为 11.75 t。草地碳汇主要集中在栖霞区、浦口区、六合区、溧水区, 4 区草地碳汇占南京市草地碳汇总量的 98.33% 。园地碳汇各区均有贡献, 其中江宁区、溧水区、高淳区等农业生产主要分布地碳汇贡献较多, 鼓楼区碳汇贡献最少仅为 1.94 t。

表 4 南京市 2005—2014 年林地、草地、园地碳汇量

年份	林地碳汇/t	草地碳汇/t	园地碳汇/t	年份	林地碳汇/t	草地碳汇/t	园地碳汇/t
2005	36 224.69	1.07	1 974.87	2010	35 915.51	0.37	2 613.72
2006	36 147.97	1.01	1 994.33	2011	35 733.95	0.37	2 508.67
2007	36 147.97	0.99	2 052.81	2012	35 430.54	0.39	2 062.80
2008	36 006.64	0.98	2 043.77	2013	35 663.58	0.39	2 385.07
2009	36 458.42	0.40	2 911.33	2014	35 204.19	0.37	2 330.61

2.3 南京市农地类型变化的碳效应分析

2.3.1 农地政策变化的单位碳排放效果分析

农地利用方式变化所引起的碳效应本研究采用差值法测算。

以耕地、林地间的转换为例可知, 耕地碳排系数为 α , 林地碳汇系数为 $-\beta$, 草地的碳汇系数为 $-\mu$, 建设用地的碳排系数为 λ , 则可得出: 退耕还林的碳汇效果为 $-(\alpha+\beta)$, 毁林开荒的碳排效果即为 $(\alpha+\beta)$; 退耕还草的碳汇效果为 $-(\alpha+\mu)$, 毁草开荒的碳排效果为 $(\alpha+\mu)$; 建设农地转为耕地碳减排效果为 $-(\lambda-\alpha)$, 耕地转为建设用地的碳增排效果为 $(\lambda-\alpha)$; 建设

用地转为林地的碳汇效果为 $-(\beta+\lambda)$, 林地转为建设用地的碳排效果为 $(\beta+\lambda)$; 建设用地转为草地的碳汇效果为 $-(\mu+\lambda)$, 草地转为建设用地的碳排效果为 $(\mu+\lambda)$ 。计算数据方面, 耕地碳排放强度数据源自表 3, 建设用地碳排系数以黄贤金的为准, 为 55.8 t/hm^2 。林地、草地、建设用地的碳排、碳汇系数均为固定值, 而耕地碳排放强度数据采用历年变化值。基于差值法得出耕地与林地、耕地与草地以及耕地与建设用地之间的转变所导致的历年碳排、碳汇的变化情况详见表 5。林地、草地、建设用地间的转变由于采用统一标准, 不存在年际差异。

表 5 农地利用方式转变单位面积碳排放/碳汇效果分析

年份	退耕还林	退耕还草	建设用地转换为耕地	毁林开荒	毁草开荒	耕地转换为建设用地
2000	-1 044.98	-575.98	-56 354.98	1 044.98	575.98	56 354.98
2001	-1 077.52	-608.52	-56 387.52	1 077.52	608.52	56 387.52
2002	-1 049.98	-580.98	-56 359.98	1 049.98	580.98	56 359.98
2003	-1 029.81	-560.81	-56 339.81	1 029.81	560.81	56 339.81
2004	-1 025.57	-556.57	-56 335.57	1 025.57	556.57	56 335.57
2005	-1 011.45	-542.45	-56 321.45	1 011.45	542.45	56 321.45
2006	-1 012.31	-543.31	-56 322.31	1 012.31	543.31	56 322.31
2007	-989.17	-520.17	-56 299.17	989.17	520.17	56 299.17
2008	-918.43	-449.43	-56 228.43	918.43	449.43	56 228.43

2.3.2 生态退耕与建设占用的碳效应变化分析 农地利用方式改变是导致其碳功能发生变化的重要原因,本研究结合南京市当前实际,生态退耕(近似认为是退耕还林)、建设占用(近似认为是耕地转为建设用地)是最普遍的两类农地利用转换形式。鉴于不同年份生态退耕、建设占用面积以及各自转换系数存在差异,计算历年南京市生态退耕与建设占用碳排放变化情况。

由表 6 可知 2000—2008 年,南京市因生态退耕产生碳汇呈先上升后减少的变化趋势,2002 年达到

最大值 71.29 t,而 2007 年以来产生碳汇不足 10 t;相反,建设占用导致的碳排放量由 2000 年的 8.30×10^3 t 上升至 2008 年的 4.49×10^4 t,年均增长率高达 23%,大量且持续增长的建设占用碳排放对南京市净碳效应影响巨大。进一步探索可知,2000 年以来由生态退耕引起的碳汇效应和由建设占用引起的碳排放效应呈明显的阶段性变化。其中碳汇量变化在 2002 年达到极致,随后急剧下降,2005 年后平稳下降;而碳排放量变化呈现 Z 字形增长趋势,前后变化趋势相对小,中间波动剧烈。

表 6 南京市 2000—2008 年生态退耕与建设占用碳排放变化情况

年份	生态退耕			建设占用		
	面积/ hm ²	转换系数/ (kg · hm ⁻²)	碳汇量/ t	面积/ hm ²	转换系数/ (kg · hm ⁻²)	碳排放量/ t
2000	218	-1 044.98	-22.78	1 480	56 354.98	8 340.54
2001	441	-1 077.52	-47.52	1 880	56 387.52	10 600.85
2002	679	-1 049.98	-71.29	2 330	56 359.98	13 131.88
2003	546	-1 029.81	-56.23	2 580	56 339.81	14 535.67
2004	210	-1 025.57	-21.54	2 830	56 335.57	15 942.97
2005	190	-1 011.45	-19.22	4 410	56 321.45	24 837.76
2006	190	-1 012.31	-19.23	6 020	56 322.31	33 906.03
2007	88	-989.17	-8.70	7 890	56 299.17	44 420.05
2008	77	-918.43	-7.07	7 991	56 228.43	44 932.14

2.4 南京市农地利用碳排放趋势预测

以 2009—2014 年测算出的南京市农地利用碳排放量为原始序列,通过累加生成、平均数生成等步骤建立 GM(1,1)模型,进而对未来几年南京市农地利用碳排放量进行预测。GM(1,1)模型建立详见表 7,其中 $n=6, \sigma^{(0)}(k) \in [0.75, 1.33]$ 。

表 7 GM(1,1)模型预测计算结果

年份	原始数列 $X^{(0)}$	级比检验 $\sigma^{(0)}(k)$	累加数列 $X^{(1)}$	$X^{(1)}$ 的均值序列 $Z^{(1)}$	辨识参数 a, b
2009	13.98		13.98		
2010	13.79	1.01	27.77	20.88	
2011	13.11	1.05	40.88	34.33	$a=0.02$
2012	12.95	1.01	53.83	47.36	$b=14.03$
2013	12.9	1.00	66.73	60.28	
2014	12.56	1.03	79.29	73.01	

模型预测精度达 $99.02\% > 90\%$,满足精度要求;级比偏差值为 $1.37\% < 10\%$,符合要求;关联度为 0.70,根据经验当分辨率 $\rho=0.5$ 时,关联度 $r > 0.6$ 便较为满意;后验差检验中,C 值越小 P 值越大模型精度越高。

经测算 $|\Delta^{(0)} - \bar{\Delta}| - \bar{\Delta}$ 均小于 S_0 ,因此 $p=1$ 。

又有 $C=0.26 < 0.35$ 。由表 2 可知模型精度等级为 1 级,估计值具有较高可信度。为增强预测精度,本文采用等维递补预测的方法。用 2009—2014 年的数据预测 2015 年数据。然后舍弃 2009 年数据,依据 2010—2015 年的数据进行预测,重复上述步骤直至完成 2020 年的预测。由表 8 可知,预测 2015—2020 年南京市农地利用碳排放量分别为 1.23×10^5 t, 1.20×10^5 t, 1.18×10^5 t, 1.15×10^5 t, 1.13×10^5 t, 1.11×10^5 t,年均增长率为 -2.03% 。

表 8 基于 GM(1,1)模型的 2015—2020 年南京市农地利用碳排放预测结果

年份	2015	2016	2017	2018	2019	2020
预测值/ 10^5 t	1.23	1.20	1.15	1.18	1.13	1.11

进一步用 SPSS 的曲线回归分析来进行时间序列的趋势分析,选择 2012—2020 年的碳排放量为因变量,年份为自变量(表 9)。表 9 显示,各模型方程的 sig 都不大于 0.01,显著性较强,指数曲线的拟合优度最高。农地利用碳排放量继续保持下降趋势,但底数过小下降程度小,远不足以弥补建设占用导致碳排放量的增加。

表 9 模型汇总和参数估计值

方程	模型汇总					参数估计值			
	相关系数平方	统计量 F	回归自由度 df_1	残留自由度 df_2	sig.	常数	b_1	b_2	b_3
线性	0.994 0	1 168.110	1	7	0.000	511.003	-0.248		
二次	0.994 0	1 168.245	1	7	0.000	261.524	0.000	-6.138E-5	
三次	0.994 0	1 168.249	1	7	0.000	178.364	0.000	0.000	-2.030E-8
指数	0.994 3	1 219.183	1	7	0.000	1,257E19	-0.021		

3 结论

(1) 南京都市农业农地利用碳排放量呈“上升—波动—平稳下降”的 3 阶段特征,由 1996 年的 2.04×10^5 t 减少至 1.26×10^5 t,增长了一 0.38 倍,年均增长率达到 -2.64%。从各生产要素碳排放量构成份额看,化肥、农药、农膜、农用柴油、灌溉、翻耕碳排放量占总排放量的比重均值依次为 63.8%, 10.6%, 14.2%, 8.0%, 2.7%, 0.5%。1996—2014 年化肥、农药施用量下降,并且化肥对碳排放量减少的贡献超过百分之百;农膜使用量增加,其导致的碳排放量于 2004 年超过农药,成为排放量占比第二的物质投入;翻耕、农用柴油、灌溉带来的碳排放量变化不明显,有不同程度的增加或减少。

(2) 纵向来看林地碳汇、草地碳汇有所下降,但变化趋势不同,园地碳汇有所增加。林地碳汇从 2005 年的 3.62×10^4 t 下降到 2014 年的 3.52×10^4 t,呈现波动下降的态势,多数年份间“上升—下降”趋势交替显现,2005—2008 年下降趋势最为明显。随着南京市草地面积的减少,草地碳汇呈现下降趋势,从 1.07 t 骤降至 0.36 t。园地碳汇从 2005 年的 2.0×10^3 t 增长到 2014 年的 2.3×10^3 t,增长 18.01%。南京市都市农业的发展极大的繁荣了当地的果蔬种植,对碳汇增加有明显的正向促进作用。横向来看,由于各区承载的城市功能不同,区域碳汇差异较大。

(3) 农地利用方式改变的碳效应来看,2000—2008 年,南京市因生态退耕产生碳汇呈先上升后下降的变化趋势,2002 年达到最大值 71.29 t,而 2007 年以来产生碳汇不足 10 t;相反,建设占用导致的碳排放量由 2000 年的 8.30×10^3 t 上升至 2008 年的 4.49×10^4 t,年均增长率高达 23%,变化趋势呈现 Z 字形上升,前后变化趋势相对小,中间波动剧烈。尽管预计到 2020 年该市农地利用碳排放量将下降到 1.11×10^5 t,整体保持下降趋势,但底数过小下降程度小,远不足以弥补建设占用导致碳排量的增加。

(4) 南京市农地利用碳排放的变化趋势与经济发展和都市农业发展进程密切相关。一方面,二三产

业的繁荣发展减少了生产资料的需要,并且都市农业指导思想下的农业生产对化肥农药的施用量有所控制,减少了农地利用碳排放量,园地面积扩大、休闲农业繁荣发展增加了碳汇量;另一方面,农业机械化、集约化发展,柴油、农膜等农业生产资料的使用导致的碳排放也不可忽视,林地、草地面积的减少降低了原本不高的碳汇效应,由于经济发展与城市建设需要,持续增长的建设占用造成大量碳排放对南京市碳效应影响巨大。

[参 考 文 献]

- [1] 徐慧慧. 南京都市农业发展的实证研究[D]. 江苏 南京: 南京农业大学, 2010.
- [2] 陈俊红, 姜翠红, 李红. 都市型现代农业低碳经济进程评价及建议: 以大兴区为例[J]. 生态经济: 学术版, 2011(1): 303-306.
- [3] 田云, 李波, 张俊飏. 我国农地利用碳排放的阶段特征及因素分解研究[J]. 中国地质大学学报: 社会科学版, 2011, 11(1): 59-63.
- [4] 李俊杰. 民族地区农地利用碳排放测算及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(9): 42-47.
- [5] 张勇, 张乐勤, 汪应宏, 等. 安徽省池州市土地利用碳排放演变及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 216-223.
- [6] 张婷. 江西省农地利用碳排放效应及碳减排对策研究[D]. 江西 南昌: 西农业大学, 2014.
- [7] 屈宇宏. 城市土地利用碳通量测算、碳效应分析及调控机制研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [8] 黎孔清. 低碳经济导向的区域土地利用评价与结构优化研究[D]. 湖北 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [9] 朱亚红, 马燕玲, 陈秉谱. 甘肃省农地利用碳排放测算及影响因素研究[J]. 农业现代化研究, 2014(2): 248-252.
- [10] 尹希果, 霍婷. 国外低碳经济研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 18-23.
- [11] 韦献斌. 低碳经济视角下的低碳农业发展战略浅述[J]. 现代经济信息, 2016(1): 373.
- [12] 付加锋, 庄贵阳, 高庆先. 低碳经济概念辨析及评价指标体系构建[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(8): 38-43.

- 法的比较[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3): 31-34.
- [19] 缪驰远, 徐霞, 魏欣, 等. 重庆市主城区降雨侵蚀力特征分析[J]. 资源科学, 2007, 29(4): 55-60.
- [20] Lee J H, Heo J H. Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(1/2): 30-48.
- [21] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, 157(1/4): 287-306.
- [22] Richardson C W, Forster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount [J]. *Transaction of the ASAE*, 1983, 26(1): 153-156.
- [23] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [24] Angulo M M, Begueria S. Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain) [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 379(1/2): 111-121.
- [25] 杨轩, 梁音, 方继青, 等. 基于日降雨信息的月降雨侵蚀力模型[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 216-222.
- [26] 殷水清, 谢云, 王春刚. 用小时降雨资料估算降雨侵蚀力的方法[J]. 地理研究, 2007, 26(3): 541-547.
- [27] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力 [J]. 资源科学, 2003, 25(1): 35-41.
- [28] 马良, 姜广辉, 左长清, 等. 江西省 50 余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 61-68.
- [29] 赖成光, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-167.
- [30] Xin Zhongbao, Yu Xinxiao, Li Qingyun, et al. Spatio-temporal variation in rainfall erosivity on the Chinese Loess Plateau during the period 1956—2008 [J]. *Regional Environmental Change*, 2011, 11(1): 149-159.
- [31] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009 年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256.

(上接第 294 页)

- [13] Holtz eakin D, Se lden T M. Stoking the Fires? CO₂ Emissions and Economic Growth [J]. *ournal of Public Economics*, 1995, 57(1) : 85-101.
- [14] Shafik N, Bandyopadhyay S. Economic Growth and Environmental Quality: Time Series and Cross-Country Evidence [R]. Washington: The World Bank, World Development Report Working Paper WPS 904, 1992.
- [15] 张永青, 沈建华. 实施品牌战略发展都市农业: 南京市农林局局长安开根畅谈农业创牌 [J]. 江苏农村经济, 2006(8): 20-23.
- [16] 王琿. 南京都市农业发展研究 [D]. 江苏 南京: 南京农业大学, 2010.
- [17] 市政府关于印发南京市“十三五”现代农业发展规划的通知 [EB/OL]. (2016-07-20) [2017-2-17]. http://www.njaf.gov.cn/26500/27111/27113/201607/t20160726_4050126.html.
- [18] 南京市农业概况 [EB/OL]. (2015-02-16) [2017-2-17]. <http://www.njaf.gov.cn/26500/27088>.
- [19] 陈诗一. 中国各地区低碳经济转型进程评估 [J]. 经济研究, 2012(8): 32-44.
- [20] West T O, Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbone missions, and net carbon flux in agriculture: Comparing tillage practices in the United States [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2002, 91(1/3): 217-232.
- [21] 智静, 高吉喜. 中国城乡居民食品消费碳排放对比分析 [J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 429-434.
- [22] 伍芬琳, 李琳, 张海林, 等. 保护性耕作对农田生态系统净碳释放量的影响 [J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2035-2039.
- [23] Dubey A, Lal R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, India and Ohio, USA [J]. *Journal of Crop Improvement*, 2009, 23(4): 332-350.
- [24] 黄贤金. 区域产业结构变化的碳排放效应研究: 以江苏省为例 [C]. 江苏 南京: 中国地理学会 2007 年学术年会论文摘要集, 2007.
- [25] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 等. 1981—2000 年中国陆地植被碳汇的估算 [J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2007, 37(6): 804-812.
- [26] 张永波. 基于灰色系统理论的预测模型的研究 [D]. 黑龙江 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.