

# 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测<sup>①</sup>

禹康康<sup>1</sup>, 王延华<sup>1, 2, 3\*</sup>, 孙恬<sup>1</sup>, 田甲鸣<sup>1</sup>

(1 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023; 2 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

**摘要:** 太湖流域地处长三角中心区域, 人类活动剧烈导致生态环境退化和碳排放量上升。为探究土地利用变化对碳排放量的影响, 利用 ArcGIS 软件, 结合土地利用转移概率矩阵, 依据 2000 年、2005 年、2010 年和 2020 年 4 期太湖流域遥感影像数据, 对太湖流域各历史时期 (2000—2020 年) 不同土地利用类型下碳排放进行了分析。同时, 为预测土地利用变化对流域碳收支的影响, 借助 IDRISI 软件对 2030—2040 年土地利用进行模拟, 采用碳收支系数估算法对流域土地利用/覆被变化及其碳排放进行了预测。研究结果表明, 太湖流域碳净排放量呈现逐年增加的趋势, 不同土地利用方式下碳排放量不同, 其中建设用地对碳排放量贡献最大, 远超耕地, 且呈现不断增加趋势。预测结果显示, 2030—2040 年碳排放强度趋于平缓走向, 说明产业结构逐步调整, 治理措施已见成效。

**关键词:** 太湖流域; 土地利用转移概率矩阵; 马尔科夫(Markov)预测模型; 碳收支; 碳排放变化

中图分类号: F301.2 文献标志码: A

## Changes and Prediction of Carbon Emission from Different Land Use Types in Taihu Lake Basin

YU Kangkang<sup>1</sup>, WANG Yanhua<sup>1,2,3\*</sup>, SUN Tian<sup>1</sup>, TIAN Jiaming<sup>1</sup>

(1 School of Geography, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment of Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** The Taihu Lake basin is located in the central area of the Yangtze River Delta. Enhanced human activities has led to the degradation of ecological environment and the increase of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) emission. To explore the impact of land-use change on  $\text{CO}_2$  budge, the ArcGIS software was used to analyze the  $\text{CO}_2$  fluxes under different land use types in the Taihu Lake basin during 2000—2020. The remote sensing image data of 2000, 2005, 2010 and 2020 combined with the land use transfer probability matrix were compared. The IDRISI software was used to predict the land-use changes from 2030 to 2040.  $\text{CO}_2$  emissions in the basin were calculated by  $\text{CO}_2$  budget coefficient estimation method. The results showed that net  $\text{CO}_2$  emission in the Taihu Lake basin has increased year by year.  $\text{CO}_2$  flux is different under different land use types. Among them, the constructed land contributed the most to net  $\text{CO}_2$  emission, far more than the farmland and with an increasing trend. The intensity of  $\text{CO}_2$  emission showed a gentle trend during 2030—2040, reflecting the positive results of gradually adjusted industrial structure and controlled measures.

**Key words:** Taihu Lake basin; Land-use transfer probability matrix; Markov forecasting model; Carbon budge;  $\text{CO}_2$  emission

近些年来关于土地利用/覆被变化 (LUCC) 的研究一直是热点问题, 研究涉及 LUCC 对水环境、土壤、大气等诸多方面的影响, 大多聚焦于对 LUCC 的空间分布以及变化过程进行评估、预测和影响分析<sup>[1]</sup>。随着人类活动强度和广度的增加, LUCC 对碳库的影响

逐渐受到关注<sup>[2]</sup>。据报道, 由 LUCC 引起的碳排放量占人类活动碳排放总量的 1/3<sup>[3]</sup>, 对温室效应贡献率约为 24%<sup>[4]</sup>。我国  $\text{CO}_2$  排放量呈逐年增长趋势, 对世界碳排放总量的贡献居于第二位<sup>[5]</sup>, 面临着巨大的环境压力。特别是 21 世纪以来, 太湖流域社会经济飞

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41673107)和江苏省教育厅重大项目(20KJA170001)资助。

\* 通讯作者(wangyanhua@njnu.edu.cn)

作者简介: 禹康康(1997—), 男, 山东德州人, 硕士研究生, 主要从事流域生态环境演变研究。E-mail: 201302021@njnu.edu.cn

速发展, 建设用地不断扩张, 挤占其他土地利用类型的空间, 土地利用类型的变化刺激了碳排放<sup>[6]</sup>。目前研究大多是基于统计学和文献荟萃的方法, 选用碳排放系数进行分析<sup>[7-8]</sup>, 对流域土地利用变化趋势下碳排放量预测及对碳达峰时间的响应研究较少。为响应国家“碳达峰”和“碳中和”战略目标, 引导流域低碳发展, 本文通过对太湖流域 2000—2020 年土地利用数据进行动态度、状态指数和转移概率计算, 量化流域不同历史时期土地利用变化导致的碳排放变化, 并在此基础上, 应用马尔科夫模型预测 2030—2040 年期间土地利用碳排放量的变化趋势, 以给出流域土地利用管理建议与碳减排对策, 为太湖流域土地利用规划的制订提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

太湖流域位于长三角地区, 河网密集, 东北向与长江连通(图 1)。流域行政区划上包含江苏省苏、锡、常三市和丹阳市, 浙江省嘉兴市、湖州市和杭州部分县, 上海市的大部分及安徽省小部分县区, 流域总面积约 36 900 km<sup>2</sup><sup>[9]</sup>。结合国家土地利用现状分类(GB/T21010—2017)<sup>[10]</sup>, 将太湖流域土地利用类型分为 5 大类: 耕地、林地、草地、水域和建设用地。流域 80% 的平原区以耕地和建设用地为主<sup>[11]</sup>。近年来, 随着社会经济发展和城镇化率的提高, 太湖流域人地矛盾和生态环境问题日益严峻<sup>[12]</sup>。

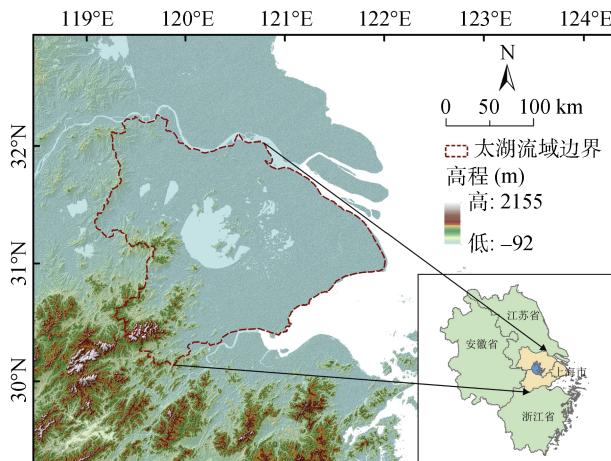


图 1 太湖流域区位图  
Fig. 1 Location of Taihu Lake basin

### 1.2 数据来源与不确定性分析

本文基于 2000 年、2005 年、2010 年和 2020 年 4 期 30 m×30 m 太湖流域土地利用数据(国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站,

<http://www.globeland30.org>), 采用 ArcGIS10.6 进行空间配准和叠置分析, 在 IDRISI 17.0 软件中制作适宜性图集<sup>[13]</sup>, 进行模拟及碳收支估算。本文采用的碳排放系数来源: 建设用地、耕地、林地的碳排放系数为国家自然资源部<sup>[14]</sup>公布的系数值, 草地碳汇系数出自文献[15-16]对中国陆地植被碳汇的估算, 是中国草地年均碳汇与总面积的比值, 水域碳汇系数来自文献[17]。建设用地碳排放源包括居住区取暖、交通尾气排放、工矿用地工艺排放等; 耕地碳排放源考虑化肥、农药、农膜、农机、柴油等的使用。

由于参数选取与取值会对研究结果产生不同程度的误差, 存在一定的不确定性, 所以在估算前本文采用水晶球软件 Crystal Ball 对参数进行蒙特卡洛(Monte Carlo)不确定性分析<sup>[18]</sup>, 定义假设: 设定各排放因子的分布状态是正态分布, 然后对土地利用造成的总碳排放量进行定义预测。软件运行 10 000 次假设实验, 得到排放量正态分布曲线, 置信区间取 2.5% 的和 97.5% 的值, 两者之差为平均值。相对正的随机抽样误差由 97.5% 处的值和平均值的差除以平均值得出, 相对负的随机抽样误差则由 2.5% 处的值和平均值之差除以平均值得出。以某一年数据为例进行分析计算出相对负的随机抽样误差为 -19.76%, 相对正的随机抽样误差为 19.79%, 因此, 基于平均值的相对随机误差为 -19.76% ~ +19.79%。

### 1.3 土地利用与碳排放算法

**1.3.1 土地利用动态度算法** 单一土地利用动态度<sup>[19]</sup>是描述不同土地利用类型在一定时间段内的变化速度和幅度的指标, 能直观反映某一土地利用类型相对于自身变化程度和速度的剧烈性, 进而反映出人类活动对单一土地利用类型的影响, 算法见公式(1)。利用此模型可对研究区内各种土地利用类型之间的变化速度作分析比较。

$$M = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $M$  为研究时段内单一土地利用动态度(%),  $M$  若为正值, 则该类土地面积有增大趋势, 反之有减少趋势;  $m_1$  和  $m_2$  是研究期初和期末某一土地类型数量(hm<sup>2</sup>);  $T$  为研究时段(a)。

土地利用状态指数<sup>[20]</sup>能够反映土地利用类型转换趋势和状态, 计算公式见式(2)。

$$D_i = \frac{v_{\text{转出}} - v_{\text{转入}}}{v_{\text{转出}} + v_{\text{转入}}} \quad (-1 < D_i < 1) \quad (2)$$

式中:  $D_i$  为研究时段内第  $i$  种土地利用类型的状态指数;  $v_{\text{转入}}$  为土地利用类型的转入速度,  $v_{\text{转出}}$  为土地利

用类型的转出速度。

**1.3.2 碳收支系数与计量方法** 太湖流域碳收支系数见表 1, 其中正为碳排放, 负为碳吸收。土地利用碳排放与吸收量计算方法<sup>[21]</sup>如式(3)。

$$C_i = S_i \times K_i \quad (3)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳吸收量或碳排放量(t);  $S_i$  为第  $i$  种土地利用类型的面积( $\text{hm}^2$ );  $K_i$  为第  $i$  种土地利用类型的碳吸收/排放系数( $t/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )。

表 1 土地利用碳收支系数( $t/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )

Table 1 Carbon budget coefficients of different land use types

土地利用类型	碳吸收系数	碳排放系数	碳效应
林地	-0.49	-	碳汇
草地	-0.02	-	碳汇
水域	-0.46	-	碳汇
建设用地	-	65.30	碳源
耕地	-	0.37	碳源

**1.3.3 土地利用预测方法** 本文采用 IDRISI 17.0 软件进行 LUCC 预测分析, 预测流程如图 2 所示。将数据在 ArcGIS 中标准化处理后导入 IDRISI 中重分类。运用 IDRISI 对 CA-Markov 模型整体精度进行评

估<sup>[22]</sup>, 精度结果为 0.89, 可用于预测。

太湖流域坡度范围为  $0\sim 82^\circ$ , 高坡度区集中于西南方向的山地和丘陵, 呈现周边高中间低的凹形地势。由于西南向的高坡度区会对土壤侵蚀及水土流失产生较大影响进而影响污染物迁移, 考虑利用坡度来避免演变方向朝不适宜坡度区发展, 故本研究选取坡度作为土地利用类型适宜性图集评价因子。制作耕地适宜性图采用最小因子决定法。太湖流域适合耕地作业的坡度为  $<15^\circ$ , 将坡度用重分类工具分为 0 和 1 两类(作为 MCE 多准则评价标准方法之一的布尔交集运算中, 1 代表满足需要区域, 0 代表除此以外的区域), 水域为非耕区, 设为 0, 代表限制耕地向水域发展, 叠加得到除去水域后适宜耕地发展的适宜性图。同理考虑适合建设用地发展的坡度为  $<10^\circ$ ; 草地和林地满足所有坡度条件。将得到的各适宜性图组合成研究区适宜性图集。随后在 Markov 模块中导入各时期土地利用图, 误差因子设为 0.15, 得到不同时期各土地利用类型转移概率矩阵。在 CA-Markov 模块中导入初始土地利用图和转移概率矩阵, 元胞自动机迭代次数为年份间隔的整数倍, 从而得预测年份土地利用图。

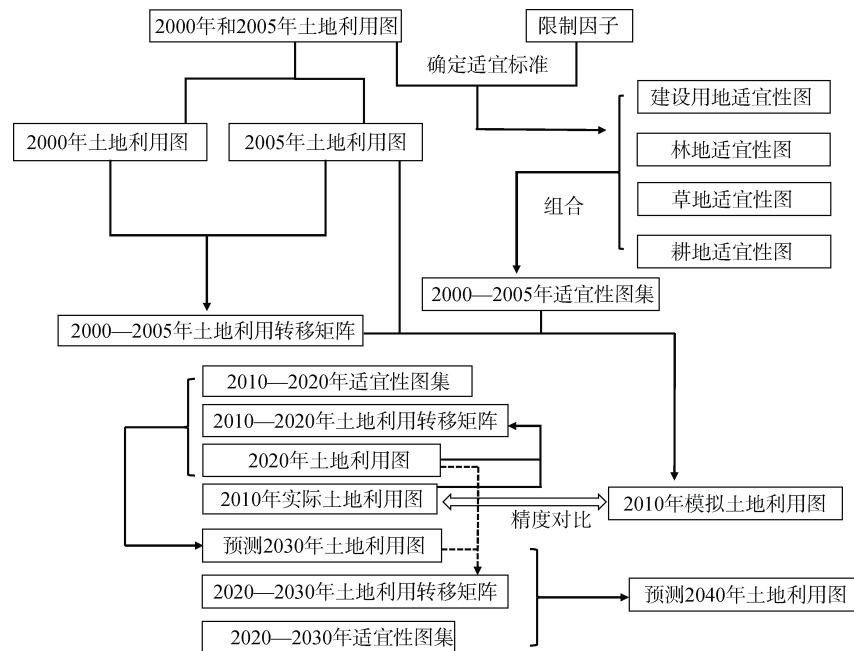


图 2 土地利用预测流程  
Fig. 2 Land use prediction process

**1.3.4 马尔科夫(Markov)预测模型** Markov 预测是一种定量揭示各土地利用类型之间相互转化和转移速率变化的模型<sup>[23]</sup>。确定土地利用类型间相互转化的初始转移概率矩阵  $P$  是模型的关键<sup>[24]</sup>, 其数学表达式为公式(4)。

$$P = (P_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{12} & \dots & P_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $P$  为期初到期末一种土地类型转为另一种类型

的概率,  $N$  为土地利用类型的数量,  $P$  和  $N$  要满足公式(5)的条件。

$$0 \leq P_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^N P_{ij} = 1 \quad (5)$$

因此, 所要预测的土地利用的状态概率向量  $P(n)$ , 由其初始土地利用状态概率向量  $P(n-1)$  和转移概率矩阵  $P_{ij}$  确定<sup>[25-26]</sup>, 具体见公式(6)。

$$P(n) = P(n-1)P_{ij} \quad (6)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖流域土地利用变化特征及动态度

2000—2020年, 太湖流域土地利用类型变化最大的是建设用地和耕地(图3)。在此期间, 建设用地

和水域面积分别增长了 87.66% 和 22.35%, 耕地和林地面积分别减少了 25.61% 和 9.38%。

土地利用动态度结果表明, 两个时间段内草地、水域和建设用地面积均有增加趋势, 林地和耕地面积有减少趋势(图4A)。草地动态度变化最大, 从 0.30% 变化到 26.36%, 动态度增加 26.06 个百分点; 其次是建设用地, 动态度从 7.61% 变化到 0.68%, 减少 6.93 个百分点。草地呈现先转出后转入趋势, 林地呈现先转入后转出趋势, 建设用地一直处于转入状态, 相反耕地则一直处于转出状态(图4B)。

土地利用转移概率矩阵(表2)显示, 2000—2020 年太湖流域各类用地之间互有转换。其中, 2000—2005 年耕地主要转入类型为建设用地和林地, 主要

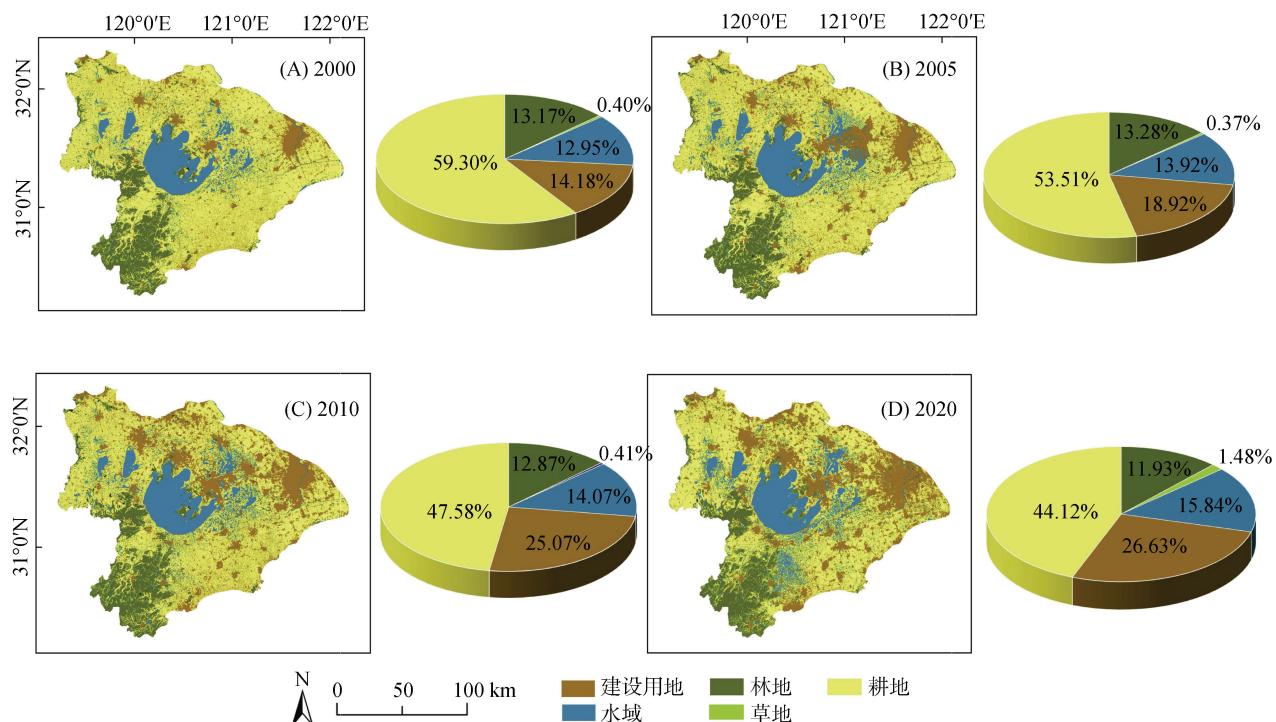


图3 2000—2020年太湖流域不同土地利用类型面积占比变化(%)  
Fig. 3 Proportions of different Land use type in Taihu Lake basin during 2000—2020

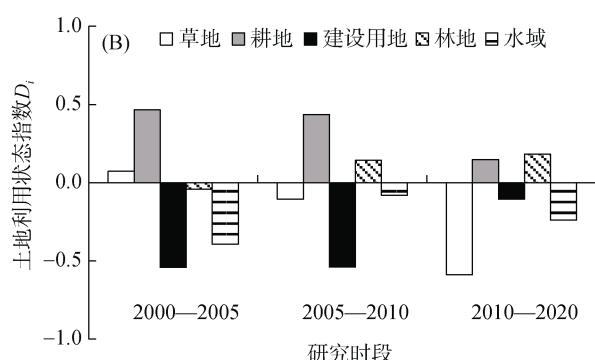
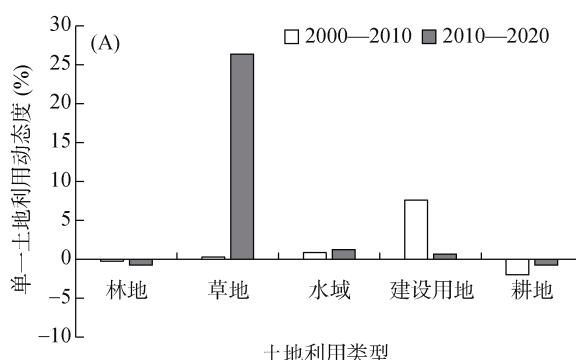


图4 单一土地利用动态度及土地利用状态指数  
Fig. 4 Single land use dynamics and land use status index

表 2 土地利用转移概率矩阵  
Table 2 Transfer probability matrix of land use

年份	土地利用类型	草地	耕地	建设用地	林地	水域
2000—2005 年	草地	0.48	0.07	0.02	0.39	0.04
	耕地	0.00	0.70	0.21	0.04	0.05
	建设用地	0.01	0.24	0.73	0.01	0.01
	林地	0.02	0.18	0.02	0.77	0.01
	水域	0.01	0.13	0.04	0.02	0.80
2005—2010 年	草地	0.52	0.06	0.04	0.36	0.02
	耕地	0.00	0.69	0.25	0.03	0.03
	建设用地	0.01	0.24	0.73	0.01	0.01
	林地	0.04	0.16	0.05	0.74	0.01
	水域	0.00	0.10	0.09	0.01	0.80
2010—2020 年	草地	0.07	0.18	0.06	0.61	0.08
	耕地	0.01	0.61	0.23	0.04	0.11
	建设用地	0.01	0.32	0.61	0.02	0.04
	林地	0.07	0.21	0.05	0.65	0.02
	水域	0.01	0.24	0.06	0.01	0.68

转出类型为建设用地和水域;建设用地主要转入类型为耕地和水域, 主要转出类型为耕地; 2005—2010 年建设用地转为耕地的概率与前 5 年持平, 而耕地转为建设用地的概率增加了 0.4, 说明这一时期城市化进程在加快; 2010—2020 年, 耕地转为建设用地的概率降至 0.23, 相较于 2005—2010 年期间降低了 0.02, 而建设用地转为耕地的概率增至 0.32, 增幅较大, 推测可能与国家实施建设用地管控及基本农田保护政策关系较大。

各时间段内土地利用变化面积与变化率见表 3。建设用地面积年变化率较大且始终为正, 说明建设用

地面积持续在增加, 近 10 年来增幅有放缓趋势, 说明政府对建设用地的管控收到了效果; 与之相反的是耕地面积年变化率较大且为负, 持续在减少, 近 10 年来降幅变缓; 草地年变化率由负转正, 面积由减少转变为增加, 可能与退耕还草和湖滨带建设有关; 林地呈现先增加后减少趋势, 变化幅度不大; 水域面积缓慢增加, 可能与流域调水有关。综上, 近 20 年来人类活动对太湖流域耕地和建设用地影响最大, 对林地、草地和水域也有不同程度影响。该研究结果与土地利用状态指数变化指示结果一致。

表 3 太湖流域土地利用类型变化幅度  
Table 3 Change magnitude of land use types in Taihu Lake basin

土地利用类型	2000—2005 年		2005—2010 年		2010—2020 年	
	变化面积( $\text{hm}^2$ )	年变化率(%)	变化面积( $\text{hm}^2$ )	年变化率(%)	变化面积( $\text{hm}^2$ )	年变化率(%)
草地	-841.32	-1.45	1 269.27	2.10	38 884.80	5.89
耕地	-209 536.56	-9.32	-214 756.02	-8.72	-125 207.25	-1.49
建设用地	170 839.98	10.84	218 931.30	10.81	61 765.45	1.06
林地	4 180.14	0.85	-14 907.24	-2.85	-34 323.09	-1.82
水域	35 129.07	7.87	5 440.95	1.62	64 320.44	2.40

## 2.2 2030—2040 年太湖流域土地利用预测

为预测太湖流域 2030—2040 年土地利用类型, 本研究构建 CA-Markov 预测模型并采用 2000—2005 年土地利用图对 2010 年进行预测, 输出结果与 2010 年实际土地利用作叠置分析来进行精度检验<sup>[27]</sup>: 运用 ArcGIS 中的“相交”模块和 IDRISI 的“CROSSTAB”模块, 进行 Kappa 系数检验。从表 4 和图 5 对比结

果可知, CA-Markov 模型 Kappa 系数为 0.85, 模拟结果精度较高, 与实测值差别较小。

2030 年和 2040 年土地利用预测分别依据 2010—2020 年和 2020—2030 年土地利用数据结合 CA-Markov 模型模拟得到。2030—2040 年太湖流域土地利用预测图如图 6 所示, 预计草地、水域和建设用地处于增长状态, 林地和耕地处于不断减少状态。

表 4 2010 年土地利用实际与模拟结果对比

Table 4 Comparison of real and simulated land use patterns in 2010

土地利用类型	林地	草地	水域	建设用地	耕地
实际占比(%)	12.87	0.41	14.07	25.07	47.58
模拟占比(%)	12.48	0.53	14.47	24.21	48.31
差值(%)	0.39	-0.12	-0.40	0.86	-0.73

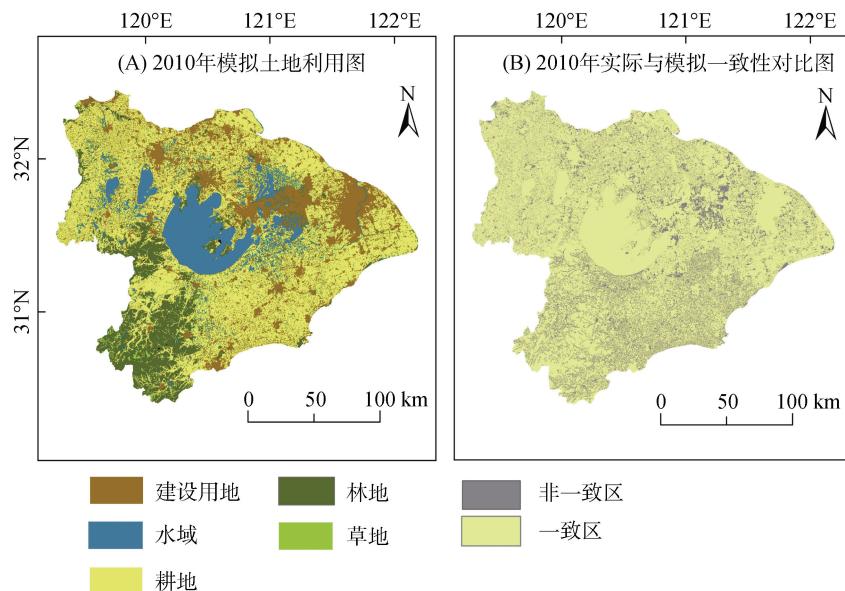


图 5 2010 年土地利用类型实际分布和模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of real and simulated land use spatial distribution in 2010

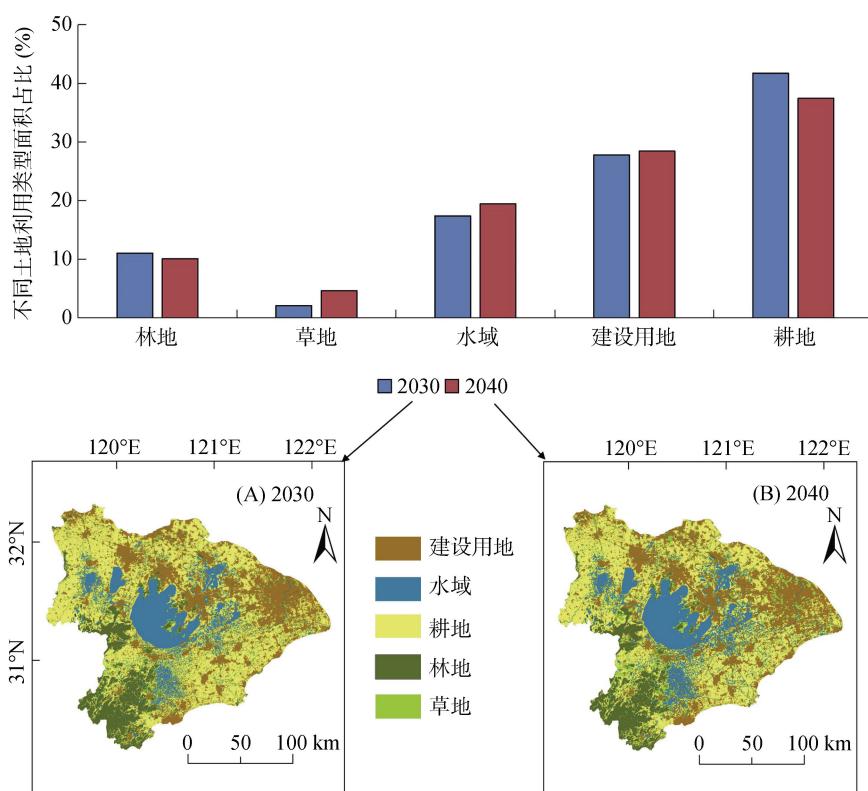


图 6 CA-Markov 模拟下的 2030—2040 年土地利用图及面积占比

Fig. 6 Land use map of 2030—2040 under CA-Markov simulation and proportion of land use

### 2.3 基于土地利用的流域碳收支历史变化及其发展趋势

由土地利用类型转移矩阵结合碳排放系数发现, 各类间转移碳排放量与转向地类碳汇能力相关。对太湖流域整个研究期土地利用造成的碳排放转移情况进行分析, 结果(表 5)表明, 建设用地转出导致碳

表 5 2000—2040 年各土地利用类型碳排放转移矩阵( $t$ )  
Table 5 Transfer matrix of carbon emission of land use types from 2000 to 2040

土地利用类型	草地	耕地	建设用地	林地	水域	转出
草地	0.00	-36.09	-14.90	-175.08	-33.16	-259.23
耕地	32 679.75	0.00	235 850.01	7 735.26	98 440.93	374 705.95
建设用地	1 872 047.83	7 260 933.59	0.00	152 707.97	1 774 031.22	11 059 720.61
林地	-18 659.81	-36 947.33	-10 975.26	0.00	-4 076.69	-70 659.09
水域	-4 395.44	-14 974.34	-11 710.78	-508.97	0.00	-31 589.52
转入	1 881 672.33	7 208 975.83	213 149.08	159 759.18	1 868 362.29	-
增减变化	1 881 413.10	7 583 681.78	11 272 869.68	89 100.08	1 836 772.77	22 663 837.41

汇增加最大, 林地转出导致碳流失最多。林地是主要的碳汇地类, 向建设用地和耕地转移使得碳汇减少。虽然碳源地类向碳汇地类进行转化, 但是不及建设用地扩张的速度以及各碳汇地类向建设用地转换的速度。

从太湖流域 2000—2040 年各土地利用类型碳排放量(表 6)可知, 2000—2020 年, 建设用地碳排放量增加了 2 948.05 万 t, 在碳源中的比例从 97.68% 增加到 2020 年的 99.07%, 对净碳排放量贡献率增幅较小(98.97% ~ 99.82%); 耕地碳排放量从 79.43 万 t 减少到 59.09 万 t, 减少了 25.61%。耕地在 2000 年和 2020 年碳源中的比例分别为 2.32% 和 0.93%, 建设用地的贡献率远超耕地。2020—2040 年, 建设用地碳排放量增加 426.83 万 t, 总体呈现上升趋势, 对碳源的贡献较大(99.07% ~ 99.26%); 耕地碳排放量减少 8.95 万 t, 对碳源的贡献为 0.74% ~ 0.93%。在碳汇方面, 2000—2020 年, 水域、林地和草地吸收对碳汇的贡献分别为 47.97% ~ 55.35%、44.41% ~ 51.96% 和 0.06% ~ 0.23%; 2020—2040 年, 分别为 55.35% ~ 63.94%、35.37% ~ 44.41% 和 0.24% ~ 0.69%。

表 6 太湖流域 2000—2040 年各土地利用类型碳排放量  
(万 t)

Table 6 Carbon emissions under different Land use types in Taihu Lake basin from 2000 to 2040

年份	林地	草地	水域	建设用地	耕地
2000	-23.36	-0.03	-21.56	3 345.29	79.43
2005	-23.56	-0.03	-23.18	4 460.87	71.68
2010	-22.83	-0.03	-23.43	5 890.50	63.73
2020	-21.17	-0.11	-26.38	6 293.34	59.09
2030	-19.58	-0.16	-28.93	6 564.30	55.90
2040	-17.90	-0.35	-32.36	6 720.17	50.14

碳源、碳汇差值即碳收支<sup>[28]</sup>。太湖流域 2000—2040 年各土地利用类型的碳收支见表 7。2000—2020 年, 太湖流域土地利用净碳排放量增长了 0.87 倍

(3 379.77 万 t ~ 6 719.70 万 t), 碳源/碳汇的比值升高了 0.75 倍(76.19 ~ 133.77)。林地、草地和水域具有碳汇作用, 因该阶段其面积变化不大导致流域碳汇变化较小。碳源变幅较大, 主要是由于 2000 年以来经济迅猛发展, 城镇化进程加快, 导致建设用地不断扩张带来碳排放量增加。从模型预测的结果可以看出, 太湖流域 2020 年以后碳排放量增速比较缓慢, 净碳排放量呈现缓慢上升趋势, 说明未来国家的管控政策和人们对于环境保护的重视程度将越来越大。

表 7 太湖流域 2000—2040 年各土地利用类型碳源碳汇量  
(万 t)

Table 7 Carbon source and sink of land use types in Taihu Lake basin from 2000 to 2040

年份	碳源	碳汇	碳源/碳汇	净碳排放量
2000	3 424.72	44.95	76.19	3 379.77
2005	4 532.55	46.77	96.91	4 485.78
2010	5 954.23	46.30	128.60	5 907.93
2020	6 352.43	47.67	133.26	6 304.76
2030	6 620.20	48.67	136.02	6 571.53
2040	6 770.31	50.61	133.77	6 719.70

地均碳排放强度指的是研究区域单位土地面积上的净碳排放量, 该值大小反映了研究区域内土地利用的环境友好性, 在一定土地面积下, 该值越小, 即单位土地面积上的碳排放强度越小, 研究区域内的环境越友好<sup>[29]</sup>。2000—2020 年, 太湖流域地均碳排放强度整体呈上升趋势(9.34 ~ 17.42 t/hm<sup>2</sup>), 说明土地利用环境友好性不断下降; 但 2020 年以后上升速度放缓, 碳排放强度走向不断趋于平缓甚至下降(图 7)。

### 3 讨论

为应对气候变化, 习主席在联合国大会上提出“2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和<sup>[30]</sup>”的目标, 这也是“十四五”的重点任务。太湖流域耕地和建设用地占主导, 耕地面积逐年下降, 建设用地处

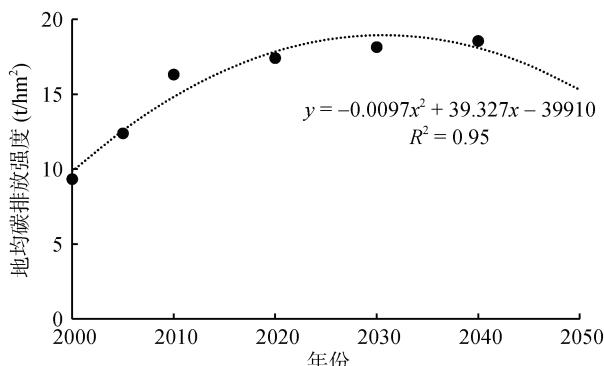


图 7 地均碳排放强度

Fig. 7 Average land area carbon emission intensity

于不断扩张状态。随着城市进程发展,城市扩张速度不断减缓,本预测结果显示,太湖流域由土地利用类型变化所导致的碳排放量处于不断平稳的状态,预计在2030—2040年间达到土地利用的碳达峰。要实现碳达峰和碳中和的未来土地利用变化目标需求,可通过构建土地利用结构优化线性模型,制定模糊约束条件,结合LINGO软件求解碳排放量最小化目标下各决策变量最优解,进而得到响应碳达峰的各土地利用面积,来优化流域土地利用格局。

太湖流域土地利用变化同时受三省一市国土空间规划管控,规划重心都落在“划定永久基本农田、明确城乡建设用地集约利用”上。在2021年5月30日的中国城市规划学会议中,有学者提出未来太湖流域蓝绿空间应不低于68%,河湖水面率增至22%,以太湖为生态核心区,构建长三角一体化示范区水网生态廊道。土地利用碳排放增加的重要原因是建设用地扩张导致非建设用地缩减,本研究预测显示,到2040年太湖流域建设用地、林草地和水域面积分别占28.43%、19.43%和14.71%,实现蓝绿空间目标任重而道远。基于此,一是建议政府部门对国土空间格局有计划地调控,按碳减排和碳增汇目标合理规划各类用地发展,适当将建设用地向其他用地转移,及时评估未来建设用地扩张所产生的碳排放,同时也结合还林还草政策,规划林草地和水域的修复保护;二是人类活动作为土地利用碳排放变化的重要驱动力,可通过植树造林、提倡节能减排等措施来抵消碳源产生的碳排放量,实现“零排放”。

#### 4 结论

1)2000年以来,太湖流域耕地不断减少,耕地面积从59.30%(2000年)降低到44.12%(2020年);建设用地不断扩张,面积从14.18%(2000年)增加到26.63%(2020年),各类用地间转换速率逐年变化。

2)Markov模型预测结果表明,到2040年太湖流域耕地面积进一步降低至37.43%,建设用地面积小幅增至28.43%,水域和草地仍处于增长状态,林地面积不断下降。

3)太湖流域碳排放总量和净碳排放量均逐年增加,不同土地利用方式碳排放量不同,建设用地贡献最大(>95%)。碳排放强度趋于平缓,预测未来环境治理水平日渐提高,土地利用结构优化已见成效。

#### 参考文献:

- [1] 郑荣宝, 卢润开, 唐晓莲, 等. 1998—2016年全球LUCC研究进展与热点分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 591–601.
- [2] 付超, 于贵瑞, 方华军, 等. 中国区域土地利用/覆被变化对陆地碳收支的影响[J]. 地理科学进展, 2012, 31(1): 88–96.
- [3] 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.
- [4] Klein Goldewijk K, Ramankutty N. Land cover change over the last three centuries due to human activities: The availability of new global data sets[J]. GeoJournal, 2004, 61(4): 335–344.
- [5] 庄贵阳. 低碳经济 中国之选[J]. 中国石油石化, 2007(13): 32–34.
- [6] 余雪振. 武汉市土地利用变化碳排放效应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- [7] 张若楠, 杨瑾. 陕西省土地利用碳排放与碳足迹研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(5): 126–130.
- [8] 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.
- [9] 欧维新, 刘翠, 陶宇. 太湖流域水供给服务供需时空演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(3): 623–633.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [11] 高斌, 许有鹏, 王强, 等. 太湖平原地区不同土地利用类型对水质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1186–1191.
- [12] 张倩玉. 太湖流域土地利用与水系变化及其对水质的影响研究——以锡澄地区为例[D]. 南京: 南京大学, 2016.
- [13] 李函娇. IDRISI 支持的榆林多目标土地利用变化预测[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [14] 中华人民共和国国土资源部. 低碳排放: 土地利用调控新课题[OL]. 2009-12-25(2021-06-17). <http://www.mnr.gov.cn>.
- [15] 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辑: 地球科学), 2007, 37(6): 804–812.
- [16] 孙赫, 梁红梅, 常学礼, 等. 中国土地利用碳排放及其空间关联[J]. 经济地理, 2015, 35(3): 154–162.

- [17] 赵荣钦, 黄贤金, 钟太洋, 等. 区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17): 220–229.
- [18] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(4): 15–20.
- [19] 王怡睿, 石培基, 张学斌, 等. 转移流视角下甘州区土地利用动态变化及空间集聚特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 793–802.
- [20] 陈西, 王延华, 蔡祖聪, 等. 常熟市水体氮负荷对土地利用方式的响应[J]. 土壤, 2018, 50(4): 674–680.
- [21] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955–1961.
- [22] 张小松. 西宁市土地利用景观格局演变及预测研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [23] Luijten J C. A systematic method for generating land use patterns using stochastic rules and basic landscape characteristics: Results for a Colombian hillside watershed[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2003, 95(2): 427–441.
- [24] 裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 525–531.
- [25] 杜士强, 陈志科, 晏玲, 等. 基于空间马尔科夫模型对兴隆山自然保护区土地利用/覆盖变化趋势的研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(2): 194–199, 221.
- [26] 王水献, 董新光, 寇文. 马尔柯夫过程预测焉耆盆地土地利用/覆被格局变化[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(10): 28–33.
- [27] 陈藜藜, 宋戈, 周浩, 等. 松嫩高平原土地利用变化分析及趋势模拟——以黑龙江省巴彦县为例[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 61–69.
- [28] 张鑫. 江苏省土地利用碳排放时空演变研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.
- [29] 卞晓峰. 不同土地利用方式的碳排放和碳足迹研究——以中国 30 个省、自治区、直辖市为例[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [30] 黄润秋. 把碳达峰碳中纳入生态文明建设整体布局[J]. 环境保护, 2021, 49(22): 8–10.