

基于 CA-Markov 模型的淮河流域土地利用变化研究

刘赛艳^a, 张永江^a, 解阳阳^{a,b}, 张钦^a, 席海潮^a

(扬州大学 a.水利科学与工程学院; b.现代农村水利研究院, 江苏 扬州 225009)

摘要:【目的】研究淮河流域土地利用变化特征并预测淮河流域 2030 年土地利用变化, 实现流域土地资源的合理开发利用。【方法】基于淮河流域 1990—2020 年共 7 期的土地利用数据, 采用土地利用转移矩阵和土地利用动态度分析淮河流域土地利用变化特征。基于元胞自动机-马尔科夫 (CA-Markov) 模型模拟淮河流域 2010 和 2015 年的土地利用格局, 并在满足一定的精度条件下, 预测淮河流域 2030 年的土地利用变化趋势。【结果】①耕地和建设用地的面积占淮河流域土地利用面积的 80% 以上, 是淮河流域最主要的两种土地利用类型; ②耕地的减少和建设用地的持续扩张是淮河流域 1990—2020 年土地利用最为明显的变化特征; ③基于 CA-Markov 模型模拟的 2010 年和 2015 年土地利用的 Kappa 系数分别为 0.937 和 0.944, 模拟精度较高; ④预测的淮河流域 2030 年土地利用变化显示: 耕地的减少和建设用地的扩张仍然是主要趋势, 但二者变化幅度放缓, 林地和草地的变化不显著, 水域面积继续增加。【结论】淮河流域建设用地大幅度扩张以及耕地面积持续减少应引起重视, 基于 CA-Markov 模型模拟的 2030 年土地利用变化可为流域未来土地利用开发提供参考。

关键词: 土地利用; CA-Markov 模型; 转移矩阵; Kappa 系数; 淮河流域

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023309

OSID:



刘赛艳, 张永江, 解阳阳, 等. 基于 CA-Markov 模型的淮河流域土地利用变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(1): 52-59, 96.

LIU Saiyan, ZHANG Yongjiang, XIE Yangyang, et al. Research on land use change in Huaihe River basin based on the CA-Markov model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(1): 52-59, 96.

0 引言

【研究意义】土地是人类社会发展的基础资源, 土地的开发利用关系到气候变化、生物多样性和环境污染等诸多问题, 影响社会经济的可持续发展和生态环境的良性演变^[1]。当前我国进入高质量发展阶段, 对国土资源的开发必须坚持科学管控和生态保护的原则^[2]。因此, 对土地利用时空格局演变的正确认识有利于科学制定土地开发利用的决策和战略。【研究进展】目前, 对土地利用变化的研究已从单一的数量变化发展为时空演变的模拟预测, 预测模型也向多模型耦合方向发展^[3]。诸多学者应用未来土地利用模拟 (Future land use simulation, FLUS) 模型^[4]、斑块生成土地利用变化模拟 (Future land use simulation, PLUS) 模型^[5]、元胞自动机-马尔科夫 (Cellular automatic -Markov, CA-Markov) 模型^[6]、小尺度土地利用模拟 (Conversion of land use and its effects at

small regional extent, CLUE-S) 模型^[7]等耦合模型在不同研究区开展了土地利用变化的模拟预测。其中, CA-Markov 模型凭借其复杂的空间变化模拟和长序列预测优势^[8]在土地利用变化研究中得到较为广泛的应用。Fu 等^[9]基于 CA-Markov 模型模拟绵阳市土地利用景观格局的变化, 分析了 2008—2020 年绵阳市的景观破碎化程度, 并提出低碳发展理念下区域土地利用景观格局的优化策略。Matlodi 等^[10]采用 CA-Markov 模型进行土地利用变化模拟, 预测哈博罗内大坝流域 2035 年的土地利用格局, 并分析预测结果下各土地利用类型变化对流域水资源产生的影响。Zhou 等^[11]将随机森林算法与 CA-Markov 模型结合, 模拟了无约束发展和规划干预发展两种情景下上海市 2015—2030 年土地利用格局的演变, 提出生态和耕地保护下城市发展更具可持续性。从已有研究来看, CA-Markov 模型对土地利用变化模拟研究的趋势主要包括采用改进模型提高模拟精度以及开展不同情景下土地利用变化模拟两大方面, 其研究区域主要为行政区域和自然流域两种尺度。

【切入点】流域是一个完整的系统, 自然河流流域内人类活动频繁, 对土地资源的开发利用更为明显。淮河流域是我国七大流域之一, 耕地和矿产资源丰富, 是我国重要的粮食生产基地和能源矿产基地。流域人

收稿日期: 2023-07-08 修回日期: 2023-10-12

基金项目: 江苏省高效节能大型轴流泵站工程研究中心开放课题 (ECHEAP014); 国家自然科学基金项目 (52009116, 52379027); 江苏省自然科学基金项目 (BK20200958, BK20200959); 中国博士后科学基金项目 (2018M642338); 扬州大学科技创新培育基金 (2022077)

作者简介: 刘赛艳 (1990-), 女, 讲师, 博士, 主要从事水文过程研究。
E-mail: Liusaiyan@yzu.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

口密度大, 交通便利, 社会经济发展潜力大, 是国家促进中部崛起战略的重要区域。已有一些学者对淮河流域土地利用变化展开研究, 如李煜东等^[12]分析了 1990—2015 年淮河流域土地利用变化特征和驱动机制; 严登明等^[13]分析了淮河流域 2000—2013 年土地利用变化的表现形式和植被覆盖变化等。总体而言, 以往研究集中于淮河流域土地利用的历史变化分析, 对淮河流域未来土地利用变化的预测研究较少。【拟解决的关键问题】本研究拟通过土地利用动态度和土地利用转移矩阵分析淮河流域 1990—2020 年土地利用变化的演变规律, 并采用 CA-Markov 模型预测流域 2030 年土地利用变化趋势, 以期为淮河流域土地资源的合理开发利用提供科学参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

淮河流域的地理位置如图 1 所示。淮河流域 (111°55′—121°25′E, 30°55′—36°36′N) 位于长江和黄河流域两大流域之间, 地跨主要省级行政区包括河南、安徽、江苏和山东 4 省, 面积约 27 万 km²^[14]。流域地处我国南北气候过渡带, 北部属于暖温带半湿润季风气候区, 南部属于亚热带湿润季风气候区。流域内气象系统复杂多变, 降水量年际变化大, 年内分布极不均匀^[15]。

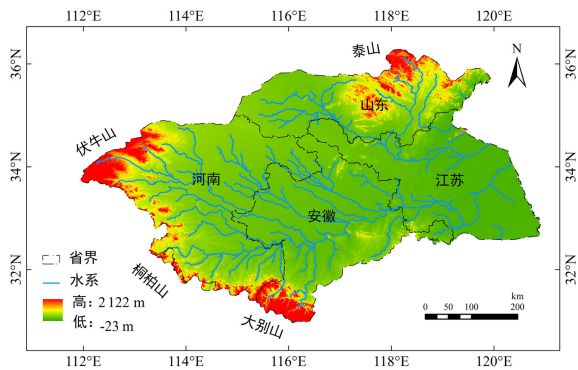


图 1 淮河流域地理位置

Fig.1 Geographical location of Huaihe River basin

1.2 研究方法

本研究采用 1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020 年共 7 期土地利用数据, 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/>), 数据空间分辨率为 1 km。流域 DEM (Digital elevation model) 数据由地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>) 获取, 坡度数据由 DEM 数据提取得到。流域道路数据由 OpenStreetMap 网站 (<https://www.openstreetmap.org/>) 下载。

根据土地利用类型的分类标准^[16], 将淮河流域的土地利用类型参考《第三次全国土地调查土地分类》

一级分类标准重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地共 6 类。

1.2.1 土地利用动态度

单一土地利用动态度描述时段内某种土地利用类型的变化强度^[17]。其计算式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\%, \quad (1)$$

式中: K 表示某种土地利用类型的动态度; U_a 、 U_b 分别为时段初期和末期土地利用类型的面积 (km²); T 为时段长度 (a)。

综合土地利用动态度可以描述土地利用变化总体过程的剧烈程度^[3]。其计算式为:

$$L_C = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta L_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \times \frac{1}{T} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: L_C 表示研究区某时段综合土地利用动态度; ΔL_{i-j} 为时段初到时段末第 i 种土地类型转化为 j ($i \neq j$) 种土地类型的面积的绝对值; U_i 为时段初期 i 类土地利用类型的面积; T 为研究时段长度。

1.2.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可以描述土地利用类型由 T_1 时刻演变为 T_2 时刻的状态变化, 展示出各土地利用类型由时段初到时段末的转移面积和转移方向, 包括土地利用转移面积矩阵和土地利用转移概率矩阵^[18]。其表达式为:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: A_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, n$) 表示第 i 种土地类型转换为第 j 种土地类型的面积 (或概率), $i=j$ 时表示该土地类型不发生转变的面积 (或概率); n 为土地类型的数量。

1.2.3 CA-Markov 模型

CA-Markov 模型是结合了元胞自动机 (Cell automata, CA) 模型和马尔科夫 (Markov) 模型的耦合模型, 可模拟土地利用在时间上数量和空间分布的变化。Markov 模型是基于马尔科夫链过程理论预测未来事件发生概率的动态随机模型, 其研究对象的转移过程要求具有无后效性和离散性^[19]。Markov 转移过程可表示为:

$$S_{t+1} = P_{ij} \times S_t, \quad (4)$$

式中: S_t 、 S_{t+1} 分别为 t 和 $t+1$ 时刻土地类型的状态; P_{ij} 表示第 i 种土地类型转换为第 j 种土地类型的转移概率, $0 \leq P_{ij} \leq 1$ 。

CA 是一种空间结构“自下而上”、由局部到整体

的模型框架,具有研究时间、空间和状态都离散的复杂系统演变过程的时空计算能力,在土地利用与城市扩张模拟、交通仿真模拟以及自然灾害模拟等方面都有着广泛的应用价值^[20]。CA 过程可表示为:

$$S_{t+1} = f(S_t, N), \quad (5)$$

式中: S_t 、 S_{t+1} 分别为 t 和 $t+1$ 时刻元胞的状态; N 为元胞的领域; f 为局部空间元胞转移规则函数。

本文结合软件 ArcGIS10.6 和 IDRISI17.0 分析淮河流域土地利用变化的演变趋势,并开展土地利用变化的模拟预测。相关操作过程如下:

1) 数据预处理。由 ArcGIS 处理淮河流域土地利用数据、DEM 数据,坡度数据,统一数据为同一坐标系、同一分辨率以及栅格数(范围)相同。道路大量数据在 IDRISI 中处理。

2) 数据导入 EDRISI。EDRISI 是一款集合了多种数字化空间信息分析模块的地理信息系统分析和图像处理工具。EDRISI 软件可识别的栅格数据源要求 ASCII 格式,可由 ArcGIS 的转换工具得到。对导入的影像进行重分类处理,需注意经过格式转换和导入,原有图像属性可能出现异常值,应观察其属性值域在重分类操作中考虑对异常值的处理。

3) Markov 模型。EDRISI 工具箱内置 Markov 模块,具体输入基期和末期的土地利用影像、时段间隔以及设置背景值和比例误差,便可得到时段初到时段末的转移面积矩阵、转移概率矩阵和适宜性图集。

4) CA-Markov 模型。利用 IDRISI 进行 CA-Markov 模拟要基于基期土地利用影像、土地利用转移面积矩阵和土地转移适宜性图集。Markov 操作生成的适宜性图集未考虑土地利用转移变化的影响因子,参考其他学者的研究,以多准则评价模型(MCE)处理土地利用转移中的适宜性条件,选取淮河流域的 DEM、坡度、距道路距离以及水域为影响因子,制定土地转移适宜性图集。

5) 模型精度评价。本文利用 IDRISI 软件中 CROSSTAB 模块计算得到的 Kappa 系数评价土地利用变化模拟结果与实测数据的一致程度。参考相关研究的标准^[21],一般认为 Kappa 系数 >0.75 时,模拟与实测结果的一致性较高,模拟结果具有较高的可信度。Kappa 系数的计算式为:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e}, \quad (6)$$

$$P_0 = \frac{n_1}{n}, \quad P_e = \frac{1}{N}, \quad (7)$$

式中: n 为栅格总数; n_1 为模拟一致的栅格数; N 为土地类型的数量,本研究中 $N=6$; P_0 表示模拟一致的栅格比例; P_e 表示土地类型数量的倒数。

2 结果与分析

2.1 土地利用时空变化分析

1990—2020 年淮河流域土地利用时空分布格局如图 2 所示。由图 2 可知,淮河流域大部分面积被耕地所覆盖,耕地是淮河流域最主要的土地利用类型。建设用地零散分布在全流域平原地区,其分布呈点块状。林地和草地主要分布在流域西南边界的山地、丘陵地区,其中草地也分布在水域的邻近区域。湖泊构成淮河流域水域的主体,主要包括江苏省内的高邮湖、洪泽湖以及山东省内的微山湖。未利用土地类型面积极小,其分布特征不明显。

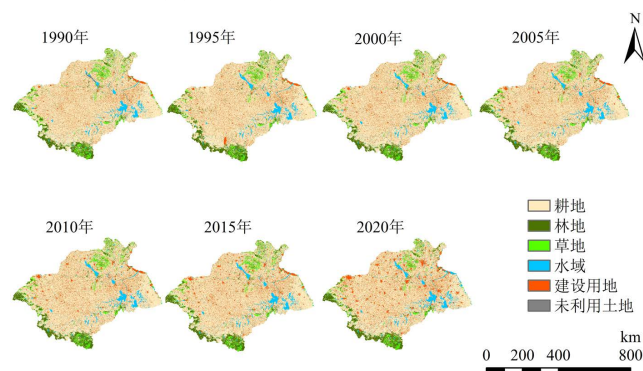


图 2 淮河流域 1990—2020 年土地利用时空分布

Fig.2 Temporal and spatial distribution of land use in Huaihe River basin from 1990 to 2020

淮河流域 1990—2020 年各土地利用类型面积和占比如表 1 所示。由表 1 可知,近 30 a 来流域耕地面积持续减少,减幅达 8 869 km²,其中 2015—2020 年耕地面积减少量最大,减少面积为 4 175 km²,达到 30 a 间耕地减少面积的 47%。建设用地面积呈递增趋势,且增长幅度依次增加:2015—2020 年增幅最大,其面积增长达到 5 853 km²,1990—2020 年建设用地面积共增加 10 839 km²。流域林地面积 30 a 来共减少 412 km²,其中,2000—2015 年间变动幅度均低于 0.4%,变化较为不显著。1990—2020 年流域草地面积减少 3 034 km²,2015—2020 年减少面积最大为 2 144 km²。草地面积基本保持减少趋势,仅在 1995—2000 年呈现小幅度增长,增长面积为 387 km²。水域面积呈现出每 5 a 均增长的趋势,2015—2020 年增长量最大,2005—2010 年增长量最小,分别为 799 km² 和 59 km²。未利用土地面积 1990—2020 年共减少 575 km²,1990—1995 年减少幅度最大达 515 km²。

淮河流域人口密度大,高强度的社会经济活动推动建设用地和水域面积增长以及耕地和植被面积减少,其变化主要表现为流域住宅建筑业、贸易区域以及公共交通设施的增长^[22]。在推进生态文明建设和流域高质量发展的要求下,应当重视经济发展与生态保护之间的矛盾,合理利用土地资源。

表 1 淮河流域 1990—2020 年各土地利用类型面积及占比

Tab.1 Area and proportion of land use types in Huaihe River basin from 1990 to 2020

年份	指标	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1990 年	面积/km ²	188 546	19 177	11 504	11 712	32 340	757
	占比/%	71.41	7.26	4.36	4.44	12.25	0.29
1995 年	面积/km ²	187 962	20 414	10 371	11 979	33 068	242
	占比/%	71.19	7.73	3.93	4.54	12.52	0.09
2000 年	面积/km ²	187 505	19 079	10 758	12 563	33 944	216
	占比/%	71.01	7.23	4.07	4.76	12.85	0.08
2005 年	面积/km ²	186 422	19 044	10 650	12 901	34 826	222
	占比/%	70.60	7.21	4.03	4.89	13.19	0.08
2010 年	面积/km ²	185 278	19 087	10 642	12 960	35 900	221
	占比/%	70.16	7.23	4.03	4.91	13.59	0.08
2015 年	面积/km ²	183 852	19 032	10 614	13 024	37 326	234
	占比/%	69.62	7.21	4.02	4.93	14.13	0.09
2020 年	面积/km ²	179 677	18 765	8 470	13 823	43 179	182
	占比/%	68.03	7.11	3.21	5.23	16.35	0.07

2.2 土地利用动态变化分析

2.2.1 土地利用动态度

淮河流域 1990—2020 年土地利用动态度变化如表 2 所示。由表 2 可知，淮河流域 1990—2020 年各时期（每 5 a）耕地动态度均为负值，2015—2020 年耕地变化程度最大，1995—2000 年最小。建设用地均为正增长变化，2015—2020 年建设用地动态度达到 3.14%，是近 30 a 来变化程度最为剧烈的 5 a。水域动态度均相对较小，除 2015—2020 年外，1990—2015 年动态度均 < 1%，其变化程度不显著。林地动态度在 2000—2015 年均 < 0.30%，表明淮河流域 2000 年后林地保护成果显著。草地动态度在 2015—2020 年为 -4.04%，出现较为剧烈的负增长变化。单一土地

利用动态度描述的结果显示：淮河流域 2000—2015 年各土地类型发生变化的程度都相对平稳，2015—2020 年主要土地类型耕地和建设用地发生了较为剧烈的变化。

淮河流域近 30 a 来各时期土地利用总体变化显示：1990—1995 年流域综合土地利用动态度最大为 2.99%，各土地类型之间共发生转移面积达 79 062 km²，表明该时期各土地类型间转移变化程度剧烈。2015—2020 年和 1995—2000 年的综合土地利用动态度也相对较大，分别为 2.78% 和 2.60%。但 2000—2015 年的综合土地利用动态度均小于 0.10%，该时期各土地类型间流转的面积小，土地利用变化程度低。

表 2 淮河流域 1990—2020 年土地利用动态度

Tab.2 Land use dynamics of Huaihe River basin from 1990 to 2020

土地类型	土地利用动态度/%					
	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020
耕地	-0.06	-0.05	-0.12	-0.12	-0.15	-0.45
林地	1.29	-1.31	-0.04	0.05	-0.06	-0.28
草地	-1.97	0.75	-0.20	-0.02	-0.05	-4.04
水域	0.46	0.98	0.54	0.09	0.10	1.23
建设用地	0.45	0.53	0.52	0.62	0.79	3.14
未利用土地	-13.61	-2.15	0.56	-0.09	1.72	-4.83
综合土地利用动态度/%	2.99	2.60	0.06	0.05	0.08	2.78

分析结果表明 1990—2020 年淮河流域不同时期土地利用动态度差异较大，其主要原因在于流域不同时期经济发展水平和区域发展政策不同，人类活动对流域干扰强度存在时空差异^[23]。1990—2000 年，淮河流域城镇化进程的加快、新农村建设的推进以及推进农村居民点整理等决策，促进了耕地和建设用地间的大面积双向转移；1997 年国家土地政策实施^[12]，促使农民开垦农田，大量林地和草地转向耕地；水资源保护政策和水利工程的建设促进了水域面积的发展。2000—2015 年，退耕还林、还草等政策使得林地和草地减速放缓并出现增长。2015 年后淮河流域推进产业转型升级和统筹城乡发展等战略举措^[24]极大刺激了建设用地的高速扩张，耕地被大量开发为建

设用地。

2.2.2 土地利用转移变化

淮河流域 1990—2020 年土地利用转移变化如表 3 所示。由表 3 可知，耕地转出面积 43 084 km²，转入面积 34 166 km²，最主要的转出类型为建设用地，建设用地面积近 30 a 共增加 10 817 km²。水域主要发生了与耕地的相互转移，30 a 来耕地转入水域面积为 4 735 km²，水域向耕地转移面积为 3 679 km²。林地和草地的转入和转出变化较为相近，主要发生在耕地、林地和草地三者之间的转移。林地和草地 1990—2020 年面积分别减少 419 km² 和 3 040 km²，其中草地向耕地转移面积达 4 329 km²。1990—2020 年未利用土地减少 575 km²，转向水域的面积达 493 km²。

表 3 淮河流域 1990—2020 年土地利用转移面积矩阵

Tab.3 Matrix of land use transfer area in Huaihe River basin from 1990 to 2020

km²

年份	土地类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
1990 年	耕地	145 505	3 951	2 111	4 735	32 225	62
	林地	4 106	12 431	1 719	292	609	27
	草地	4 329	1 863	4 227	418	649	34
	水域	3 679	267	167	6 687	907	12
	建设用地	21 894	235	230	1 229	8 764	16
	未利用土地	158	18	26	493	31	31

2.3 未来土地利用变化

2.3.1 CA-Markov 模拟精度评价

土地利用变化是一个相对缓慢的过程,当短时期内土地利用变化程度较低的时候,以短时期为模拟期开展模型研究容易产生较大误差。因此,模拟预测期的研究间隔不易选取太小,同时研究期跨度较大也易产生误差积累。综合已有资料和 CA-Markov 模型特点考虑,本研究选取 10 a 间隔开展基于 CA-Markov 模型的土地利用变化模拟,并进行精度评价。根据已有数据长度和研究间隔,分别选取以偶数年 2010 年和奇数年 2015 年为模拟验证期,进行 CA-Markov 模拟精度评价。由 Markov 模型计算 1990—2000 年和 1995—2005 年的土地利用转移矩阵,通过 MCE 模型制定相应的土地利用转移适宜性图集,分别以 2000 年和 2005 年为基期影像进行 CA-Markov 操作,模拟未来 10 a 即 2010 年和 2015 年的土地利用空间分布格局,并与 2010 年和 2015 年实测数据对比,通过 Kappa 系数和误差分析来评价 CA-Markov 模型在淮河流域土地利用变化模拟的应用效果。

淮河流域 2010 年和 2015 年土地利用变化模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知,2010 年和 2015 年模拟和实测图像各土地利用类型空间分布格局基本一致,但流域水域面积模拟结果出现明显的扩张现象,可见水域面积模拟结果偏大,主要表现为以水域边界向周围的扩张。计算得到淮河流域 2010 年和 2015 年土地利用模拟和实测图的 Kappa 系数分别为 0.937 和 0.944, Kappa 系数均 > 0.75, 表明总体上模拟和实测的一致程度较高。模拟精度高于刘小妮等^[25]在渭河中下游模拟的 Kappa 系数,可见 CA-Markov 模型在淮

河流域土地利用变化模拟上具有较高的适宜性。

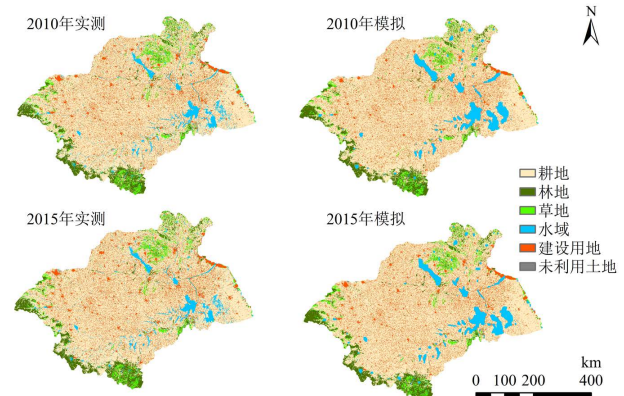


图 3 淮河流域 2010 年和 2015 年土地利用实测模拟对比

Fig.3 Comparison of land use measurements and simulations in Huaihe River basin in 2010 and 2015

淮河流域 2010 年和 2015 年各土地类型面积实测模拟误差如表 4 所示。由表 4 可知,2010 年和 2015 年淮河流域耕地、建设用地和林地以及草地面积模拟与实测比例误差绝对值均在 2% 以下,可见 2015 年模拟结果的精度较高。但水域面积模拟结果的比例误差达到 16% 左右,相对较高。这是由于本研究在适宜性图集制定时,参考其他学者的研究并对比模拟结果,规定禁止水域向其他土地类型发生转移^[17,26]。水域作为特殊的用地类型,兼具生态、社会发展以及气候调节等多重功能。因此,此规则下的模拟结果具有一定的合理性,且在此规则下主要土地利用类型的模拟误差控制在较低的水平。由于未利用土地所占面积小,不到整个流域土地利用面积的 0.5%,同时未利用土地的转移变化不具有可循的规律,因此我们不考虑其误差带来的影响。

表 4 淮河流域 2010 年和 2015 年土地类型实际与模拟面积误差

Tab.4 Actual and simulated area errors of land types in Huaihe River basin in 2010 and 2015

土地利用类型	2010 年				2015 年			
	实际面积/km ²	模拟面积/km ²	误差/km ²	比例误差/%	实际面积/km ²	模拟面积/km ²	误差/km ²	比例误差/%
耕地	185 278	183 114	-2 164	-1.17	183 852	182 333	-1519	-0.83
林地	19 087	18 938	-149	-0.78	19 032	19 271	239	1.26
草地	10 642	10 652	10	0.09	10 616	10 424	-192	-1.81
水域	12 961	14 993	2 032	15.68	13 031	15 202	2171	16.66
建设用地	35 900	36 246	346	0.96	37 326	36 615	-711	-1.90
未利用土地	221	120	-101	-45.70	240	223	-17	-7.08

2.3.2 淮河流域 2030 年土地利用变化预测

对淮河流域历史时期土地利用变化分析发现,流域不同时期土地利用变化程度存在较为明显的差异。计算得到淮河流域 1990—2010 年各土地类型发生转移面积为 82 908 km²,综合土地利用动态度为 0.79%; 2010—2020 年各土地类型发生转移面积为 74 243 km²,综合土地利用动态度为 1.41%。相对而言,2010—2020 年淮河流域土地利用总体变化程度较为剧烈,1990—2010 年则相对平稳。根据淮河流域土地利用变化上的特征,同时依据等间隔模拟^[27],分别以 2010 年和 2020 年土地利用数据为基期影像,模拟流域 2030 年土地利用格局变化。

基于淮河流域 2010 年和 2020 年土地利用现状,由 CA-Markov 模型预测的 2030 年流域土地利用变化分别如图 4、图 5 所示。由图 4 可知,预测的淮河流域 2010—2030 年各土地类型变化趋势同 1990—2010 年土地利用变化保持一致。2010—2030 年淮河流域耕地面积减少约 5 960 km²,建设用地面积增加 3 803 km²,变化幅度均大于 1990—2010 年耕地和建设用地面积变化量。图 5 预测结果表明,2020—2030 年淮河流域耕地面积减少 3 231 km²,建设用地面积增加 1 196 km²。对比淮河流域 2010—2020 年土地利用变化,建设用地增长幅度明显变缓,预测 2020—2030 年建设用地增长不足 2010—2020 年的 1/6。

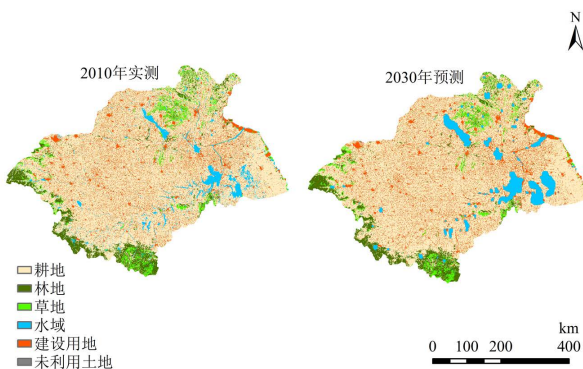


图 4 淮河流域 2010—2030 年土地利用变化预测

Fig.4 Prediction of land use change in Huaihe River basin from 2010 to 2030

2 种不同土地利用动态度模拟的淮河流域 2030 年土地利用变化结果一致表明,耕地面积减少和建设用地面积增加仍然是淮河流域未来土地利用变化的主要趋势,但其增长和减少的幅度都有所下降。水域在不向其他土地类型发生转移的情景下,预测 2030 年水域面积将超过 15 000 km²。在水域保护以及人工水域景观发展的环境下,流域水域面积可能出现增幅变大的趋势。2030 年淮河流域林地面积进一步减少,草地面积减少不显著或将发生增长。预测的淮河流域 2010—2030 年和 2020—2030 年的综合土地利用动态

度分别为 0.2%和 0.3%,与模拟基期 1990—2010 年的 0.8%和 2010—2020 年 1.4%相比都明显减小。由于制定了相应的转移规则,基于 CA-Markov 模型预测得到的土地利用动态度都将较基期减小。就模拟基期和预测期综合土地利用动态度的关系来看,CA-Markov 模型基于较小土地利用动态度预测的未来土地利用变化程度相对平稳,基于较大土地利用动态度预测的未来土地利用变化程度相对剧烈。

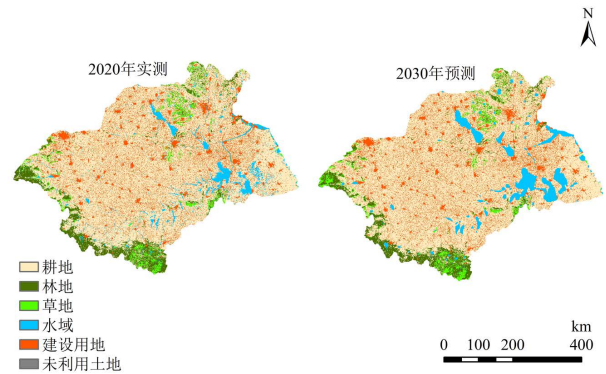


图 5 淮河流域 2020—2030 年土地利用变化预测

Fig.5 Prediction of land use change in Huaihe River basin from 2020 to 2030

3 讨论

淮河流域 1990—2020 年土地利用变化集中于耕地向建设用地转移,这是社会经济发展下城镇化的必然结果。相比于其他流域和研究区,淮河流域不同时期土地利用变化程度存在较大差异。2015—2020 年淮河流域耕地面积减幅和建设用地面积增幅均达到 2010—2015 年变幅的 3 倍多,这个变化程度相比于其他研究区的土地利用变化^[18]是少见的。究其原因,淮河流域面积大、人口多,人口密度约为全国平均人口密度的 4 倍,高强度的社会经济活动推动着地表改造。加上不同时期宏观层面的政策规划和社会经济的快速发展,土地资源开发利用加快致使流域土地利用变化程度趋向剧烈。

在预测未来土地利用变化时,开展多年预测往往因预测周期较长难免出现一定的误差,且在经济社会快速发展的环境下,影响未来土地利用变化的不确定因素也趋向复杂化和多样化。因此,长周期的预测对实际的指导意义并不直接有效。此外,设置情景开展多情景土地利用变化预测大多基于政策和相关理论指导,其方法是修改土地利用转移矩阵^[25]或制定 CA 约束条件^[28]。情景设置一方面因政策因素无法量化,另一方面机械修改转移矩阵或过多添加约束并不贴合土地利用实际变化转移,在一定程度上预测结果多表现出具有目的性。不同于开展多年土地利用变化预测或多情景预测的方式,本研究结合淮河流域土地利用的

变化特征, 基于 CA-Markov 模型预测了两种土地利用动态变化下淮河流域 2030 年土地利用变化格局, 2 种结果可为流域 2030 年土地利用变化提供参考范围: 预测淮河流域 2030 年耕地面积为 176 446~179 318 km², 建设用地面积为 39 703~44 375 km²。就对未来土地利用变化预测的结果形式而言, 范围指标对实际的指导可能更具参考意义。

土地利用变化是自然和社会因素共同作用的结果, 本研究预测淮河流域土地利用变化未考虑社会因素如: 人口增长、经济发展、政策等驱动因子的影响, 模拟结果存在一定的偏差。李世锋等^[28]在 LUCC 多情景模拟中考虑了高程、坡度、GDP、人口密度、距行政中心距离、距道路距离以及距河流距离等 7 种驱动因子, 并对驱动因子进行了分析和有效性检验, 使得模拟结果更加可信。对未来土地利用变化的模拟应该更加全面地考虑多种驱动因子的影响, 以及进一步加入政策、技术等因素的指导。此外, 淮河流域面积较大, 本研究采用 1 km 分辨率栅格数据未考虑数据精度对结果的影响, 因此在下一步的研究中, 应进一步考虑数据精度和研究区土地利用间的尺度效应^[29]。

4 结论

1) 淮河流域最主要的土地利用类型为耕地, 其次为建设用地, 2 种土地类型占流域总土地利用面积的 80% 以上。1990—2020 年淮河流域土地利用变化的主要特征为耕地面积持续减少, 建设用地面积持续增加。林地和草地面积变化相对平稳, 水域面积呈递增趋势。

2) 由于不同时期经济发展水平和区域发展政策不同, 1990—2020 年淮河流域土地利用动态度差异较大。其中 1990—1995 年流域综合土地利用动态度最大, 该时期各土地类型间发生了剧烈的双向转移。2015—2020 年流域单一土地利用动态度和综合土地利用动态度都相对较大, 表明该时期淮河流域各土地类型变化程度较为剧烈。1990—2020 年淮河流域土地利用变化的转移特征主要表现为耕地向建设用地转移。

3) CA-Markov 模型在淮河流域土地利用变化模拟中应用精度较高, 2010 和 2015 年模拟和实测对比的 Kappa 系数分别达 0.937 和 0.944。基于 2010 年和 2020 年模拟的淮河流域 2030 年土地利用变化表明, 预测得到的综合土地利用动态度都减小; 耕地面积减少和建设用地面积增加仍然是淮河流域未来土地利用演变的主要趋势, 但其变化幅度都表现出明显的减缓。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 袁晓蕾, 王超, 李柏延, 等. 长江流域土地利用/覆盖变化驱动力及影响综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1 241-1 255. YUAN Xiaolei, WANG Chao, LI Boyan, et al. Review of the driving forces and impacts of land use/cover change in the Yangtze River basin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(8): 1 241-1 255.
- [2] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015 年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 789-802. LIU Jiyuan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 789-802.
- [3] 席梅竹, 赵中秋, 吴攀升, 等. 基于改进 CA-Markov 模型的滹沱河流域山区段土地利用变化模拟及预测[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 150-158. XI Meizhu, ZHAO Zhongqiu, WU Pansheng, et al. Changes and predictions of land use in mountain section of the Hutuo River basin based on improved CA-markov model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 150-158.
- [4] 俞钦平, 吴振华, 王亚蓓. 一种耦合进化算法与 FLUS 模型的土地利用变化模拟模型[J]. 地球信息科学学报, 2023, 25(3): 510-528. YU Qinping, WU Zhenhua, WANG Yabei. A land use change simulation model: Coupling of evolutionary algorithm and FLUS model[J]. Journal of Geo-Information Science, 2023, 25(3): 510-528.
- [5] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于 PLUS 模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 86-92, 113. XIE Xiangdong, LIN Xiaosong, WANG Ying, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan district of Chongqing based on PLUS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 86-92, 113.
- [6] 靳含, 杨爱民, 夏鑫鑫, 等. 基于 CA-Markov 模型的多时间跨度土地利用变化模拟[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1 415-1 426. JIN Han, YANG Aimin, XIA Xinxin, et al. Simulation of land use change at different time spans based on CA-Markov model[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1 415-1 426.
- [7] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于 CLUE-S 模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288-296. GU Hanlong, MA Tianjun, QIAN Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 288-296.
- [8] 马梓策, 于红博, 张巧凤, 等. 基于 CA-Markov 模型的锡林河流域土地利用变化及预测分析[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 169-177. MA Zice, YU Hongbo, ZHANG Qiaofeng, et al. Land use change and forecast analysis in the Xilin River basin based on CA-markov model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 169-177.
- [9] FU F, DENG S M, WU D, et al. Research on the spatiotemporal evolution of land use landscape pattern in a county area based on CA-Markov model[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103 760.
- [10] MATLHODI B, KENABATHO P K, PARIDA B P, et al. Analysis of the future land use land cover changes in the Gaborone Dam catchment using CA-markov model: Implications on water resources[J]. Remote Sensing, 2021, 13(13): 2 427.
- [11] ZHOU L, DANG X W, SUN Q K, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov

- model[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 102-113.
- [12] 李煜东, 臧传富, 陈相龙. 淮河流域 1990—2015 年间土地利用时空变化特征及驱动机制研究[J]. *生态科学*, 2020, 39(2): 104-113.
LI Yudong, ZANG Chuanfu, CHEN Xianglong. Research on temporal and spatial variation characteristics and driving mechanism of land use in Huaihe River basin from 1990 to 2015[J]. *Ecological Science*, 2020, 39(2): 104-113.
- [13] 严登明, 翁白沙, 于志磊, 等. 淮河流域土地利用时空格局动态及其植被覆盖变化分析[J]. *中国农村水利水电*, 2016(11): 52-57.
YAN Dengming, WENG Baisha, YU Zhilei, et al. An analysis and evaluation of land use pattern on the temporal and spatial dynamic variations in the Huaihe River basin[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(11): 52-57.
- [14] 王怀军, 曹蕾, 俞嘉悦, 等. 基于 EOF 分析和 GAMLSS 模型的淮河流域极端气候事件非平稳特征[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(5): 125-134.
WANG Huaijun, CAO Lei, YU Jiayue, et al. Using EOF and GAMLSS to analyze nonstationary extreme climate events in Huai River basin[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(5): 125-134.
- [15] 刘赛艳, 秦璇, 高峥, 等. 基于 SPI-Markov 链的淮河流域气象干旱特征研究[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2022, 25(5): 31-39.
LIU Saiyan, QIN Xuan, GAO Zheng, et al. Study on meteorological drought characteristics in Huai River basin based on SPI-Markov chain[J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2022, 25(5): 31-39.
- [16] 中华人民共和国自然资源部. 第三次全国国土调查技术规程: TD/T 1055-2019[S]. 北京: 地质出版社, 2019.
- [17] 吴晶晶. 基于 GIS 和 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景模拟与生态环境效应评价[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
WU Jingjing. Simulation of land use change and evaluation of eco-environmental effects in the lower reaches of Wujiang River based on GIS and CA-markov model[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [18] 黎云云, 畅建霞, 王义民, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄河流域土地利用模拟预测研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(12): 107-116.
LI Yunyun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Land use simulation and prediction in the Yellow River basin based on CA-Markov model[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(12): 107-116.
- [19] 卢涵宇, 郭彩, 张涛, 等. 基于 CA-Markov 的盘州市土地利用变化研究[J]. *广西大学学报(自然科学版)*, 2020, 45(3): 550-557.
LU Hanyu, GUO Cai, ZHANG Tao, et al. Study on land use change of Panzhou city based on CA-Markov[J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2020, 45(3): 550-557.
- [20] 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): 1 190-1 196.
ZHAO Li, YANG Jun, LI Chuang, et al. Progress on geographic cellular automata model[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(8): 1 190-1 196.
- [21] 岳东霞, 杨超, 江宝骅, 等. 基于 CA-Markov 模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1 993-2 003.
YUE Dongxia, YANG Chao, JIANG Baohua, et al. Spatio-temporal pattern prediction of the biocapacity in the Shiyang River Basin on the basis of the CA-Markov model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(6): 1 993-2 003.
- [22] LIU F, QIN T L, GIRMA A, et al. Dynamics of land-use and vegetation change using NDVI and transfer matrix: A case study of the Huaihe River basin[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 28(1): 213-223.
- [23] WANG H R, ZHANG M D, WANG C Y, et al. A novel method for quantifying human disturbances: A case study of Huaihe River basin, China[J]. *Frontiers in Public Health*, 2023, 10: 1 120 576.
- [24] 王拯. 关于“十四五”时期加强省际合作推进淮河流域生态经济带发展的思考[J]. *江苏科技信息*, 2020, 37(20): 20-22.
WANG Zheng. Reflections on strengthening cooperation between provincial governments to promote the development of Huaihe River Eco-economic Belt during the “14th Five-Year Plan” period[J]. *Jiangsu Science & Technology Information*, 2020, 37(20): 20-22.
- [25] 刘小妮, 鞠琴, 鞠晓晗, 等. 基于 CA-Markov 模型的渭河中下游干流土地利用变化模拟及预测[J]. *节水灌溉*, 2022(11): 1-8.
LIU Xiaoni, JU Qin, JU Xiaohan, et al. Simulation and prediction of land use change in the middle and lower reaches of the Weihe River basin based on the CA-markov model[J]. *Water Saving Irrigation*, 2022(11): 1-8.
- [26] 张晨星, 徐晶晶, 温静, 等. 基于 CA-Markov 模型和 MCE 约束的白洋淀流域景观动态研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(4): 655-664.
ZHANG Chenxing, XU Jingjing, WEN Jing, et al. Dynamic simulation of landscape change in the Baiyangdian basin based on the CA-Markov model and MCE constraints[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 655-664.
- [27] ZHAO Z L, WU X, ZHANG Y L, et al. Assessment of changes in the value of ecosystem services in the Koshi River basin, central high Himalayas based on land cover changes and the CA-markov model[J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(1): 67-76.
- [28] 李世锋, 洪增林, 薛旭平, 等. 基于 Logistic-CA-Markov 耦合模型的彬州市 LUCC 多情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 292-299.
LI Shifeng, HONG Zenglin, XUE Xuping, et al. Multi-scenario simulation of LUCC in Binzhou city based on logistic-CA-markov coupling model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(4): 292-299.
- [29] 张晓娟, 周启刚, 王兆林, 等. 基于 MCE-CA-Markov 的三峡库区土地利用演变模拟及预测[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(19): 268-277.
ZHANG Xiaojuan, ZHOU Qigang, WANG Zhaolin, et al. Simulation and prediction of land use change in Three Gorges Reservoir area based on MCE-CA-Markov[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 268-277.

(下转第 96 页)

this basin. The influence of natural factors and human activity factors on the temporal and spatial changes is analyzed. **【Result】**From 2002 to 2021, the source mountains in the Western and Southern parts of the basin are high *FVC* areas, while the *FVC* is low along the river course from West to East and in the central and Northern parts of the basin. The Eastern part is low *FVC* area. The proportion of high and relatively high *FVC* area was 65.29%. Medium *FVC* accounted for 17.66%, low and relatively low coverage accounted for 17.05%. The overall vegetation coverage was high, and the average *FVC* shows a decreasing trend, and then gradually increases. The *FVC* of the basin was basically stable in 44.14%, improved area in 32.25%, and slightly degraded area in 17.27%. The proportion of obvious degradation area was 6.34%. The influence degree of natural factors on *FVC* from high to low is elevation, temperature, precipitation and slope. The *FVC* increases with the increase of elevation, precipitation and slope, and decreases with the increase of temperature. The positive effect of human activities on *FVC* was slightly greater than the negative effect, which became an important factor promoting its growth trend. **【Conclusion】** From 2002 to 2021, the vegetation coverage in the Yiluo River Basin was relatively high and gradually increased. Elevation, temperature and precipitation were the main factors affecting its spatial distribution, and human activities promoted its increase.

Keywords: Yiluo River basin; fractional vegetation cover; spatial and temporal change; influencing factors

责任编辑: 韩 洋

(上接第 59 页)

Research on land use change in Huaihe River basin based on the CA-Markov model

LIU Saiyan^a, ZHANG Yongjiang^a, XIE Yangyang^{a,b}, ZHANG Qin^a, XI Haichao^a

(Yangzhou University, a. College of Hydraulic Science and Engineering;

b. Modern Rural Water Conservancy Research Institute, Yangzhou 225009, China)

Abstract: **【Objective】** Study the characteristics of land use change in Huaihe River Basin and predict the land use change in Huaihe River Basin in 2030, in order to achieve reasonable development and utilization of land resources in the basin. **【Method】** The land use transfer matrix and land use dynamic were used to analyze the land use change characteristics based on the land use data of Huaihe River Basin from 1990 to 2020. The land use pattern of Huaihe River Basin in 2010 and 2015 were simulated based on the cellular automata-Markov (CA-Markov) model, and the land use change trend of the basin in 2030 is predicted under the condition of meeting a certain degree of accuracy.

【Result】 ①Cultivated land and construction land area account for more than 80% of the land use area, which were the two most dominant land use types in Huaihe River Basin; ②The decrease of cultivated land and the continuous expansion of construction land were the most obvious change characteristics of land use in Huaihe River Basin in the past 30 years; ③The land use in 2010 and 2015 simulated by the CA-Markov model based on the Kappa coefficients of 2010 and 2015 simulated based on CA-Markov model are 0.937 and 0.944, respectively, with high simulation accuracy; ④The predicted land use changes in Huaihe River Basin in 2030 showed that the reduction of arable land and the expansion of land for construction are still the main trends, but the magnitude of the changes in both of them is slowing down, and the changes in forest land and grassland are not significant, but the area of watershed continues to increase. **【Conclusion】** The substantial expansion of construction land and the continuous decrease of arable land in Huaihe River Basin should be emphasized, and the land use change in 2030 simulated based on CA-Markov model can provide a reference for the future land use development of the basin.

Key words: land use; CA-Markov model; transfer matrix; Kappa coefficient; Huaihe River basin

责任编辑: 赵宇龙