

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381

# 武汉市水资源承载力综合评价及可持续利用研究

郭浩锋,袁艳斌,曹 阳,连怡雯

(武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**为协调武汉市水资源供需平衡关系,促进水资源可持续利用,基于改进 TOPSIS 法和系统动力学对武汉市水资源承载力进行了综合评价和仿真模拟,实现了静态评价和动态预测相结合。结果表明,2010~2020 年武汉市水资源承载力总体呈波动上升,整体水平处于临界状态。模拟武汉市 2021~2035 年的发展状况,常规发展模式下武汉市的水资源承载力已超出极限,难以维持需求;经济优先模式以牺牲资源环境换取经济提速,表现出最为严重的水资源问题;环境友好模式虽可减少水资源消耗、改善生态环境,但经济发展也受到一定的限制;综合发展模式从协调平衡的角度出发,在满足经济稳速发展的同时也实现了资源节约、环境保护,以最小的水资源消耗获取了最大的经济和生态效益,实现了人与自然的和谐发展。

**关键词:** 水资源承载力;可持续利用;TOPSIS 法;系统动力学;武汉市

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0019-05

## 1 引言

全球气候剧烈变化导致水资源供需矛盾日益凸显,在保持区域经济稳速增长的前提下促使水资源的可持续利用已成为当下的研究热点<sup>[1]</sup>。水资源承载力可反映区域经济发展和水资源的协调关系,研究水资源承载力对于保障区域经济健康发展具有重要意义。目前,关于水资源承载力的研究方法较多,主要有模糊综合评价法<sup>[2]</sup>、多目标分析法<sup>[3]</sup>、神经网络法<sup>[4]</sup>、灰色预测法<sup>[5]</sup>、系统动力学法<sup>[6]</sup>等。然而,各方法均存在一定的局限性,如模糊综合评价法容易遗失大量有用的信息;多目标分析法的评价指标受主观权重影响大;神经网络法建模复杂、计算量大;灰色预测法只适用于短期预测;系统动力学法对数据需求大等,且单一的研究方法已难以全面评价区域水资源承载力状况。武汉市作为湖北省省会,在经济快速发展的同时,也面临着较为突出的水资源问题。武汉市水资源总量丰富,但存在水资源时空分布不均、人均水资源量短缺的特点,加之近年来城市扩张导致的水体污染加重,水资源可持续发展的压力与日俱增。鉴此,本文结合静态分析法和动态预测

法,对武汉市的水资源承载力进行综合评价和仿真模拟,分析武汉市水资源承载力变化情况,为武汉市的城市发展提供参考和建议。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

2010~2020 年社会经济数据来源于 2011~2021 年《湖北省统计年鉴》和《武汉市统计年鉴》,2010~2020 年水资源数据来源于 2011~2021 年《湖北省水资源公报》和《武汉市水资源公报》。

### 2.2 改进的 TOPSIS

TOPSIS 法是逼近理想解的多目标排序方法,通过主观赋权法确定指标权重,存在一定的不合理性。博弈论组合赋权法是在不同方法确定的基本权重之间取得最优组合,最优目标为组合权重与各基本权重间偏差最小<sup>[7]</sup>。改进的 TOPSIS 法采用层次分析法(AHP)和熵权法分别计算主、客观权重,再基于博弈组合赋权法在两者之间求得最优组合,确定组合权重,克服单一权重的片面性,计算过程如下。

(1)指标标准化。对原始数据进行标准化处理,消除量纲影响,标准化公式为:

**收稿日期:** 2023-03-15, **修回日期:** 2023-04-10

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52079101)

**作者简介:** 郭浩锋(1998-),男,硕士研究生,研究方向为水资源优化配置, E-mail: ghfwyxx@163.com

**通讯作者:** 袁艳斌(1970-),男,博士、教授、博导,研究方向为水资源优化配置, E-mail: yybjm@126.com

$$x'_{ij} = x_{ij} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (1)$$

式中,  $x'_{ij}$  为指标标准值;  $x_{ij}$  为第  $i$  年 第  $j$  个评价指标原始数据。

(2) 确定权重。运用层次分析法和熵权法分别计算主观权重  $w_1$  和客观权重  $w_2$ , 再采用博弈组合赋权求得最优组合系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ , 从而确定组合权重  $w^*$ , 即:

$$w^* = \min \left\| \sum_{j=1}^2 \alpha_j w_j^T - w_i^T \right\| \quad i=1,2 \quad (2)$$

根据矩阵的微分性质, 可得最优一阶导数条件为:

$$\sum_{j=1}^2 \alpha_j w_i w_j^T = w_i w_i^T \quad i=1,2 \quad (3)$$

式(3)对应的线性方程组为:

$$\begin{pmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \end{pmatrix} \quad (4)$$

经归一化处理得到组合系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ , 最终可得各指标的组合权重为:

$$w^* = \sum_{j=1}^2 \alpha_j w_j^T \quad (5)$$

(3) 构建加权决策矩阵。根据各指标权重, 建立规范加权决策矩阵  $Z$ :

$$Z_{ij} = (z_{ij})_{m \times n} = w_j^* \times x'_{ij} \quad (6)$$

(4) 确定正负理想解  $z^+$ 、 $z^-$ 。计算公式分别为:

$$z^+ = \{(\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \mid j \in Q^+), (\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \mid j \in Q^-)\} \quad (7)$$

$$z^- = \{(\min_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \mid j \in Q^+), (\max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \mid j \in Q^-)\} \quad (8)$$

式中,  $Q^+$ 、 $Q^-$  分别为正向、负向指标集。

(5) 计算贴近度。先计算各指标相对于最优

解、最劣解的欧氏距离  $C_i^+$ 、 $C_i^-$ :

$$C_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_j^+)^2} \quad (9)$$

$$C_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (z_{ij} - z_j^-)^2} \quad (10)$$

再计算贴近度  $C_i$ :

$$C_i = C_i^+ / (C_i^+ + C_i^-) \quad (11)$$

$C_i$  越大表示水资源承载力越好。

### 2.3 系统动力学模型

系统动力学(SD)是一门结合系统论、控制论、结构论的综合学科, 注重研究系统内部结构和行为的信息反馈机制, 从而系统化地解决复杂问题。

#### 2.3.1 系统边界

武汉市水资源承载力 SD 模型的空间边界是武汉市行政区域边界, 时间边界为 2010~2035 年, 将 2010~2020 年作为历史检验年份, 时间步长为 1 年。

#### 2.3.2 SD 模型流图

武汉市水资源承载力系统是一个由水资源、生态环境、社会、经济四个子系统共同构成的复杂系统, 四个子系统相互作用、互相影响。SD 模型共选取 54 个相关参数, 通过系统方程构建仿真模型(图 1)。

#### 2.3.3 模型检验

SD 模型构建完成后, 需先进行一致性检验和历史性检验。一致性检验可使用 Vensim 仿真软件自带的检验工具进行检验。结果显示, 模型变量符合一致性检验。历史性检验通常选取对系统

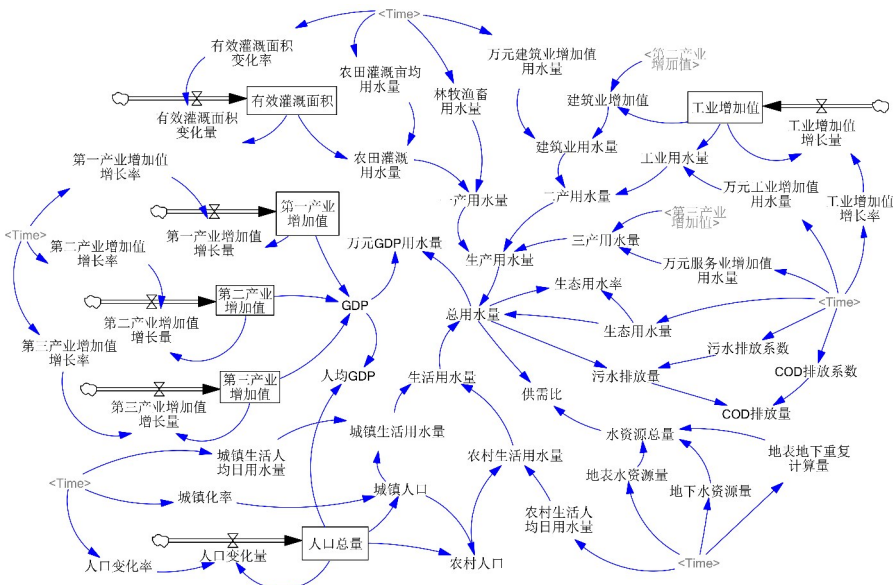


图 1 武汉市水资源承载力系统动力学模型流图

Fig. 1 Flow chart of water resources carrying capacity system dynamics model of Wuhan City

有重要影响的几个变量,将其模拟结果与真实值对比,若相对误差小于 5%,则表明模型的精确性较高<sup>[8]</sup>。选取总用水量和人口总量进行对比计算,相对误差均在 5%以内,表明模型的可信度较高,能有效分析预测问题。

### 2.3.4 方案设计

在充分考虑武汉市水资源和社会发展现状的基础上,参考《武汉市国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》,遵循科学性和可行性的原则,选取人口变化率、城镇化率、第二产业增加值变化率、第三产业增加值变化率、万元工业增加值用水量等作为决策变量来进行情景模拟预测,4 种发展模式如下:①模式 1。常规发展型。参考武汉市未来的发展规划对系统中各决策变量进行取值,保证武汉市按各项规划发展。②模式 2。经济优先型。将经济发展作为区域发展的重点,提高经济发展的速度、三大产业增加值增长率、人口增长率和城镇化率等。③模式 3。环境友好型。适当减缓武汉市未来经济社会的发展速度,通过技术改革降低生产和生活用水定额,提高城市环境质量。④模式 4。综合发展型。此模式是经济优先型和环境友好型两种模式的结合,在经济社会快速发展中降低城市用水、改善生态环境,促进可持续发展。

## 3 武汉市水资源承载力综合评价及可持续利用分析

### 3.1 指标体系构建

依据科学性、代表性、可获取性等指标选取原则,参考已有研究成果<sup>[9]</sup>,共选取 16 个评价指标,构建以武汉市水资源承载力为目标层,包括水资源、生态环境、经济、社会 4 个子系统的综合评价指标体系,并依据式(2)~(5)计算指标权重,结果见表 1。

### 3.2 综合评价结果分析

将水资源承载力评价标准分为 5 个等级(表 2)<sup>[10]</sup>。利用式(6)并结合组合权重构建加权决策矩阵,再依照式(7)~(11)计算贴近度,确定 2010~2020 年武汉市水资源承载力等级,结果见图 2、表 3。由图 2、表 3 可知,2010~2020 年武汉市水资源承载力整体呈波动上升趋势,其中 2010~2014 年间水资源承载力均为 II 级,长期为超载状态,该时期用水方式较为粗放,污染浪费严重,水资源面临较大的危机;2015~2020 年武汉市水资源承载力得到明显提升,上升至 III~IV 级,处于临界、可

表 1 武汉市水资源承载力综合评价指标体系

Tab. 1 Comprehensive evaluation index system of water resources carrying capacity in Wuhan City

目标层	准则层	指标层	性质	权重		
				主观权重	客观权重	组合权重
武汉市	水资源	年降水量	正	0.054 5	0.038 6	0.052 4
水资源	子系统	产水模数	正	0.094 3	0.075 4	0.091 7
承载力		人均水资源量	正	0.149 2	0.072 7	0.138 9
		人均综合用水量	逆	0.035 3	0.144 8	0.050 0
	生态环境	生态用水率	正	0.097 5	0.101 2	0.098 0
	子系统	建成区绿化覆盖率	正	0.138 5	0.005 6	0.120 6
		人均公共绿地面积	正	0.061 6	0.020 0	0.056 0
		化学需氧量 COD 排放量	逆	0.035 7	0.093 2	0.043 4
	社会	人口密度	逆	0.020 4	0.083 5	0.028 9
	子系统	城镇化率	正	0.037 8	0.008 2	0.033 8
		城镇生活人均日用水量	逆	0.037 8	0.084 4	0.044 1
		居民生活用水量	逆	0.070 6	0.066 0	0.070 0
	经济	人均 GDP	正	0.015 9	0.044 0	0.019 6
	子系统	万元 GDP 用水量	逆	0.078 1	0.078 3	0.078 2
		万元工业增加值用水量	逆	0.039 3	0.073 3	0.043 8
		第三产业比重	正	0.033 5	0.010 7	0.030 4

表 2 水资源承载力等级划分

Tab. 2 Classification of water resources carrying capacity

承载力	等级	意义	承载力	等级	意义
[0, 0.2)	I	严重超载	[0.6, 0.8)	IV	可承载
[0.2, 0.4)	II	超载	[0.8, 1.0]	V	良好承载
[0.4, 0.6)	III	临界			

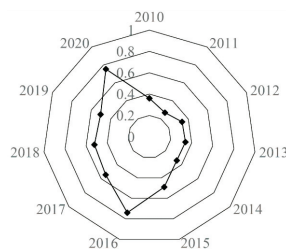


图 2 2010~2020 年武汉市水资源承载力变化情况

Fig. 2 Change of water resources carrying capacity in Wuhan City from 2010 to 2020

表 3 2010~2020 年武汉市水资源承载力评价结果

Tab. 3 Evaluation results of water resources carrying capacity in Wuhan City from 2010 to 2020

年份	承载力	等级	意义	年份	承载力	等级	意义
2010	0.360 1	II	超载	2016	0.740 6	IV	可承载
2011	0.268 4	II	超载	2017	0.543 8	III	临界
2012	0.336 8	II	超载	2018	0.522 5	III	临界
2013	0.340 7	II	超载	2019	0.503 9	III	临界
2014	0.339 9	II	超载	2020	0.754 6	IV	可承载
2015	0.491 1	III	临界				

承载状态,该时期武汉市严格用水管理,兴修节水工程,大力整治污染和修复生态,使水资源承载力逐步提升。2010~2020 年间武汉市水资源承载力变化浮动较大,2011 年的承载力最低,仅为 0.268 4,处于超载状态;2020 年的承载力最高,为 0.754 6,处于可承载状态;均值为 0.472 9,处于临界状态,供需关系较为紧张。

### 3.3 系统动力学仿真结果分析

通过构建的系统动力学模型仿真模拟 4 种模式下武汉市的社会经济发展状况和水资源利用状况,模拟结果见图 3、表 4。由图 3、表 4 可得如下结论。

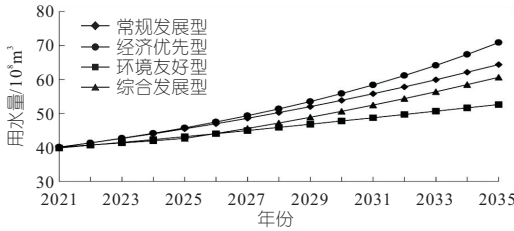


图 3 4 种模式的武汉市总用水量模拟结果

Fig.3 Simulation results of total water consumption in Wuhan City under four modes

表 4 4 种模式的主要变量模拟值

Tab.4 Simulated values of main variables for 4 models

模式	GDP/亿元		人口总量/万人		供需比		万元 GDP 用水量/m <sup>3</sup>		污水排放量/10 <sup>8</sup> t	
	2021 年	2035 年	2021 年	2035 年	2021 年	2035 年	2021 年	2035 年	2021 年	2035 年
1	17 774.40	45 832.00	1 370.35	1 718.05	1.30	0.96	22.55	14.05	16.03	23.19
2	17 774.40	51 715.30	1 370.35	1 808.14	1.30	0.87	22.55	13.49	16.03	25.51
3	17 774.40	40 186.30	1 370.35	1 634.66	1.31	1.17	22.35	12.99	15.93	16.83
4	17 774.40	48 693.60	1 370.35	1 751.35	1.30	1.02	22.55	12.41	16.03	19.41

态环境遭到进一步破坏。此模式下供需比仅为 0.87,水资源供需矛盾更突出,水资源短缺和水环境污染等水资源问题将制约武汉市的可持续发展。

(3)环境友好型。环境友好型以资源节约、环境保护为目标,通过合理规划来降低水资源的消耗并提高城市生活质量。相比常规发展模式,武汉市的总用水量大幅下降,从  $64.41 \times 10^8 \text{ m}^3$  降至  $52.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,供需比为 1.17,水资源量可满足经济发展的需求。另外,此模式下污水排放量得以控制,生态环境得到改善。但由于产业增长率降低,武汉市的经济发展也受到了相应的影响。

(4)综合发展型。综合发展型在常规发展型的基础上,综合经济优先型和环境友好型的优点,既要加速经济发展,又要改善生态环境。该模式下,武汉市 2035 年的总用水量预估为  $60.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,相比常规发展模式 and 经济发展模式均有所下降,供需比为 1.02,水资源量基本可以维持城市发展所需,而污水排放量也与环境友好模式大体一致,城市环境质量得到提升。同时武汉市的经济社会也高速发展,GDP 将增至 48 693.60 亿元,人口总量也将达到 1 751.35 万人,经济水平显著。此外,该模式的万元 GDP 用水量为  $12.41 \text{ m}^3$ ,为 4 种模式的最小值,表明该模式下的水资源利用率最高。综合发展模式在强调经济

(1)常规发展型。依据武汉市十四五规划和 2035 年远景目标进行设计,至 2035 年,武汉市人口总量预计达到 1 718.05 万人,GDP 将由 17 774.40 亿元增至 45 832.00 亿元,经济社会得到快速发展。然而,武汉市的总用水量也提高到了  $64.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,供需比为 0.96,水资源量将难以支撑区域经济发展,且该模式下的污水排放量也有所增加,进一步加剧了水资源负荷。

(2)经济优先型。经济优先模式下武汉市的经济的发展最为迅速,2035 年的 GDP 预计为 51 715.30 亿元,人口总量将达 1 808.14 万人,经济高速发展的同时也消耗了大量的水资源,总用水量较常规发展模式提高了  $6.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,达  $70.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,同时污水排放量也大幅增加,生

发展的同时,也注重资源环境的保护,实现了可持续发展,具有一定的可行性。

4 种发展模式,综合发展模式在保护环境、节约资源的前提下注重经济发展,实现了水资源的开发利用最大化,符合国家的发展战略和武汉市的未来规划,有利于将武汉市建设成为“美丽中国”典范城市。

## 4 结论

a. 基于改进的 TOPSIS 法和系统动力学模型对武汉市水资源承载力进行了综合评价和仿真模拟,确定 2010~2020 年间武汉市水资源承载力水平整体呈上升趋势,综合发展模式最利于实现武汉市社会经济和水资源的协调发展。

b. 静态评价和动态模拟相结合,实现了对区域水资源承载力的全面深入分析,能为武汉市的未来发展提供理论支持。

### 参考文献:

[1] LYU J, MO S, LUO P, et al. A quantitative assessment of hydrological responses to climate change and human activities at spatiotemporal within a typical catchment on the Loess Plateau, China[J]. Quaternary international, 2019, 527(0): 1-11.

[2] 李治军,董智,陈末,等. 基于模糊分析法的合肥市水资源承载力评价[J]. 水电能源科学, 2020, 38(2): 44-46, 43.

[3] 王金星,杨银科,盛强. 基于改进 TOPSIS 模型的甘

- 肃省水资源承载力评价[J]. 水电能源科学, 2022, 40(11): 35-39.
- [4] 薛晴, 杨侃. 基于 BP 神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 86-99.
- [5] 刘志明, 周真中, 王永强, 等. 基于灰色预测模型的区域水资源承载力预测分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(9): 34-39.
- [6] 夏继勇. 过境水影响区域水资源承载力评价方法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4): 40-43, 47.
- [7] 崔威, 李晓英, 郭宜薇. 基于博弈论组合赋权的水电站事故风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英

文), 2022, 20(2): 408-416.

- [8] 杨子江, 韩伟超, 杨恩秀. 昆明市水资源承载力系统动力学模拟[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 594-602.
- [9] 王建华, 翟正丽, 桑学锋, 等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1023-1029.
- [10] MORCILLO J D, FRANCO C J, ANGULO F. Simulation of demand growth scenarios in the Colombian electricity market: an integration of system dynamics and dynamic systems[J]. Applied energy, 2018, 216: 504-520.

## Comprehensive Evaluation of Water Resources Carrying Capacity and Sustainable Utilization in Wuhan City

GUO Hao-feng, YUAN Yan-bin, CAO Yang, LIAN Yi-wen

(School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to coordinate the balance between water resources supply and demand and promote the sustainable use of water resources in Wuhan City, this paper conducts a comprehensive evaluation and simulation of the water resources carrying capacity of Wuhan based on the improved TOPSIS method and system dynamics, and realizes a combination of static evaluation and dynamic prediction. The results show that the overall water resources carrying capacity of Wuhan City fluctuates and increases from 2010 to 2020, and the overall level is in a critical state; By simulating the development of Wuhan City from 2021 to 2035, the water resources carrying capacity of Wuhan City under the conventional development model has exceeded the limit and it is difficult to maintain the demand; The economic priority model sacrifices resources and environment for economic speed up, which shows the most serious water resources; The environment-friendly model can reduce water consumption and improve the ecological environment, but the economic development is also limited to a certain extent; The integrated development model, from the perspective of coordination and balance, can achieve resource conservation and environmental protection while satisfying the steady and rapid economic development, and obtain the maximum economic and ecological benefits with the minimum water consumption, achieving the harmonious development of human and nature.

**Key words:** water resources carrying capacity; sustainable utilization; TOPSIS method; system dynamics; Wuhan City

(上接第 13 页)

- [2] 张婷婷. 湘江流域蒸发皿蒸发量的变化趋势及原因分析[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013.
- [3] ZHANG Y, YU P H, TIAN Y S, et al. Exploring the impact of integrated spatial function zones on land use dynamics and ecosystem services tradeoffs based on a future land use simulation (FLUS) model[J]. Ecological indicators, 2023, 150: 110246.
- [4] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976 年以来北洛河流

域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 54-63.

- [5] CHEN J, BAN Y, LI S. China: open access to earth land-cover map [J]. Nature, 2014, 514(7523): 434.
- [6] LI S X, FENG C, YANG L. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration in the Xiangjiang River Basin from 2000 to 2020[J]. Hydrology research, 2023, nh2023143.

## Impact of Land Use on Evapotranspiration in Xiangjiang River Basin

FENG Chang<sup>1</sup>, LI Jia-jie<sup>2</sup>, YANG Liu<sup>1</sup>, LI Su-xun<sup>3</sup>

(1. School of Geography and Tourism, Hengyang Normal University, Hengyang 421002, China;

2. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

3. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** Taking the section of Hunan in Xiangjiang River Basin(XRB) as an example, based on the land use and evapotranspiration data in 2000, 2010 and 2020, this study discusses the characteristics of land use type, area change and mutual conversion in the XRB by using the methods of land use transfer matrix, integrated and single dynamic attitude model and GIS spatial analysis. The effects of land use type, area and conversion on evapotranspiration in the study area were revealed. The results show that the area, proportion and spatial pattern of land use types in the XRB have undergone great changes, especially the frequent conversion among land use types. However, in the past 20 years, the order of main land use areas in the XRB remained stable: forest > farmland > grassland > construction land > water area. The order of theoretical annual evapotranspiration based on land use type in the XRB is forest > grassland > farmland > construction land, which is different from the order of actual annual total evapotranspiration based on land use area: forest > farmland > grassland > construction land. Therefore, the land use type and land use area to evapotranspiration in the study area should be considered comprehensively. The conversion of different land use types in the XRB caused the change of evapotranspiration in different trends and degrees. The conversion between construction land and other land use types has a relatively large impact on evapotranspiration in the study area, while the conversion of other land use types has a small impact on regional evapotranspiration. The research results can provide scientific reference for land use planning and water resources management in the basin.

**Key words:** land use; evapotranspiration; spatiotemporal pattern; Xiangjiang River Basin