

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.01.003

# 江汉平原水域空间格局时空演变特征及其驱动因素分析

唱彤, 郦建强, 郭旭宁, 李云玲

(水利部水利水电规划设计总局, 北京 100120)

**摘要:**为从景观生态角度揭示江汉平原水域空间变化和影响因素, 利用GIS和生态统计技术, 通过土地利用转移、空间自相关、景观指数和冗余分析等方法, 对2000—2020年江汉平原水域空间格局演变及其驱动因素进行研究。结果表明:2000—2020年, 由于人造地挤占耕地、耕地挤占水域空间, 江汉平原水域面积减少了36%;水域全局和局部莫兰指数变化明显, 边界密度急剧减小, 四湖流域等局部水域空间聚集度和连通性显著下降;降水、气温以及耕地和人造地解释了水域景观变化的45.8%, 其中降水和气温影响微弱, 连片耕地侵占是水域面积减少的主要原因之一, 人造地对水域破碎化贡献更大更直接。2000年以来江汉平原水域面积变化显著, 分布趋于破碎, 形状复杂度和连通性降低, 表征农业活动和城镇化的耕地和人造地对水域景观格局影响更为剧烈。

**关键词:** 水域空间; 空间自相关; 景观格局演变; 冗余分析; 江汉平原

**中图分类号:** X24; P96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)01-0021-12

水域空间是水流系统的载体<sup>[1]</sup>, 不仅与水生态系统关系密切, 还发挥着滞蓄洪水、水资源供给、水景观营造、水文化传承和改善区域小气候等重要作用。人类自古逐水而居, 对河湖系统的改造也从未停止。无论围湖造田还是退耕还湖、沟通水系, 都在不同时代背景下发挥着特定作用, 也体现了不同时代人们的自然观以及对经济、社会等规律的理解。认识水域空间格局、演变过程及其与人类活动的因果关系, 对水域空间功能发挥、保护和修复以及支撑经济社会可持续发展意义重大。空间格局又称景观格局, 是土地利用或景观的结构组成特征和在空间上的排列和配置关系<sup>[2]</sup>, 决定着资源和物理环境分布形式和组合<sup>[3]</sup>, 与景观中的物理、化学、生态等过程密切相关。景观格局决定着区域生态安全格局<sup>[4-6]</sup>, 对抗干扰能力、恢复能力、系统稳定性和生物多样性有深刻影响<sup>[7]</sup>。不少研究从景观生态学角度对湖泊湿地、海岸景观、流域景观、绿色基础设施等的空间分布特征进行讨论<sup>[8-11]</sup>, 定量描述景观要素分布的时空演变过程, 并寻求驱动景观格局变化的自然或人为因素<sup>[12-13]</sup>, 为原有自然或人工景观的保护修复与利用提供重要基础和科学依据<sup>[14-15]</sup>。

江汉平原历来以湖沼众多闻名, 是古云梦泽的主要组成部分。由于泥沙不断淤积和围垦活动, 江汉平原湖泊面积持续萎缩。根据相关文献资料<sup>[16-17]</sup>, 湖泊面积从清末民初的约26 000 km<sup>2</sup>, 缩减至新中国成立之初的约8 500 km<sup>2</sup>, 经历了20世纪50—70年代3次大规模围湖造田, 70年代末湖泊面积锐减至2 373 km<sup>2</sup>。东荆河上连汉江下通长江, 是汉江下游唯一的分流河道, 对汉江分洪起着重要作用, 由于水土流失导致的河道淤积和河道沿线取用水活动, 东荆河萎缩非常严重, 个别年份几近断流, 水环境容量降低和水生态系统受损等问题也随之而来。不少研究对江汉平原河湖水系演变进行讨论。贾敬禹<sup>[18]</sup>梳理了江汉平原河湖水系近2 000 a的演变历程; 魏显虎等<sup>[19]</sup>认为人类活动的强弱直接影响湖泊水域变化; 冯莞舒等<sup>[20]</sup>对江汉湖群衰减聚集区域进行探测, 认为衰减主要发生在以传统粗放型生产方式为主的农村地区; 还有学者对区域内湿地、耕地等土地利用类型的变化进行了分析讨论<sup>[21-23]</sup>。已有研究较少从景观格局角度对江汉平原水域格局总体演变进行分析, 并定量讨论水域景观变化的影响因素。

收稿日期: 2022-09-15; 网络出版日期: 2023-02-03

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//32.1309.P.20230203.1104.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2018YFC0407206)

作者简介: 唱彤(1983—), 女, 北京人, 高级工程师, 博士, 主要从事水利规划与河流生态方面研究。

E-mail: comechang@126.com

本文从土地利用变化入手,对江汉平原2000—2020年土地利用状况和水域景观格局指数进行分析,定量讨论江汉平原水域空间转移状况、空间自相关关系以及景观指数的时空变化等;考虑自然和人类活动影响,分析水域空间演变的驱动因素。研究结果可为江汉平原水域空间保护与恢复和可持续发展提供科学依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域

江汉平原地处湖北中南部,西起枝江和当阳,东迄黄梅和阳新,北至荆门和钟祥,南与洞庭湖平原相连,由长江与汉江冲积而成,面积约4.7万 $\text{km}^2$ ,是长江中下游平原的重要组成部分。江汉平原属亚热带季风气候,温暖湿润、雨热同期、热量充足。年均气温约 $17^\circ\text{C}$ , $10^\circ\text{C}$ 以上活动积温为 $5\,100\sim 5\,300^\circ\text{C}$ ,年均降水量为 $1\,100\sim 1\,300\text{mm}$ 。区域地势平坦,海拔多在50 m等高线以下,水网交织,湖泊星罗棋布,是湖北经济社会发展的核心区域和中国重要商品粮基地。江汉平原位置示意如图1。

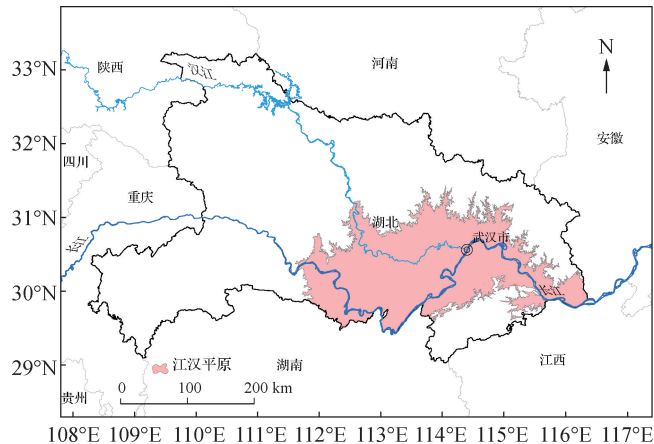


图1 江汉平原位置示意

Fig. 1 Location of the Jianghan Plain

### 1.2 数据来源与处理

采用数据包括30 m精度土地利用数据、降水和气温数据。土地利用数据来自中国发布的2000年、2010年和2020年3期全球地表覆盖(GlobeLand30)数据产品(<http://www.globeland30.org/>),该产品主要采用美国陆地资源卫星(Landsat)的TM5、ETM+、OLI多光谱影像和中国环境减灾卫星(HJ-1)30 m多光谱影像和高分一号(GF-1)多光谱影像研制而成,数据总体精度在83.5%以上。对研究区数据进行随机抽样,通过野外调研开展分类数据验证,数据分类精度在90%以上,能够满足研究需要。研究区共涉及耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、人造地和裸地8种土地类型,其中,人造地指由人工建造活动形成的地表,包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等。考虑本文以水域空间为主要研究对象,将湿地和水体合并成为水域空间;其余土地利用类型含义如表1所示。降水和气温数据来自中国1 km分辨率逐月降水量和平均气温数据集(1901—2020年)<sup>[24-25]</sup>。

表1 土地利用类型及其含义

Table 1 Land use types and its description

土地利用类型	含义
耕地	用于种植农作物的土地, 包括水田、灌溉旱地、雨养旱地、菜地、牧草种植地、大棚用地、以种植农作物为主间有果树及其他经济乔木的土地, 以及茶园、咖啡园等灌木类经济作物种植地
林地	乔木覆盖且树冠盖度超过30%的土地, 包括落叶阔叶林、常绿阔叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、混交林以及树冠盖度为10%~30%的疏林地
草地	天然草本植被覆盖, 且盖度大于10%的土地, 包括草原、草甸、稀树草原、荒漠草原以及城市人工草地等
灌木地	灌木覆盖且灌丛盖度高于30%的土地, 包括山地灌丛、落叶和常绿灌丛, 以及荒漠地区盖度高于10%的荒漠灌丛
水域	位于陆地和水域交界带, 有浅层积水或土壤过湿的土地, 多生长有沼生或湿生植物, 包括内陆沼泽、湖泊沼泽、河流洪泛湿地、森林/灌木湿地、泥炭沼泽、红树林、盐沼等; 陆地范围液态水覆盖区域, 包括江河、湖泊、水库、坑塘等
人造地	由人工建造活动形成的地表, 包括城镇等各类居民地、工矿、交通设施等, 不包括建设用地内部连片绿地和水体
裸地	植被覆盖度低于10%的自然覆盖土地, 包括荒漠、沙地、砾石地、裸岩、盐碱地等

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 土地利用动态转移分析

土地利用转移矩阵是系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述<sup>[26]</sup>, 是将研究期始末土地利用结构和转移面积以二维矩阵的形式表达, 既能反映研究区某时间节点的地类结构与面积, 还能分析研究期始末地类的转入转出情况, 揭示土地利用格局的时空演化过程。数学表达如式(1)所示。

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{n1} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $S$  为研究期始末土地利用状况;  $S_{ij}$  为研究期内土地类型  $i$  转换成土地类型  $j$  的面积;  $i, j = 1, 2, \dots, n$ ,  $n$  为土地利用类型数。本文通过空间相交计算, 得到不同时段土地利用转移状况。

#### 1.3.2 空间自相关分析

空间自相关分析是研究邻近位置属性相关性的空间统计学方法, 是针对某种特征属性, 对某空间单元与其周围单元间进行的空间自相关程度计算, 以分析这些空间单元在空间上的离散或聚集等分布特性。以全局自相关和局部自相关揭示研究区的整体特征和局部分异。全局自相关是对变量空间聚集特征的综合评价, 以全局莫兰指数(Global Moran's  $I$ )表征, 计算公式如式(2)所示<sup>[27]</sup>。局部自相关表达局部区域的聚集现象或异常值, 描述空间分异规律, 以局部莫兰指数(Anselin Local Moran's  $I$ )表征, 计算公式如式(3)、式(4)所示<sup>[28]</sup>。

$$I = m \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} \sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x})^2 \right] \quad (2)$$

式中:  $I$  为全局莫兰指数;  $m$  为区域空间单元总数;  $x_i$  和  $x_j$  分别为随机变量  $x$  在地理单元  $i$  和  $j$  上的属性值;  $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$ , 为  $m$  个空间单元样本属性值的平均值;  $w_{ij}$  为区域  $i, j$  的邻接空间权重矩阵, 表示空间对象的邻接关系。当区域  $i, j$  相邻,  $w_{ij} = 1$ , 反之  $w_{ij} = 0$ 。  $I$  的取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $I > 0$  表示空间正相关, 即具有空间聚集性;  $I < 0$  表示空间负相关, 即不具空间聚集性;  $I$  接近于 0 表示不存在空间自相关性也即随机分布。

$$I_i = \left( \frac{x_i - \bar{x}}{s_i^2} \right) \sum_{j=1, j \neq i}^m w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (3)$$

$$s_i^2 = \sum_{j=1, j \neq i}^m (x_j - \bar{x})^2 / (m - 1) \quad (4)$$

式中： $I_i$ 为局部莫兰指数，当 $I_i$ 值为正时表示存在高值(或低值)空间聚集， $I_i$ 值为负时表示不相似值的空间聚集。

根据土地利用数据精度和水域平均斑块面积，综合考虑尺度效应，选取 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ 网格单元划分1 674个网格，计算每个网格内的水域面积，并与网格面积相除得到不同时期水域面积率网格图。计算水域面积率全局莫兰指数和局部莫兰指数，分析是否存在空间集聚或异常值及其出现的位置。

### 1.3.3 景观格局分析

在类型尺度上，选取景观面积比例( $P_{\text{LAND}}$ )、边界密度( $D_E$ )、景观分裂度( $I_{\text{LD}}$ )和聚合度( $I_A$ )等景观指数，定量描述水域空间面积、形状、空间聚散度和连通性等特征，揭示江汉平原水域景观空间分布状况。其中， $P_{\text{LAND}}$ 表示景观中某类型斑块的面积占整个景观面积的百分比； $D_E$ 表征景观形状复杂程度，数值越大形状越复杂； $I_{\text{LD}}$ 表征景观中不同斑块分布的分离程度，反映景观的破碎化状况，数值越大景观聚集度越低； $I_A$ 表征景观斑块间的连通性，数值越小景观越离散。各景观指数的数学表达见文献[6, 15]。在 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ 网格图内，计算各网格的水域景观指数，采用反距离加权插值法(IDW)对景观指数进行空间插值，得到不同时期江汉平原水域景观指数的空间分布。

## 2 结果与分析

### 2.1 江汉平原水域空间转换变化过程

在研究时段内，江汉平原水域空间发生了较大变化，通过土地利用转移矩阵(表2—表4)可知，2000—2010年，水域面积减少最多，为 $982\text{ km}^2$ ，减少比例为13%，向耕地转移净面积最多，为 $806\text{ km}^2$ ；耕地和人造地面积均有所增加，分别为 $528\text{ km}^2$ 和 $589\text{ km}^2$ ，其中，耕地增加主要来自林地和水域的转入，人造地增加主要来自耕地的转入，面积为 $510\text{ km}^2$ 。2010—2020年，水域面积加速减少，减少面积 $1\,741\text{ km}^2$ ，仍然主要转向耕地，转为耕地的净面积为 $1\,834\text{ km}^2$ ；耕地面积数量减少不多，为 $140\text{ km}^2$ ，但存在明显的水域转为耕地、耕地转为人造地的转换路径；人造地增加了 $2\,393\text{ km}^2$ ，面积是2010年的近2倍。经过20 a土地利用演变，江汉平原人造地面积增加近 $3\,000\text{ km}^2$ ，是2000年的2.5倍，耕地面积略有增加，增加比例为1%，主要通过耕地转为人造地、再由水域空间补给耕地的方式实现。2000—2020年江汉平原水域转向耕地和由耕地转为人造地的面积分布如图2所示。水域向耕地转移较为集中的地区为洪湖、仙桃等；耕地向人造地的转移分布较广，在沿江局部河段和都市圈附近存在聚集现象，在其他区域呈较均匀的离散分布。

表2 2000—2010年江汉平原土地利用转移矩阵

Table 2 Land use transition matrix of the Jiangnan Plain in 2000—2010

单位： $\text{km}^2$

土地利用类型	耕地	林地	草地	灌木地	水域	人造地	裸地	2000年合计
耕地	31 898.0	234.3	97.1	0.2	1 058.0	837.7	0.2	34 125.5
林地	480.0	1 596.7	54.2	0.4	139.0	51.2	0.1	2 321.6
草地	84.0	133.7	372.7	0.1	34.9	38.9	0	664.2
灌木地	0.3	0.4	0.1	2.4	0	0	0	3.2
水域	1 863.5	228.9	88.8	0	5 363.8	31.3	12.0	7 588.4
人造地	327.7	13.8	18.0	0	10.3	1 625.0	0	1 994.9
裸地	0.1	0.1	0	0	0	0	0.3	0.5
2010年合计	34 653.6	2 208.0	631.0	3.1	6 606.1	2 584.0	12.6	46 698.2

表 3 2010—2020 年江汉平原土地利用转移矩阵

Table 3 Land use transition matrix of the Jianghan Plain in 2010—2020

单位: km<sup>2</sup>

土地利用类型	耕地	林地	草地	灌木地	水域	人造地	裸地	2010 年合计
耕地	31 213.0	269.0	97.9	0.3	715.7	2 354.0	3.7	34 653.6
林地	370.7	1 380.4	141.2	0.4	182.3	114.3	18.8	2 208.0
草地	119.0	64.6	285.1	0.1	68.0	94.2	0	631.0
灌木地	1.4	0.7	0	0.9	0	0	0	3.1
水域	2 549.2	20.6	29.3	0	3 879.6	121.0	6.4	6 606.1
人造地	260.5	6.0	8.4	0	16.0	2 293.1	0	2 584.0
裸地	0.2	0.2	0	0	3.8	0	8.4	12.6
2020 年合计	34 513.9	1 741.5	561.9	1.6	4 865.3	4 976.6	37.3	46 698.2

表 4 2000—2020 年江汉平原土地利用转移矩阵

Table 4 Land use transition matrix of the Jianghan Plain in 2000—2020

单位: km<sup>2</sup>

土地利用类型	耕地	林地	草地	灌木地	水域	人造地	裸地	2000 年合计
耕地	30 490.3	291.4	112.6	0.2	467.2	2 748.4	15.5	34 125.5
林地	570.5	1 255.8	114.2	0.3	118.8	259.6	2.3	2 321.6
草地	136.9	98.9	255.9	0.1	63.5	109.0	0	664.2
灌木地	1.4	0.7	0	1.0	0.1	0	0	3.2
水域	3 045.9	85.3	66.5	0	4 203.5	168.0	19.2	7 588.4
人造地	268.8	9.3	12.7	0	12.3	1 691.7	0	1 994.9
裸地	0.1	0.1	0	0	0	0	0.3	0.5
2020 年合计	34 513.9	1 741.5	561.9	1.6	4 865.3	4 976.6	37.3	46 698.2

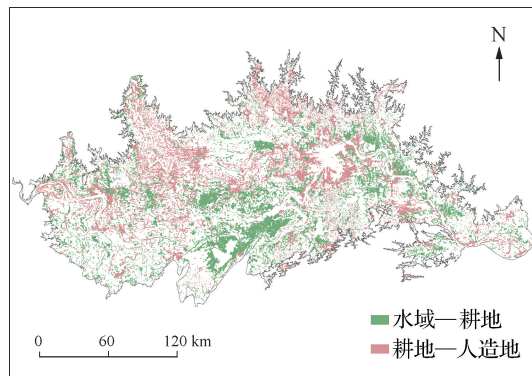


图 2 2000—2020 年江汉平原水域转为耕地和耕地转为人工地面积分布

Fig. 2 Spatial distribution of water area changed to farmland and farmlands changed to artificial surface on the Jianghan Plain in 2000—2020

## 2.2 江汉平原水域空间自相关动态变化

在  $P=0.01$  的显著水平下, 2000 年、2010 年和 2020 年江汉平原水域全局莫兰指数分别为 0.563、0.566 和 0.421, 江汉平原整体上存在水域面积率高值与高值聚集、低值与低值聚集的空间聚类现象。2000—2010 年全局莫兰指数基本维持稳定, 2010—2020 年自相关程度有所减弱, 说明水域面积率高低值的聚集程度有

所降低, 相邻区域水域空间趋同性正在下降。

水域局部空间自相关特征如图3所示, 统计聚集与异常值类型网格数量, 结果如表5所示。2000—2020年, 江汉平原水域空间不相关的网格数量有所增加, 增加比例为9%。水域空间高值聚集的网格数量持续减少, 近20 a减少了约1/4, 且前10 a的减少速度更快。水域空间低值被高值包围的网格数量有所增加, 且随时间推移从主要分布在高值聚集区域周边逐渐向区域内部延伸, 表明水域空间连通性正在减弱, 破碎度正在增加, 且2010—2020年表现更为突出。低值聚集的网格数量略有减少, 从空间分布看, 低值聚集区从2000年主要分布在江汉平原南北侧边缘演变成向江汉平原腹地发展, 特别表现在四湖流域等。

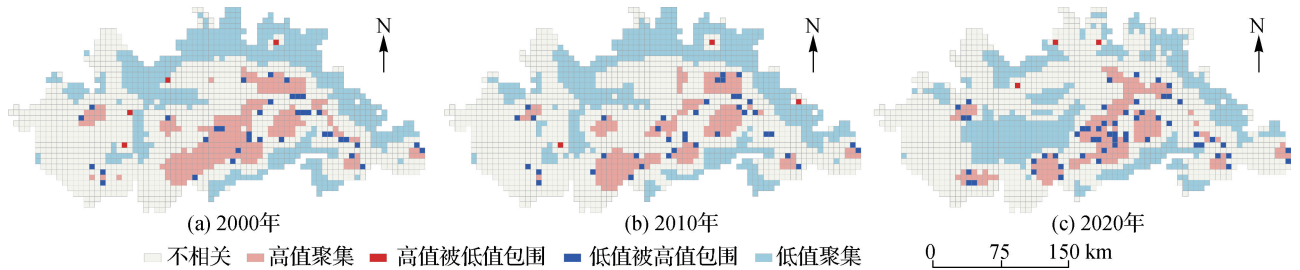


图3 2000—2020年江汉平原水域空间LISA聚集图

Fig. 3 LISA cluster map of water area on the Jiangnan Plain in 2000—2020

表5 2000—2020年江汉平原水域空间自相关类型统计

Table 5 Types of the spatial autocorrelation of the water area on the Jiangnan Plain in 2000—2020 单位:个

年份	不相关	高值聚集	高值被低值包围	低值被高值包围	低值聚集
2000年	898	236	4	37	499
2010年	957	183	3	39	492
2020年	980	176	3	55	460

### 2.3 江汉平原水域空间格局动态变化特征

江汉平原类型尺度水域景观指数计算结果如表6所示。2000—2020年, 江汉平原水域面积率( $P_{LAND,W}$ )和边界密度( $D_{E,W}$ )持续下降, 且后10 a下降更快; 水域面积率从16.2%下降为10.4%, 水域面积减小为原来的约60%; 水域边界密度降为原来的约40%, 水域形状复杂度明显降低, 水域边界趋于简单化或规整化。水域景观分裂度指数( $I_{LD,W}$ )变化不大, 水域破碎度基本维持原有状态。水域聚合度指数( $I_{A,W}$ )略有增加, 表明水域连通性有所增加。从整体看, 近20 a水域面积持续减少, 水域边界趋于简单化和规整化, 连通性略有增加。

表6 2000—2020年江汉平原水域景观指数

Table 6 Landscape metrics of water area at class level on the Jiangnan Plain in 2000—2020

年份	$P_{LAND,W} / \%$	$D_{E,W} / (m \cdot ha^{-2})$	$I_{LD,W}$	$I_{A,W} / \%$
2000年	16.2	12.9	0.998 8	94.0
2010年	14.1	10.1	0.997 3	94.6
2020年	10.4	5.9	0.998 5	95.7

通过景观指数插值计算, 得到江汉平原水域面积率、水域景观分裂度指数和水域聚合度指数的空间分布。水域面积率空间分布状况如图 4 所示, 小于 10% 的区域在 2000 年主要分布在江汉平原边缘区域及天门、潜江东部、监利北部和汉川西南部的一些区域, 2010 年扩展到潜江全域和江陵部分区域, 到 2020 年, 扩展趋势大大增加; 水域面积率小于 5% 的区域在江汉平原中西部连片分布; 水域面积率在 20% ~ 40% 的区域, 从 2000 年的呈带状贯通式分布演变为 2020 年的面积缩减为原来的约一半, 且呈相对离散分布; 水域面积率在 40% 和 60% 以上的区域面积 2020 年较 2000 年分别减少了 76% 和 95%。水域面积率网格数量统计如表 7 所示。

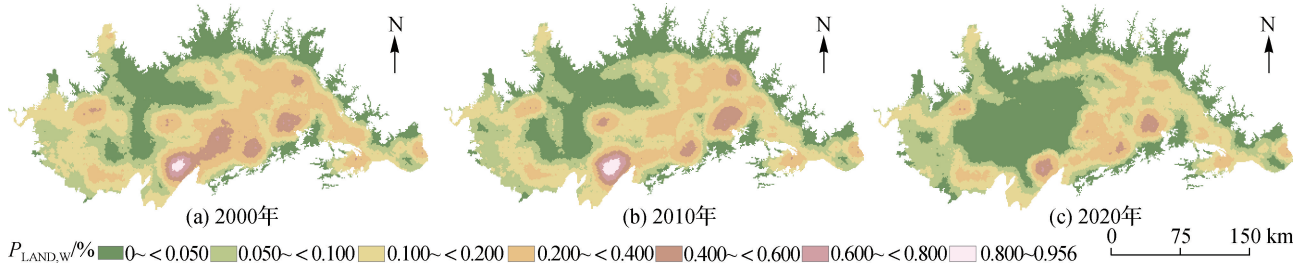


图 4 2000—2020 年江汉平原水域面积率空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of percentage of water area on the Jianghan Plain in 2000—2020

表 7 不同水域面积率网格数量统计表

Table 7 Grid number of rates of water area

年份	$P_{LAND,W} < 10\%$	$20\% < P_{LAND,W} < 40\%$	$P_{LAND,W} > 40\%$	$P_{LAND,W} > 60\%$
2000 年	22 266	10 548	2 430	396
2010 年	25 904	7 419	2 017	577
2020 年	30 984	5 279	597	13

水域景观分裂度指数空间分布如图 5 所示, 变化主要发生在 2010—2020 年, 数值趋近于 1 的区域面积显著增加且连片分布, 表明原有的水域聚集分布区域正在萎缩或消失, 以四湖流域、仙桃以及武汉市部分区域等最为显著。江汉平原局部区域水域空间正向分布更加离散和破碎的方向演变。

水域聚合度指数空间分布如图 6 所示, 2000 年江汉平原大部分区域聚合度指数在 60% 以上; 2000—2010 年间, 中西部部分区域聚合度略有下降, 水域连通性有所降低; 2010—2020 年聚合度下降趋势显著, 以仙桃、汉川、天门以及四湖流域等为主要区域, 连通性显著减弱, 破碎度增加。

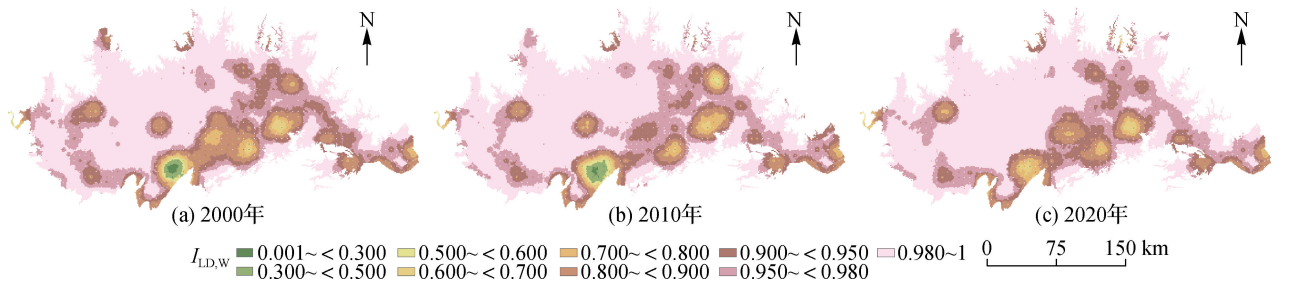


图 5 2000—2020 年江汉平原水域景观分裂度指数分布

Fig. 5 Spatial distribution of Landscape Division Index of water area on the Jianghan Plain in 2000—2020

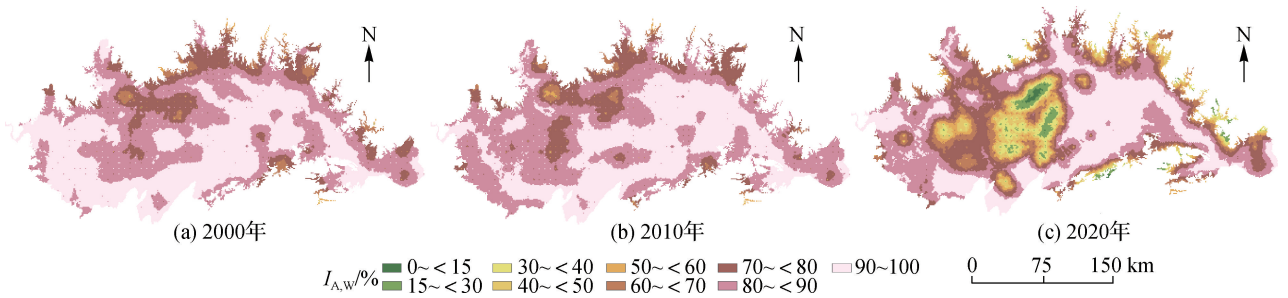


图6 2000—2020年江汉平原水域聚合度指数分布

Fig. 6 Spatial distribution of Aggregation Index of water area on the Jiangnan Plain in 2000—2020

### 3 江汉平原水域空间格局演变的影响因素分析

水域景观格局是自然和人为因素共同作用的结果<sup>[29]</sup>。江汉平原地势相对平坦低洼，地理空间异质性不明显，选取对水域空间产生直接影响的降水和气温作为自然因素。江汉平原自古是鱼米之乡，是中国重要的粮食主产区和著名的水产区，同时又是湖北省经济社会和文化发展的核心区域，人口密集，人类活动剧烈，考虑人类活动与土地状况的密切联系，以耕地和人造地演变表征农业生产、城镇化进程和经济社会发展等人类活动，作为人为因素。采用 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ 网格图，以网格内的降水、气温以及耕地和人造地的面积率、连通性和景观分裂度指数作为解释变量，以水域面积率、聚合度指数和景观分裂度指数作为响应变量，选取水域面积占比较高或面积变化较大的743个网格为样方，通过冗余分析寻求水域空间格局演变的驱动因素。结果显示，在 $P=0.002$ 的显著水平下，降水、气温以及耕地和人造地变化共解释了45.8%的水域空间景观数据。通过方差分析，识别自然和人为因素各自的贡献率以及共同作用的贡献率，结果表明，在 $P=0.002$ 的显著水平下，降水和气温的单独效应为2.3%，耕地和人造地的单独效应为44.3%，共同作用部分为0.8%。

由于自然因素作用十分微弱，为进一步明确人类活动的影响，以耕地(Ag)和人造地(Ar)景观指数为解释变量，以降水和气温为协变量，通过偏冗余分析，在剔除降水和气温影响后，得到耕地和人造地对水域空间的影响。结果表明，在 $P=0.002$ 的显著水平下，前2个约束轴解释了44.5%的水域空间景观数据方差，形成的双序图如图7所示。水域空间面积率与连通性呈正相关，即水域面积率越大，连通性越高；聚散程度与面积率和连通性存在负相关关系，即水域景观越破碎，连通性越弱，水域面积率也越低。耕地与水域景观具有明显的相关关系，在耕地面积率( $Ag-P_{\text{LAND,W}}$ )和连通性( $Ag-I_{\text{A,W}}$ )变化梯度轴上，最适值排序为水域空间分裂度>连通性>水域面积率，表明耕地面积率和连通性与水域面积率和连通性呈负相关，且对水域面积率的影响最大，其次为水域连通性；从耕地分裂度( $Ag-I_{\text{LD,W}}$ )变化梯度轴看，耕地分布越离散则水域面积率越大、连通性越强，且根据水域景观指数在耕地分裂度梯度轴上的投影距原点距离，离散分布的耕地对水域面积率的作用较对水域连通性的作用更显著。人造地面积率( $Ar-P_{\text{LAND,W}}$ )、连通性( $Ar-I_{\text{A,W}}$ )和分裂度( $Ar-I_{\text{LD,W}}$ )指数箭头间的夹角均小于 $90^\circ$ ，呈正相关关系，且作用相对集中，在人造地3个景观指数梯度轴上，水域空间格局最适值的排序为景观分裂度>连通性>水域面积率，且人造地景观指数与水域空间破碎程度呈较强的正相关，与水域面积呈较强的负相关，表明人造地大面积连片分布，直接影响区域的水域面积率，并导致水域景观相对破碎和离散分布。

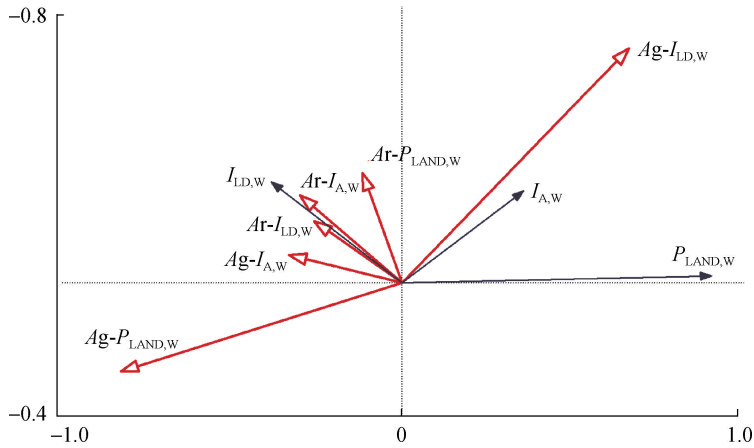


图7 江汉平原水域景观与耕地和人造地的冗余分析排序

Fig. 7 Redundancy analysis ordination of water landscape with farmland and artificial surface on the Jiangnan Plain

湖泊是抵御湖区洪水的第一道天然屏障, 湖泊面积减少必然带来蓄滞洪能力的减弱。根据潘方杰等<sup>[30]</sup>建立的江汉平原湖泊水面与可调蓄水量的相关关系, 湖泊面积减少使得可调蓄水量减少近40%; 如针对典型洪水, 需考虑来水过程、预留湖泊容积、优化调度以及湖泊周边水利设施等对流域防洪的综合影响, 进一步开展深入研究。此外, 受数据精度限制, 除已知垸堤外, 宽度远小于30 m的未知垸堤难以体现在现有尺度研究中, 可能造成对水域破碎程度、连通性等的评价趋于乐观, 后续将加强对垸堤数据的更新并开展更小尺度水域格局演变分析。

江汉平原洲滩民垸众多, 作为流域防洪体系的重要组成部分, 发挥着行蓄洪水的作用, 根据耕地、人造地对水域空间影响分析结果, 从防洪安全角度出发, 应持续推进洲滩民垸实施单退(退人不退地)和双退(退人退地), 巩固退垸行洪成效, 提升防洪能力。随着武汉“1+8”城市圈的发展, 江汉平原城市化进程将进一步加速, 人类活动强度也将进一步加大。考虑水域空间格局演变特征, 应厘清耕地、水域和人造地的空间关系, 按照“四水四定”原则, 严格控制城市发展边界, 严守耕地保护红线, 严格划定与管控水域空间。城市建设应遵循低影响开发原则, 维持水域空间的连通性和完整性, 同时强化土地利用规划的作用, 提高城市土地利用效率。

## 4 结 论

本文基于GlobeLand30全球地表覆盖数据, 分析水域空间转移状况、水域空间自相关状况以及水域景观指数时空变化, 揭示江汉平原水域空间时空演变特征, 并结合降水和气温数据, 识别影响水域空间演变的关键驱动因素。主要结论如下:

(1) 2000—2020年, 江汉平原水域面积减少约2700 km<sup>2</sup>, 占水域总面积的36%, 主要被耕地侵占, 而耕地面积基本没变的原因是一部分耕地面积又转为人造地。快速的城市化进程使得人造地面积在20 a间增长了约2.5倍, 新增面积约90%是通过间接侵占水域空间的方式实现, 即人造地挤占耕地、减少的耕地面积通过挤占水域空间补足。围湖造田一直是影响江汉平原湖泊演变的主要因素之一, 然而最近20 a在围湖造田表象的背后又呈现新的变化。

(2) 江汉平原水域面积萎缩与聚集性、连通性减弱和形状简单化趋势相互伴随。水域全局自相关程度明显减弱, 水域空间聚集分布面积减少约1/4; 边界密度降为原来的约40%, 中西部区域水域景观分裂度指数和聚合度指数变化明显, 水域空间趋于离散和破碎化。水域景观阶段性特征明显, 2000—2010年, 水域面积减少近13%, 水域形状复杂度略有降低, 局部水域空间破碎化和连通性降低趋势有所发展; 2010—2020

年,水域面积加速萎缩,面积减少超26%,水域形状复杂度显著降低,廊道阻隔和斑块切割等作用加强,水域空间破碎化程度更加显著。

(3) 2000年以来,降水和气温等自然因素以及农业发展和城镇化等人为因素解释了江汉平原水域景观变化的45.8%,降水和气温影响微弱,耕地和人造地是本次分析中水域空间变化的主要驱动因素。连片耕地侵占是水域面积萎缩的主要原因,耕地面积率和连通性对水域面积率的作用更强,对水域空间破碎化的影响次之。人造地的作用更集中的体现在对水域空间破碎化的影响,与水域面积率呈负相关关系。

#### 参考文献:

- [1] 唱彤, 郦建强, 金菊良, 等. 面向水流系统功能的多维度水资源承载力评价指标体系[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 44-51. (CHANG T, LI J Q, JIN J L, et al. Multi-dimensional water resources carrying capacity evaluation index system for water flow system function[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 44-51. (in Chinese))
- [2] 傅伯杰, 徐延达, 吕一河. 景观格局与水土流失的尺度特征与耦合方法[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 673-681. (FU B J, XU Y D, LYU Y H. Scale characteristics and coupled research of landscape pattern and soil and water loss[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(7): 673-681. (in Chinese))
- [3] O'NEILL R V, KRUMMEL J R, GARDNER R H, et al. Indices of landscape pattern[J]. Landscape Ecology, 1988, 1(3): 153-162.
- [4] FORMAN R T T. Land mosaics: the ecology of landscapes and regions[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- [5] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419. (PENG J, ZHAO H J, LIU Y X, et al. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction[J]. Geographical Research, 2017, 36(3): 407-419. (in Chinese))
- [6] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 等. 区域生态安全格局: 概念与理论基础[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768. (MA K M, FU B J, LI X Y, et al. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768. (in Chinese))
- [7] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955—2010年小三江平原原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 879-887. (LIU J P, DONG C Y, SHENG L X, et al. Landscape pattern change of marsh and its response to human disturbance in the small Sanjiang Plain, 1955—2010[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(6): 879-887. (in Chinese))
- [8] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15. (YU K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation[J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15. (in Chinese))
- [9] SUN H, WEI J X, HAN Q Y. Assessing land-use change and landscape connectivity under multiple green infrastructure conservation scenarios[J]. Ecological Indicators, 2022, 142: 109236.
- [10] SANTANA-CORDERO A M, BÜRGI M, HERSPERGER A M, et al. A century of change in coastal sedimentary landscapes in the Canary Islands (Spain): change, processes, and driving forces[J]. Land Use Policy, 2017, 68: 107-116.
- [11] MA G Q, LI Q J, YANG S Y, et al. Analysis of landscape pattern evolution and driving forces based on land-use changes: a case study of Yilong Lake watershed on Yunnan-Guizhou Plateau[J]. Land, 2022, 11(8): 1276.
- [12] EITER S, POTTHOFF K. Landscape changes in Norwegian mountains: increased and decreased accessibility, and their driving forces[J]. Land Use Policy, 2016, 54: 235-245.
- [13] KARIMIAN H, ZOU W M, CHEN Y L, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factor analysis in Dongjiang River watershed[J]. Chemosphere, 2022, 307: 135835.
- [14] 董李勤, 章光新. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 177-183. (DONG L Q, ZHANG G X. The dynamic evolvement and hydrological driving factors of marsh in Nenjiang River basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(2): 177-183. (in Chinese))
- [15] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 172-180. (LI Z W, WANG Z Y, ZHANG C D, et al. A study on the mechanism of wetland degradation in Ruoergai swamp[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 172-180. (in Chinese))

- [16] 顾延生, 李颀家, 秦养民, 等. 历史时期以来人类活动与江汉湖群生态环境演变[J]. 地球科学, 2013, 38(S1): 133-144. (GU Y S, LI K J, QIN Y M, et al. Impact of human activity on the evolution of the ecological environment of Jianghan Lake group in the historical period, central China[J]. Earth Science, 2013, 38(S1): 133-144. (in Chinese))
- [17] 蔡述明, 杜耘. 江汉湖群湖泊资源特点及其开发利用保护[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2000, 34(4): 476-481. (CAI S M, DU Y. The characteristics of lake resources and it's development and protection on the Jianghan Lakes region [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2000, 34(4): 476-481. (in Chinese))
- [18] 贾敬禹. 近2 000年来江汉平原河湖水系演变[D]. 北京: 北京大学, 2009. (JIA J Y. Evolution of river and lake systems in Jianghan Plain in recent 2 000 years[D]. Beijing: Peking University, 2009. (in Chinese))
- [19] 魏显虎, 杜耘, 蔡述明, 等. 湖北省湖泊演变及治理对策[J]. 湖泊科学, 2007, 19(5): 530-536. (WEI X H, DU Y, CAI S M, et al. On the evolution of lakes in Hubei Province and countermeasures[J]. Journal of Lake Sciences, 2007, 19(5): 530-536. (in Chinese))
- [20] 冯尧舒, 冯存均, 陈江平. 人类活动对江汉湖群时空演变影响及关联规则发现[J]. 应用科学学报, 2018, 36(6): 958-968. (FENG W S, FENG C J, CHEN J P. Effect of human activities and association rules mining on spatiotemporal evolution in Jianghan Lake group[J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(6): 958-968. (in Chinese))
- [21] 王学雷, 吴宜进. 江汉平原湿地系统的退化与生态恢复重建[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(4): 467-471. (WANG X L, WU Y J. Degeneration and ecological rehabilitation of wetlands in Jianghan Plain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2004, 23(4): 467-471. (in Chinese))
- [22] 蔡银莺, 罗成. 江汉平原耕地资源生态安全状况及空间集聚格局[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2015(5): 110-120. (CAI Y Y, LUO C. Ecological security condition of cultivated land resources and spatial agglomeration pattern in Jianghan Plain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition), 2015(5): 110-120. (in Chinese))
- [23] 许慎慎. 江汉平原土地利用景观格局演变及生态安全评价[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012. (XU B S. Study on landscape pattern evolution of land use and ecological security assessment in Jianghan Plain[D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012. (in Chinese))
- [24] 彭守璋. 中国1 km分辨率逐月平均气温数据集(1901—2020)[DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019[2022-08-08]. <http://data.tpdc.ac.cn>. (PENG S Z. 1-km monthly mean temperature dataset for china (1901—2020) [DS/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019[2022-08-08]. <http://data.tpdc.ac.cn>. (in Chinese))
- [25] 彭守璋. 中国1 km分辨率逐月降水量数据集(1901—2020)[DS/OL]. 时空三极环境大数据平台, 2020[2022-08-08]. <http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/>. (PENG S Z. 1-km monthly precipitation dataset for China (1901—2020) [DS/OL]. A Big Earth Data Platform for Three Poles, 2020[2022-08-08]. <http://poles.tpdc.ac.cn/zh-hans/>. (in Chinese))
- [26] 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. (WU L N, YANG S T, LIU X Y, et al. Response analysis of land use change to the degree of human activities in Beiluo River basin since 1976[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(1): 54-63. (in Chinese))
- [27] 邓特, 黄勇, 顾菁, 等. 空间分析中空间自相关性的诊断[J]. 中国卫生统计, 2013, 30(3): 343-346. (DENG T, HUANG Y, GU J, et al. Diagnosis of spatial autocorrelation in spatial analysis[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2013, 30(3): 343-346. (in Chinese))
- [28] ANSELIN L. Local indicators of spatial association: LISA[J]. Geographical Analysis, 2010, 27(2): 93-115.
- [29] 刘吉平, 杜保佳, 盛连喜, 等. 三江平原沼泽湿地格局变化及影响因素分析[J]. 水科学进展. 2017, 28(1): 22-31. (LIU J P, DU B J, SHENG L X, et al. Dynamic patterns of change in marshes in the Sanjiang Plain and their influential factors [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 22-31. (in Chinese))
- [30] 潘方杰, 王宏志, 王璐瑶. 湖北省湖库洪水调蓄能力及其空间分异特征[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(8): 1891-1900. (PAN F J, WANG H Z, WANG L Y. Spatial differentiation of flood regulation service of lakes and reservoirs in Hubei Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(8): 1891-1900. (in Chinese))

## The spatial-temporal characteristics and driving forces analysis of water area landscape pattern changes on the Jiangnan Plain\*

CHANG Tong, LI Jianqiang, GUO Xuning, LI Yunling

(General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources of P. R. China, Beijing 100120, China)

**Abstract:** In order to explore the dynamic changes regarding water landscape patterns on the Jiangnan Plain and their respective driving factors from 2000 to 2020, research was carried out using transition matrix analysis, spatial autocorrelation analysis, landscape metrics analysis and redundancy analysis, applying both GIS and multivariate statistics techniques. Results show that the surface area of water on the Jiangnan Plain has decreased by 36% from 2000 to 2020, as a result of farmlands being reclaimed for urbanized purposes, and water-areas then being reclaimed for use as farmlands. Indices of Global Moran's  $I$  and Anselin Local Moran's  $I$  show a distinct change, and water-area edge density have dropped dramatically. Spatial aggregation and connectivity of water-area of some regions such as the Sihuan catchment have shown a significant decrease. 45.8% of the changes to the water landscape patterns are a result of precipitation, temperature, and farmlands and artificial surfaces. Of these, precipitation and temperature factors only show a negligible contribution to the overall changes, the contiguous cultivated land has proven to be one of the main causes of the reduction in water landscape areas, while artificial surfaces show a large and direct contribution to the fragmentation of water bodies. During the last two decades, the changes to the water landscape area on the Jiangnan Plain is evident, both shape complexity and connectivity have decreased along with a trend towards fragmentation, cultivated lands and artificial surfaces used for agricultural activities and urbanized purposes have severely affected water landscape patterns.

**Key words:** water area; spatial autocorrelation; landscape pattern changes; redundancy analysis; the Jiangnan Plain

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFC0407206).