

E方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.5  
第41卷 第5期

目次

上海大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析对比:基于在线数据运用3种受体模型 ..... 周敏(1997)

不同浓度臭氧对单颗粒气溶胶化学组成的影响 ..... 吴梦曦,成春雷,黄渤,李梅,陈多宏(2006)

二次有机气溶胶壳对氯化钠核吸湿性的影响:基于单颗粒微观尺度 ..... 张淑佳,徐亮,郭新梅,黄道,李卫军(2017)

城区与县区不同空气质量下碳组分污染特征对比分析 ..... 李欣悦,张凯山,邓林俐,向铎鹏,武文琪,殷子渊(2026)

临沂市 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中元素分布特征及来源解析 ..... 陆平,赵雪艳,殷宝辉,张楠,王歆华,余浩,杨文,王晓丽(2036)

西安市秋冬季市区与山区微生物气溶胶组成特征及来源 ..... 谢雯文,路瑞,慕云飞,戚玉珍,白文艳,李彦鹏(2044)

北京市典型餐饮企业大气污染物排放特征 ..... 何万清,王天意,邵霞,聂磊,石爱军(2050)

基于随机森林模型的中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响因素分析 ..... 夏晓圣,陈菁菁,王佳佳,程先富(2057)

大气污染联合治理分区视角下的中国 PM<sub>2.5</sub> 关联关系时空变异特征分析 ..... 杨文涛,黄慧坤,魏东升,赵斌,彭焕华(2066)

基于地-空观测数据的粤港澳大湾区大气污染调查及时空演变特征 ..... 王耀庭,梁加成,郑祚芳,李青春,李威,窦有俊(2075)

龙子祠泉域岩溶地下水水化学特征及成因 ..... 唐春雷,郑秀清,梁永平(2087)

三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析 ..... 唐小娅,童思陈,黄国鲜,许光祥,李丹(2096)

三峡水库汛后蓄水期典型支流溶解氧与叶绿素 a 垂向分布特征 ..... 杨凡,纪道斌,王丽婧,李虹,李莹杰(2107)

汉丰湖正式运行年水体营养盐分布特征 ..... 付适,倪九派,何丙辉,李天阳,唐毅,钱田,向可翠(2116)

白洋淀水体富营养化和沉积物污染时空变化特征 ..... 刘鑫,史斌,孟晶,周云桥,可欣,王铁宇(2127)

新安江水库悬浮颗粒物时空分布、沉降通量及其营养盐效应 ..... 史鹏程,朱广伟,杨文斌,许海,朱梦圆,刘明亮,虞左明,吴志旭,郑文婷,王裕成,笄文怡,胡林娜(2137)

不同水文情景下高邮湖、南四湖和东平湖有色可溶性有机物的生物可利用性特征 ..... 张柳青,石玉,李元鹏,郭燕妮,周蕾,周永强,张运林,杨艳(2149)

水源水藻类功能群落演替特征及水质评价 ..... 李衍庆,黄廷林,张海涵,温成成,杨尚业,林子深,高欣(2158)

人工强制混合对金盆水库水体藻类群落结构时空演替的影响 ..... 王晨旭,黄廷林,李楠,齐允之,徐金兰,司凡,张晗,路林超(2166)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体好氧反硝化菌群落空间分布特征及驱动因素 ..... 周石磊,孙悦,岳智丞,张航,王周强,刘世崇,彭瑞哲,苑世超,李再兴,崔建升(2177)

分层型水库水体好氧不产氧光合细菌时空演替特征 ..... 张海涵,王燕,黄廷林,王晨旭,路林超,司凡,李楠,刘凯文,闫苗苗,苗雨甜(2188)

大型通江湖泊有色可溶性有机物对不同水文情景的响应 ..... 郭燕妮,李元鹏,石玉,张柳青,周蕾,周永强,张运林,韩龙飞(2198)

秦岭北麓河流夏季有色溶解有机物分布特征及影响因素 ..... 林子深,黄廷林,杨尚业,温成成,李衍庆,周石磊,宋选社(2210)

长江下游支流水体中多环芳烃的分布及生态风险评估 ..... 贾天琪,雷荣荣,武小琳,倪涛涛,孙树睿,郭伟,刘文彬(2221)

太湖水体中 NSAIDs 的时空分布规律和生态风险评估 ..... 廉杰,李祎飞,王晓喧,叶彬,邹华,史红星(2229)

8种典型 PhACs 在水中的赋存、生态风险及其对大型溞的影响 ..... 徐鑫磊,刘建超,陆光华(2239)

我国南方桉树人工林区水库沉积物污染物的分布特征及迁移规律 ..... 朱雅,李一平,罗凡,李荣辉,黄列,程一鑫,蒋裕丰(2247)

基于连续监测的城市内河返黑返臭机制初探:以南宁市二坑溪为例 ..... 李永新,王威,何妹,申泰铭(2257)

城郊流域源汇景观格局与水体抗生菌的关系 ..... 李敏,唐剑锋,陈利顶,赵方凯,冯青郁,杨磊(2264)

城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性 ..... 聂云汉,陈浩,李磊,朱奕,赵昕,贾其隆,徐慧婷,叶建锋(2272)

方解石/氯磷灰石混合物添加对水体内源磷迁移转化的调控效应和机制 ..... 柏晓云,林建伟,詹艳慧,常明玥,吴俊麟,辛慧敏,黄良君(2281)

不同环境条件下水铁矿和针铁矿纳米颗粒稳定性 ..... 王智巧,马杰,陈雅丽,翁莉萍,顾亚陶,李永涛(2292)

向日葵秸秆生物炭强化 Fe(III)/S<sub>2</sub>O<sub>8</sub><sup>2-</sup> 体系降解苯甲酸 ..... 孙鹏,张凯凯,张玉,张延荣(2301)

非活化单过硫酸盐降解柳氯磺胺吡啶:动力学及机制 ..... 丁曦,张学维,周润生,宋哲,严佳颖,周磊,修光利(2310)

贵州某规模化养猪场废水中抗生素的污染特征及去除效果 ..... 杨钊,李江,向福亮,李彦澄,马凯,谢锋(2320)

新型填料 A/O 生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮 ..... 赵远哲,杨永哲,王海燕,储昭升,常洋,董伟羊,闫国凯,王欢,李丛宇(2329)

贫营养好氧反硝化菌株的脱氮特性及氮/碳平衡分析 ..... 文刚,王彤,黄廷林,万琪琪,曹瑞华,寇莉青,杨尚业(2339)

连续流 SNAD 工艺处理猪场沼液启动过程中微生物种群演变及脱氮性能 ..... 秦嘉伟,信欣,鲁航,张萍萍,王露蓉,邹长武,郭俊元(2349)

不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥活性及微生物群落结构差异 ..... 姜滢,郭萌蕾,谢军祥,常尧枫,谢嘉玮,陈重军,沈耀良(2358)

反硝化除磷耦合部分亚硝化-厌氧氨氧化一体式工艺的启动 ..... 陈亚,印雯,张星星,张钰,宋吟玲,吴鹏,徐乐中(2367)

土壤环境承载力评价体系构建与应用 ..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿(2373)

磁性生物炭的合成及对土壤重金属污染的钝化效果 ..... 王俊楠,程珊珊,展文豪,任强,马晓宇,王洋洋(2381)

还原增溶强化 EGTA 淋洗修复重金属污染土壤 ..... 张金永,朱玉婷,王明新,韩莹,葛嘉琦(2390)

不同价态铬和土壤理化性质对大麦根系毒性阈值的影响 ..... 付平南,贡晓飞,罗丽韵,王琪,李花粉(2398)

生物炭施用对紫色土旱坡地土壤氮流失形态及通量的影响 ..... 王舒,王子芳,龙翼,严冬春,慈恩,徐国鑫,李娇,高明(2406)

长期撂荒恢复土壤团聚体组成与有机碳分布关系 ..... 王兴,钟泽坤,张欣怡,吴少君,卢绪巧,杨改河,任成杰,韩新辉(2416)

施用生物炭对壤土土壤微生物代谢养分限制和碳利用效率的影响 ..... 王强,耿增超,许晨阳,郭靖宇,李倩倩,刘莉丽,赵汉红,杜旭光(2425)

间种高粱及施用大颗粒尿素对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 张珂彬,刘新亮,康曼,王毅,沈健林,李勇(2434)

缙云山森林植被类型对土壤 N<sub>2</sub>O 相关功能微生物的影响 ..... 王盛燕,王富华,罗东海,昌盛,王子芳,高明(2445)

咸水滴灌对棉田土壤 N<sub>2</sub>O 排放和反硝化细菌群落结构的影响 ..... 郭慧楠,马丽娟,黄志杰,李美琪,侯振安,阎伟(2455)

有机质提升对酸性红壤氮循环功能基因及功能微生物的影响 ..... 储成,吴赵越,黄欠如,韩成,钟文辉(2468)

模拟酸雨对毛竹阔叶林过渡带土壤真菌结构及其多样性的影响 ..... 王楠,潘小承,王传宽,白尚斌(2476)

海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异 ..... 李明月,杨雨虹,米铁柱,贺惠,甄毓(2485)

2003~2013年中国湿地变化的空间格局与关联性 ..... 周婷,马姣姣,徐颂军(2496)

《环境科学》征订启事(2086) 《环境科学》征稿简则(2187) 信息(2209,2263,2309)

## 2003 ~ 2013 年中国湿地变化的空间格局与关联性

周婷, 马姣娇, 徐颂军\*

(华南师范大学地理科学学院, 广州 510000)

**摘要:** 以全国两次湿地资源调查数据为基础, 借助 ArcGIS 可视化平台, 采用标准差椭圆和空间自相关等方法, 分析中国湿地变化的空间格局, 揭示湿地变化的空间关联性。结果表明: ①中国湿地存在明显的动态变化和分区特征, 总湿地椭圆中心向正西方向移动, 自然湿地与人工湿地的空间分异程度在增加; ②人工湿地变化不存在显著的空间自相关性, 自然湿地变化则存在显著的空间正相关性, 表现出空间集聚状态, 并产生了 1 个热点集聚区分布于青海、西藏和四川, 1 个独立热点区分布在内蒙古和 1 个冷点区分布在河南。Moran's *I* 统计表明自然湿地变化表现出空间变化上的连续性, 人工湿地变化表现为空间随机性; ③自然湿地保护效果表现出湿地保护高效区、低效区和不稳定区三大类分级特征, 可细分为 5 小类。Moran 统计能有效识别自然湿地变化的空间关联性, 划定湿地保护效果, 从而有利于明确湿地保护的地区差距, 为系统制定湿地保护与管理决策提供依据, 也为湿地保护效果评定研究提供新方法应用。

**关键词:** 湿地变化; 空间格局; 空间自相关; 标准差椭圆; 局部空间自相关(LISA)

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-2496-09 DOI: 10.13227/j.hjx.202001005

## Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013

ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun\*

(School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Wetlands play an important role in maintaining ecosystem functions. Wetlands in China have suffered intensive human disturbance, especially before 2000, resulting in great losses and degradation. Therefore, two national wetland resource surveys were carried out by the Chinese government during 1998-2003 and 2008-2013 to determine the status of wetlands, understand their dynamics, and provide substantial data that can aid scientific wetland conservation. Based on the survey data, the spatial pattern and spatial autocorrelation were explored using the standard deviation ellipse as well as global and local spatial autocorrelation statistics. GIS mapping was employed to display the results via the visualization of the spatial patterns and relationships. Results indicate that: ① Changes in the wetlands of China are significant and exhibit obvious regional differences. The center of the ellipse of the total wetlands has moved to the west, and the degree of spatial differentiation between natural wetlands and artificial wetlands is increasing. There is no significant spatial autocorrelation for changes in artificial wetlands. ② The changes in natural wetlands are significantly spatially autocorrelated and clustered, which are identified by global Moran's *I* and local Moran's *I*. The hotspots of natural wetland change are concentrated primarily in Qinghai, Tibet, and Sichuan. The individual hotspot is in Inner Mongolia and the cold spot is in Henan. The difference in spatial autocorrelation between natural and artificial wetland changes indicates that natural wetland changes have shown spatial continuity, while artificial wetland changes have shown strong spatial randomness. ③ Some useful spatial associations are used to delineate wetland conservation effects. Then, three major or five minor effective protection management regions are identified. Wetland conservation efforts should be continuously strengthened and improved, especially in the middle-lower Yangtze River region of central China. The use of Moran statistics helps to reveal spatial autocorrelation and identify the conservation effects in wetland changes, which can provide a basis for decision-making in regional wetland conservation and management systems.

**Key words:** wetland changes; spatial distribution patterns; spatial autocorrelations; standard deviation ellipse; local indicators of spatial association(LISA)

湿地与森林、海洋并称为全球三大生态系统。湿地在维持全球生态系统功能方面具有重要作用, 被认为是最具有价值的自然生态系统类型, 不仅为鱼和鸟等野生动物提供食物、水和庇护所<sup>[1]</sup>, 而且还提供了重要的生态系统服务, 如涵养水源、净化水质、蓄洪抗旱和调节气候等。近年来, 湿地时空分布及变化特征的研究备受关注。从研究尺度看, 可分为国家尺度与局域尺度。国家尺度主要为在全球变化的大背景下, 探讨湿地现状、空间分布、存在问题与威胁、变化特征、驱动力以及保护对策等等<sup>[2-8]</sup>。另一方面, 借助 3S 技术在数据采集、处理与分析、集成

和制图等方面的优势, 有学者应用 3S 技术展开了湿地遥感制图、湿地动态监测、模拟等系列研究, 建立了中国湿地数据库和湿地空间分布图等, 对促进中国湿地资源的合理保护与科学管理具有重要作用<sup>[9-11]</sup>。局域尺度可分为单个省域或热点变化的湿地, 尤其是具有代表性的区域典型湿地, 如三江平原

收稿日期: 2020-01-02; 修订日期: 2020-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271060, 41877411); 华南师范大学拔尖研究生留学基金项目

作者简介: 周婷(1989~), 女, 博士研究生, 主要方向湿地景观生态和空间分析, E-mail: zhouting926@163.com

\* 通信作者, E-mail: xusj@scnu.edu.cn

湿地<sup>[12]</sup>、青藏高原湿地<sup>[13]</sup>、长江中下游河湖湿地<sup>[14]</sup>和重要河口海岸湿地<sup>[15]</sup>等。从研究方法看,湿地变化主要通过湿地面积变化或时空分布差异来体现,面积变化通过动态度、景观指数、数理统计方法等加以量化比较,时空分布特征差异主要应用 3S 技术建立湿地数据库,制作湿地地图等进行分析。

湿地时空格局与变化特征分析对科学有效制定湿地管控策略,实现可持续发展目标具有重要意义。当前有关湿地空间格局及其演变研究的展开多假设地理单元相互独立,较少从空间关联的视角研究湿地变化特征,而且已有湿地变化空间关联性的研究多关注局域尺度<sup>[12,16]</sup>,较少关注国家尺度。地理学第一定律指出,任何事物之间都存在关联性,而且邻近事物之间的关联性更强<sup>[17]</sup>。系统论观点也表明,湿地是一个半开放半封闭的系统,一方面,湿地是一个较独立的生态系统,有其自身的形成发展和演化规律;另一方面,湿地又不完全独立,在许多方面依赖于相邻的地面景观,与它们发生物质和能量交换,也影响邻近系统的活动<sup>[18]</sup>。王劲峰等<sup>[19]</sup>指出,时空分析的目的是从时空数据中发现规律和异常、分析关联和探索机理,并进行预警和预测。由此,湿地变化空间关联性是时空分析的特征之一,其研究具有重要意义,中国当前湿地变化是否存在空间关联性是一个值得探讨的科学问题。

因此,基于 ArcGIS 可视化平台,以中国大陆 31 个省市自治区为研究对象,从地理学时空视角分析全国两次湿地资源调查期间湿地变化的时空格局,借助空间统计分析探究湿地变化的空间关联性特征。通过揭示湿地变化格局演变方向和湿地变化格局的聚集和扩散等,从宏观上加深对湿地变化时空格局与空间关联特征的认识,以期为系统制定湿地保护与管理决策提供科学而有效的理论与实践参考,在一定程度上弥补湿地研究的不足。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究方法

空间分析提供了准确认识、评价和综合理解空间位置和空间相互作用重要性的方法<sup>[20]</sup>。基于 ArcGIS 可视化平台分析大陆湿地分布格局,揭示湿地变化的相互关系和空间模式。

#### 1.1.1 标准差椭圆法

标准差椭圆法是从全局、空间的角度定量分析地理要素空间分布整体特征的常用方法,常用基本参数包括椭圆中心、长轴、短轴和方位角等<sup>[21]</sup>。椭圆空间分布范围表示地理要素空间分布的主体区域,中心表示其分布的相对位置,方位角反映其分布的

主趋势方向,长轴则表征其主趋势方向上的离散程度<sup>[22]</sup>。比较大小、方位等基本参数不同的椭圆,可以提供不同空间分布之间的差异信息,计算空间分异系数又可以定量刻画不同分布之间空间分异的程度<sup>[22]</sup>。具体计算公式参见文献<sup>[21,22]</sup>。

#### 1.1.2 空间自相关

空间自相关分析同时考虑到研究对象的位置和属性信息,是一种特别而且有效的空间统计分析方法。常用全局空间自相关和局部空间自相关来探究地理要素的空间关联性<sup>[23,24]</sup>。

##### (1) 全局空间自相关

全局空间自相关是分析和描述某一研究区域内地理要素的整体空间特征,是地理数据基本性质度量的常用指标,可直观地表示地理变量在空间上相互依赖的程度。常用的全局空间自相关的度量指标是全局莫兰指数 (Moran's  $I$ ),取值范围为 $[-1,1]$ 。其值为正数则表明存在空间正相关性,即研究对象与邻近对象之间具有相同的变化趋势;负数则表明存在空间负相关性,即研究对象与邻近对象之间具有相反的变化趋势;等于零则表明无空间相关性。全局 Moran's  $I$  指数计算公式<sup>[25]</sup>如下:

$$I = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} \right) \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

式中, $I$ 为全局空间自相关系数; $x_i$ 和 $x_j$ 是研究区域内对象 $i$ 和 $j$ 所在位置的同一地理属性的观测值; $N$ 为样本数量, $w_{ij}$ 为空间权重矩阵。

##### (2) 局部空间自相关

局部空间自相关 (local indicators of spatial association, LISA) 是从局域尺度探究空间关联特征,识别地理要素的空间聚类或空间异常。其计算表达式<sup>[26]</sup>为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma^2} \sum_{j=1}^N w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

式中, $I_i$ 为研究区域内 $i$ 位置上的局部空间自相关系数; $x_i$ 和 $x_j$ 分别为 $i$ 和 $j$ 位置上同一地理属性的观测值; $\bar{x}$ 为 $x$ 的平均值; $\sigma^2$ 为 $x$ 的方差; $w_{ij}$ 为空间权重矩阵, $I_i$ 取值范围与正负值定义与全局 Moran's  $I$  指数相同。

局部空间自相关存在 4 种局部空间关联模式,依次为高-高、低-高、低-低和高-低。其中,高-高型或低-低型表示相似的高值或低值之间的空间集聚,表现为空间正相关;高-低型或低-高型则表示高值或低值的邻域为与之相反的低值或高值,表现为空间异常,显示为空间负相关。



湿地和人工湿地,二者面积之和定为总湿地面积。总湿地、自然湿地和人工湿地于 2003 ~ 2013 年间的湿地变化率表现出明显差异,尤其是人工湿地。对于人工湿地,其变化率绝对值远大于自然湿地、总湿地,变化强度较大,而且极差最大,其中最大值为上海,达 6 198.6%,最小值为甘肃,达 -6.23%,16 个呈正增长的省市区中 9 个超过 100%,内蒙古作为临界点,为 0.89%;15 个呈负增长中 7 个超过 50%。对于自然湿地,其湿地变化率比人工湿地离散程度小,最大值为北京,达 276.59%,最小值为山西,为 -81.86%,而且自然湿地呈负增长的省市区数量远大于呈正增长数。10 个呈正增长的省市区中青海、贵州、重庆和新疆等地的增加超 50%,内蒙古作为临界点,为 8.54%;21 个呈负增长的省市区中,上海减少量

最小为 -0.69%。对于总湿地,其总体分布趋势与自然湿地相似,由此,可知自然湿地面积变化在总湿地面积变化中占主导作用,部分地区人工湿地的增长弥补了自然湿地的减少,最终全国有 17 个省市区总湿地呈正增长,主要分布在西部和东部地区,14 个省市区总湿地呈负增长,主要分布在东北地区和中部分地区,而且三类湿地增长变化的最大值或最小值所在地区均存在差异,尤其是自然湿地与人工湿地。

## 2.2 湿地变化的空间分布格局

首先,基于 GeoDa 软件,分别制作 31 个省市区自然湿地与人工湿地变化率四分位数图。图 2 表明 2003 ~ 2013 年间自然湿地变化存在空间聚集特征,其中自然湿地变化率较高的地区主要分布在西部;人工湿地变化率分布较为分散,没有明显集聚特征。

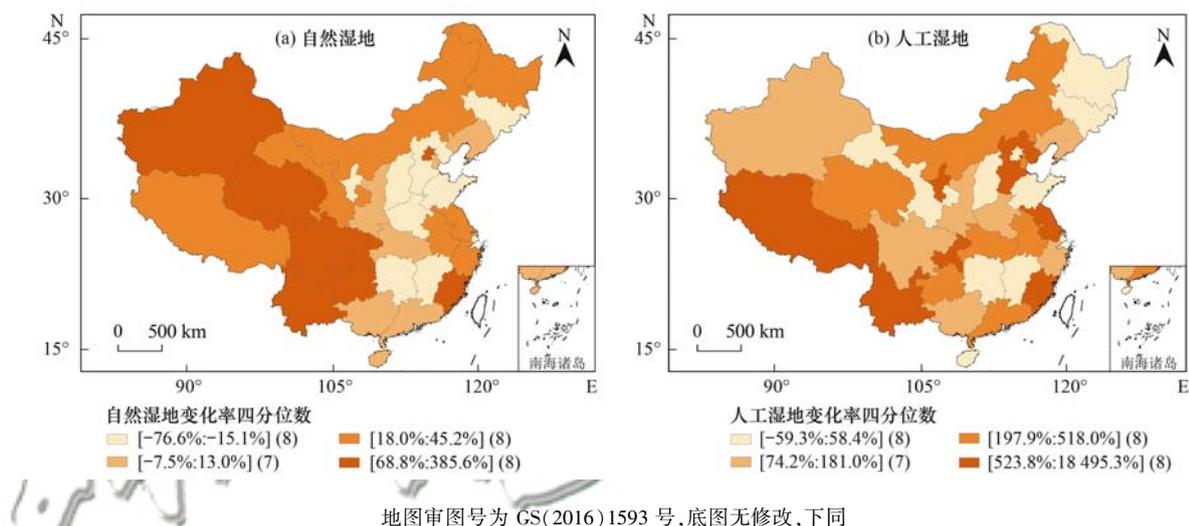


图 2 2003 年和 2013 年中国湿地变化率四分位数

Fig. 2 Quantile maps of the change in natural and artificial wetlands in China in 2003 and 2013

其次,基于 ArcGIS 10.5,利用标准差椭圆法定量分析 2003 和 2013 年不同类型湿地时空分布的动态变化,参数结果如表 1,地图可视化结果如图 3。结果表明 2003 和 2013 年不同类型湿地均呈东北-西南分布格局,但相应分布的主趋势方向存在明显差异,湿地中心发生转移,湿地空间分布动态变化明显。具体变化如下:① 2003 ~ 2013 年总湿地空间分布标准差椭圆中心表现为向正西方向转移约  $2^\circ$ ,椭圆总体分布范围在扩大,长轴与短轴均增加,短轴增加更明显,表明西部湿地增加显著,南-北方向湿地扩张强度大于东-西方向;② 2003 ~ 2013 年自然湿地空间分布标准差椭圆中心表现为向西偏北转移约  $0.3^\circ$ ,椭圆总体分布范围在扩大,长轴增加,短轴减小,表明自然湿地在东-西方向扩张强度大于南-北方向收缩强度,而且主趋势方向上分布的离散程度在增加;③ 2003 ~ 2013 年人工湿地空间分布标准差

椭圆中心表现为向东偏南转移约  $0.7^\circ$ ,椭圆总体分布范围在缩小,长轴与短轴均减小,表明人工湿地在东-西方向收缩强度大于南-北方向,而且主趋势方向分布的离散程度在减小,人工湿地存在向东部集中的趋势。另一方面,分别计算 2003 年和 2013 年人工湿地空间分布与自然湿地之间的空间分异系数,结果为 0.19 和 0.34,表明 2003 ~ 2013 年间自然湿地与人工湿地的空间分异程度在增加。结合图 3 与表 1,自然湿地椭圆分布范围明显大于人工湿地,且二者分布的主体区域存在明显差异,自然湿地椭圆长轴大于人工湿地,表明其空间分布离散程度更大。由此可得,2003 ~ 2013 年间总湿地以自然湿地分布格局为主导,自然湿地空间分布范围与离散程度均在增加,而人工湿地则相反;此外,人工湿地与自然湿地空间分异程度在增加,二者在东西或南北方向呈现出不同程度的扩张或收缩。

表 1 2003 年和 2013 年各类湿地变化空间分布格局的标准差椭圆参数

Table 1 Standard deviation ellipse parameters of wetlands in China in 2003 and 2013

类型	中心坐标	长轴/km	短轴/km	椭圆面积/km <sup>2</sup>	方位角 $\theta/(^{\circ})$
2003 年总湿地	109.23°E, 36.89°N	1 670.96	1 056.35	5 544 921.93	70.86
2013 年总湿地	107.21°E, 36.85°N	1 671.93	1 070.69	5 623 413.59	78.59
2003 年自然湿地	109.00°E, 37.02°N	1 692.04	1 038.63	5 520 646.04	70.76
2013 年自然湿地	106.25°E, 37.34°N	1 719.10	1 030.67	5 565 932.13	76.14
2003 年人工湿地	111.44°E, 33.98°N	1 227.64	1 063.76	4 102 421.97	60.58
2013 年人工湿地	113.95°E, 33.30°N	992.98	1 072.49	3 345 521.71	34.87

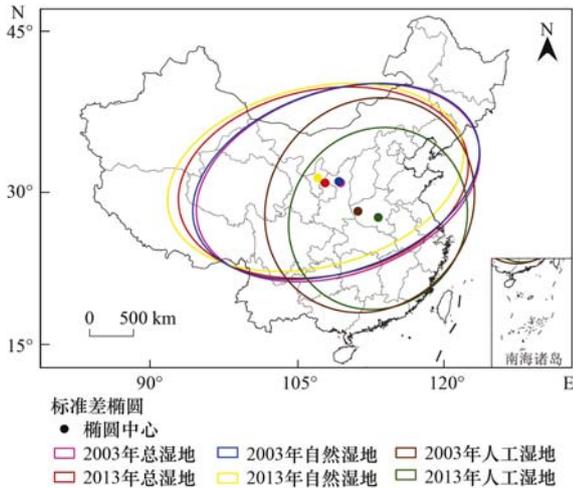


图 3 2003 年和 2013 年中国湿地分布格局的离散趋势

Fig. 3 Diffusion tendency of China wetland distribution in 2003 and 2013

### 2.3 湿地变化的空间自相关性检验

基于 GeoDa 软件, 31 个省市自然湿地和人工湿地变化率 Moran's  $I$  值及其显著性计算结果表明, 人工湿地变化的全局 Moran's  $I$  指数值为 0.057,  $Z$  检验值为 0.767,  $P = 0.216 (P > 0.05)$ , 表明人工湿地变化不存在显著的全局空间自相关性; 自然湿地变化的全局 Moran's  $I$  指数值为 0.180,  $Z$  检验值为 1.798,  $P = 0.046 (P < 0.05)$ , 表明自然湿地变化存在显著的空间正相关性. Anselin 等<sup>[32]</sup>指出空间自相关格局形成过程中也会产生空间异质性, 因此在无空间关联的基础上, LISA 识别出的空间异质性可能是空间过程的自然特征, 而不是局部区域非稳定性的表现. 因此, 在无全局空间关联的基础上, 人工湿地空间异质性的形成可能是多种因素作用的结果, 故本研究主要探讨自然湿地变化的空间关联性特征.

#### 2.3.1 全局空间自相关性

自然湿地变化率全局 Moran's  $I$  统计结果表明, 地区间自然湿地变化具有显著的空间集聚特征, 即自然湿地增加或减少的地区, 其邻域地区也呈相应增加或减少. Moran's  $I$  检验结果证实了图 2(a) 所暗示的自然湿地变化集聚分布格局, 同时也表明自然

湿地变化存在明显的空间依赖性.

#### 2.3.2 局部空间自相关性

全局空间自相关统计揭示总体空间关联特征, 经常隐藏一些有趣的局部格局, 而这些有趣的局部特征一般以小的集群或异常值存在<sup>[33]</sup>. 因此, 基于 GeoDa 采用 LISA 检验自然湿地变化的局部空间自相关性, 并借用 Moran 散点图、LISA 聚类图和 LISA 显著性图对检验结果进行空间可视化.

图 4(a) 自然湿地变化的动态 Moran 散点图表明不同邻域之间存在不同的空间关联模式, 我国自然湿地变化存在显著的空间依赖性和空间异质性. 其中, 第一和第三象限分别有 10 个地区形成高-高聚

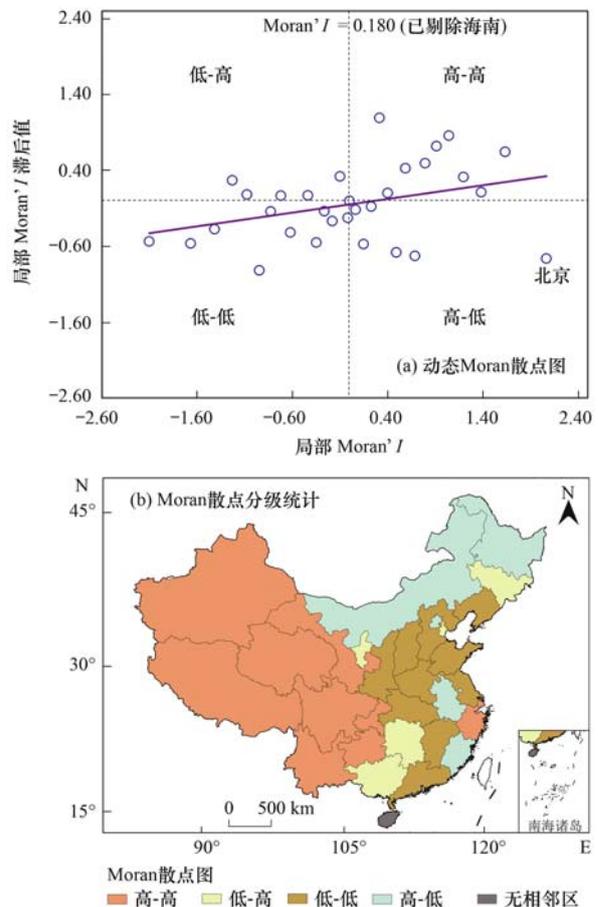


图 4 自然湿地变化的 Moran 散点图

Fig. 4 Moran scatterplot of natural wetland change

类区和低-低聚类区,表明对应的区域之间存在相似的自然湿地变化趋势,表现为空间正相关性;第二和四象限分别有 5 个地区形成低-高异常区和高-低异常区,表明对应区域之间存在相反的自然湿地变化趋势,表现为空间负相关性。另外,第四象限中“北京”偏离主趋势方向,主要是因为北京自然湿地变化率明显大于其邻域,从图 2(a) 中可以得到验证,但其又没有达到统计显著性水平。

为更加直观地显示 4 种空间关联模式具体的分布,采用 Moran 散点分级统计图进一步可视化我国自然湿地变化格局,如图 4(b)。高-高聚类区分布在西南、西北地区,低-低聚类区则主要分布在中部和东部地区;另外 10 个低-高和高-低异常区则分布在东北或者东南沿海地区,以及高-高与低-低区之间的过渡区,这些区域自然湿地变化可能演进为高值区或低值区。

为了更加详细区分地区自然湿地变化情况,整合 LISA 显著性图与聚类图共同判别。图 5 和图 6 表明,青海、西藏和四川自然湿地变化形成显著的高-高聚类区,或称为“热点”,同时也表明该聚类区对我国自然湿地变化的空间关联性具有显著地强烈影响。此外,自然湿地变化具有显著性特征的河南处于低-低区,结合图 2(a) 可知河南自然湿地显著地在减少;内蒙古处于高-低异常区,表现为显著地高增长。Zhang 等<sup>[28]</sup>在土壤 Pb 污染热点识别研究中指出,污染热点以高值集聚或以单个高值方式存在,并将土壤污染高-高型视为区域“热点”,低-低型视为“冷点”,高-低型空间异常点视为独立的“个别热点”。因此,结合图 4(b) 可知自然湿地变化格局中青海、西藏和四川形成的聚类区可视为区域“热点”,河南可视为“冷点”,内蒙古可视为独立的“个别热点”。

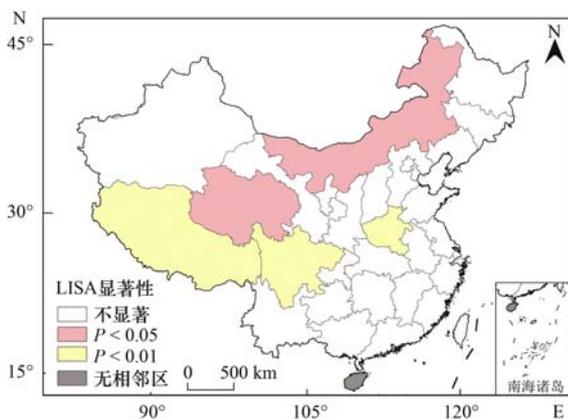


图 5 自然湿地变化率的 LISA 显著性

Fig. 5 LISA significance map of natural wetland change rate

## 2.4 自然湿地保护效果分级

Moran's  $I$  统计分析从全局和局域尺度揭示了

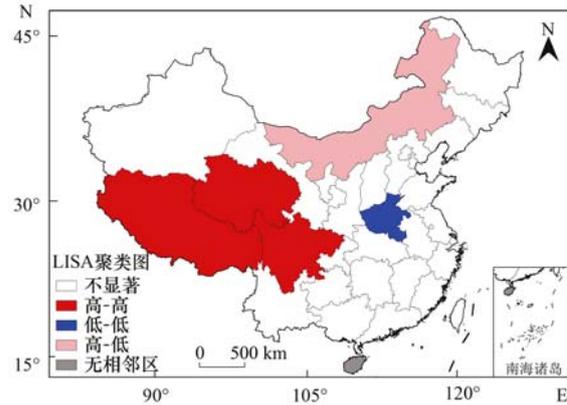


图 6 自然湿地变化率的 LISA 聚类

Fig. 6 LISA clustering map of natural wetland change rate

我国自然湿地变化的空间关联性特征。基于此,本研究利用各地区自然湿地变化的 4 种空间关联模式及其显著性判别地区自然湿地保护效果,并加以分级。

首先,基于图 4(b) 将自然湿地保护效果分为三级,其中自然湿地变化高-高区定义为自然湿地保护高效区,低-低区定义为自然湿地保护低效区,而低-高区或高-低区表明自然湿地变化存在不稳定性,定义为保护效果不稳定区。其次,结合图 5,将自然湿地保护效果继续细分为自然湿地保护最高效区、保护高效区、保护最低效区、保护低效区和保护效果不稳定区。内蒙古自然湿地变化作为独立“个别热点”,既位于高-低区,为显著性高值,又与高-高区相邻,因此,将其纳入自然湿地保护高效区。最后,表 2 为中国各地区自然湿地保护效果分级结果,其中:自然湿地保护效果最好的是青海、西藏和四川所在区域,其次为西南和西北地区。值得注意的是上海,其自然湿地变化率比其邻域地区高,究其原因是上海属于典型河口湿地城市,位于亚太地区候鸟迁徙线中部,特殊生态区位需求与人地关系之间的矛盾,使得上海在丰富的湿地本底资源基础上,采取了多样化湿地保护形式,展开了大量湿地科学研究与监测工作,建设了多处国际、国家、市际重要湿地等,湿地得到一定程度地有效保护。另外,自然湿地保护低效区主要分布在中部和东部地区,其中河南的湿地保护效果最差。由上文可知河南自然湿地变化率为  $-38.77\%$ ,呈负增长,位于低-低区,被视为“冷点”,该结果对应了河南省湿地资源调查大幅减少的结果。王春平等指出河南湿地减少是河南水利工程建设 and 气候干旱所致,其次为不恰当的土地利用方式<sup>[34]</sup>。此外,湿地保护效果不稳定地区为 10 个,分布相对分散,主要分布在东北、东部和中部地区。

表 2 自然湿地保护程度效果分级

Table 2 Effective conservation zones of natural wetlands

保护一类级别	保护二类级别	地区
保护高效区	保护最高效区 保护高效区	青海、西藏和四川 重庆、甘肃、贵州、上海、新疆、云南和内蒙古
保护低效区	保护最低效区 保护低效区	河南 广东、河北、湖北、江苏、江西、辽宁、山东、山西和陕西
保护效果不稳定区	保护效果不稳定区	安徽、北京、福建、广西、黑龙江、湖南、吉林、宁夏、天津和浙江

1) 未纳入中国台湾、中国香港和澳门特别行政区的相关数据

### 3 讨论

局部 Moran's  $I$  统计识别出 2003 ~ 2013 年自然湿地增加的高值“热点”聚类区分布在青海、西藏和四川区域,即我国青藏高原湿地范围内,该结果与刘志伟等<sup>[13]</sup>和邢宇等<sup>[35]</sup>指出的 2000 年以后青藏高原湿地萎缩态势减缓,面积显著增加的结果相一致. 青藏高原拥有独特高原湿地,在全球气候变化和防止全球水危机方面具有关键作用<sup>[13]</sup>,其自然湿地显著性增加表明该区域湿地保护工作产生了一定的效果. 但是自然湿地变化的“冷点”在河南,该结果与牛振国等<sup>[4]</sup>得出的我国东北区域湿地呈现大面积持续减少趋势,而西部增加的结果异同. 这主要是因为两种统计的计算原理不相同,局部 Moran's  $I$  统计是比较目标位置与其邻域位置之间的关系而界定的空间关联模式. 河南虽然为自然湿地变化的“冷点”,但其表示的是河南自然湿地变化率小于平均值,其邻域自然湿地变化率也小于平均值,从而形成一个以河南为中心的自然湿地变化率为低值的集聚区. 换言之,以河南为中心的中部地区自然湿地均呈负增长. 另外,虽然图 1(b)表明东北三省自然湿地呈负增长,但是图 6 表明其并未形成显著性的空间集聚. 因此, Moran's  $I$  统计是检验相邻地理位置之间的空间相互作用与关联性,并不是将地理单元视为独立的个体,从而有效识别出自然湿地变化的空间依赖性与空间异质性.

另一方面,应用 LISA 及其显著性划定自然湿地保护效果(表 2),表明我国自然湿地保护高效区主要分布在西部地区,而低效区主要分布在东部和中部地区,不稳定区分布则较为分散,各地区均有涉及. 结合表 2 与图 1(b)可知,东部、中部地区人工湿地增加弥补了自然湿地的减少,但是相关研究表明东部沿海地区湿地仍然面临着湿地被围垦、被占用、被污染以及海平线上升等威胁. 除此之外,气候变化、人口压力、湿地价值认知缺失、湿地法律法规缺乏等也导致湿地减少<sup>[3~5,7,8,15]</sup>,中部地区众多人口和城镇化发展则导致流域生态问题突出,河流、湖泊

湿地严重退化和萎缩,尤其是湿地集中的长江中下游区域<sup>[36]</sup>. 由此可知,东部和中部地区仍然需要加大湿地保护力度,使其向湿地保护高效区转化.

综上所述,启示我国湿地保护与管理应该同时加强跨地区的协同合作,不仅仅局限于跨部门、跨国跨境合作<sup>[5,37,38]</sup>. 国内外学者还指出小尺度上单个保护地的空间邻近效应也是区域空间相关性的表现<sup>[39]</sup>. 不同尺度上区域空间关联性的存在都可能对该区域产生一定影响,资源保护与管理没有绝对的行政边界,管理者应该因地制宜,综合考虑区域内外资源的保护,制定科学、合理的利用与管理政策. 此外,基于 LISA 分析及其显著性划分自然湿地保护效果,有助于明确地区差距,促进跨地区湿地保护合作意向. 该方法为现有关中国湿地保护效果研究提供新方法应用. 然而,虽然在已有湿地变化研究基础上,该方法应用较为科学有效,但如何将湿地空间关联性特征有效应用于湿地保护与管理策略,仍然需要进一步探讨. 此外,本研究仅采用两个时间序列的省域尺度研究数据还存在一定局限性,多时间序列视角,小尺度深入揭示湿地变化特征与趋势是下一步研究方向.

### 4 结论

(1) 2003 ~ 2013 年,中国湿地具有明显的动态变化和分区特征. 总湿地、自然湿地和人工湿地均呈东北-西南分布格局,但相应分布的主趋势方向存在明显差异. 自然湿地面积及其变化均主导总湿地空间分布格局及其变化趋势,而且自然湿地与人工湿地的空间分异程度在增加,二者在东西或南北方向呈现出不同程度的扩张或收缩趋势.

(2) 2003 ~ 2013 年,人工湿地变化不存在显著空间自相关性,自然湿地变化则存在显著的空间正相关性,且具有空间变化上的连续性,人工湿地变化则表现为空间随机性. 局部 Moran's  $I$  统计揭示自然湿地变化的区域“热点”位于青海、西藏、四川区域,“个别热点”位于内蒙古,“冷点”位于河南,表现出明显的空间异质性.

(3) 2003 ~ 2013 年, 自然湿地保护效果差异明显, 存在分级分区特征, 具体分级为三大类或 5 小类. 其中, 青海、西藏和四川这 3 个地区为湿地保护最高效区; 甘肃、贵州、上海等 7 个地区为湿地保护高效区; 广东、河北、湖北等 9 个地区为湿地保护低效区, 河南则为湿地保护最低效地区; 安徽、北京、福建等 10 个地区为湿地保护效果不稳定地区.

致谢: 感谢爱尔兰国立戈尔韦大学 (National University of Ireland, Galway) 地理与考古学院的高级讲师张朝生老师对本文给予的指导与帮助!

#### 参考文献:

- [ 1 ] Costanza R. Nature: ecosystems without commodifying them[J]. *Nature*, 2006, **443**(7113): 749.
- [ 2 ] 滑丽萍, 华璐, 李贵宝, 等. 基于全球环境变化的中国湿地问题及保护对策[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2005, **26**(3): 102-108.  
Hua L P, Hua L, Li G B, *et al.* Problem and conservation strategy on wetland under global environment change in China [J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2005, **26**(3): 102-108.
- [ 3 ] An S Q, Li H B, Guan B H, *et al.* China's natural wetlands: past problems, current status, and future challenges [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, **36**(4): 335-342.
- [ 4 ] 牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978 ~ 2008 年中国湿地类型变化[J]. *科学通报*, 2012, **57**(16): 1400-1411.  
Niu Z G, Zhang H Y, Wang X W, *et al.* Mapping wetland changes in China between 1978 and 2008 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(22): 2813-2823.
- [ 5 ] Sun Z G, Sun W G, Tong C, *et al.* China's coastal wetlands: Conservation history, implementation efforts, existing issues and strategies for future improvement [J]. *Environment International*, 2015, **79**: 25-41.
- [ 6 ] 宫宁, 牛振国, 齐伟, 等. 中国湿地变化的驱动力分析[J]. *遥感学报*, 2016, **20**(2): 172-183.  
Gong N, Niu Z G, Qi W, *et al.* Driving forces of wetland change in China [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(2): 172-183.
- [ 7 ] 侯西勇, 徐新良, 毋亭, 等. 中国沿海湿地变化特征及情景分析[J]. *湿地科学*, 2016, **14**(5): 597-606.  
Hou X Y, Xu X L, Wu T, *et al.* Change characteristics and scenario analysis of coastal wetlands in China [J]. *Wetland Science*, 2016, **14**(5): 597-606.
- [ 8 ] Meng W Q, He M X, Hu B B, *et al.* Status of wetlands in China: a review of extent, degradation, issues and recommendations for improvement [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, **146**: 50-59.
- [ 9 ] 牛振国, 宫鹏, 程晓, 等. 中国湿地初步遥感制图及相关地理特征分析[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **39**(2): 188-203.
- [ 10 ] 宫鹏, 牛振国, 程晓, 等. 中国 1990 和 2000 基准年湿地变化遥感[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, **40**(6): 768-775.  
Gong P, Niu Z G, Cheng X, *et al.* China's wetland change (1990-2000) determined by remote sensing [J]. *Science China Earth Sciences*, 2010, **53**(7): 1036-1042.
- [ 11 ] 胡胜杰, 牛振国, 张海英, 等. 中国潜在湿地分布的模拟[J]. *科学通报*, 2015, **60**(33): 3251-3262.  
Hu S J, Niu Z G, Zhang H Y, *et al.* Simulation of spatial distribution of China potential wetland [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(33): 3251-3262.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] 刘志伟, 李胜男, 韦玮, 等. 近三十年青藏高原湿地变化及其驱动力研究进展[J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(3): 856-862.  
Liu Z W, Li S N, Wei W, *et al.* Research progress on alpine wetland changes and driving forces in Qinghai-Tibet Plateau during the last three decades [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(3): 856-862.
- [ 14 ] 万智巍, 连丽聪, 贾玉连, 等. 近百年来鄱阳湖南部湿地景观生态格局演变[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(9): 1682-1687.  
Wan Z W, Lian L C, Jia Y L, *et al.* Landscape ecological pattern changes of wetland in South Poyang lake in the past 100 years [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(9): 1682-1687.
- [ 15 ] 孙楠, 朱渭宁, 程乾. 基于多年遥感数据分析长江河口海岸带湿地变化及其驱动因子[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(11): 4366-4373.  
Sun N, Zhu W N, Cheng Q. Remote sensing time-series analysis of wetland variations and driving factors in estuarine and coastal regions of Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(11): 4366-4373.
- [ 16 ] 刘吉平, 吕宪国, 崔炜炜. 别拉洪河流域湿地变化的多尺度空间自相关分析[J]. *水科学进展*, 2010, **21**(3): 392-398.  
Liu J P, Liu X G, Cui W W. Spatial autocorrelation analysis of multi-scale changes in Bielalong River basin wetlands [J]. *Advances in Water Science*, 2010, **21**(3): 392-398.
- [ 17 ] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. *Economic Geography*, 1970, **46**(S1): 234-240.
- [ 18 ] Mitsch W J. *Global wetlands: old world and new* [M]. Amsterdam, New York: Elsevier, 1994. 1-40.
- [ 19 ] 王劲峰, 葛咏, 李连发, 等. 地理学时空数据分析方法[J]. *地理学报*, 2014, **69**(9): 1326-1345.  
Wang J F, Ge Y, Li L F, *et al.* Spatiotemporal data analysis in geography [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, **69**(9): 1326-1345.
- [ 20 ] Anselin L. The future of spatial analysis in the social sciences [J]. *Geographic Information Sciences*, 1999, **5**(2): 67-76.
- [ 21 ] 周婷, 牛安逸, 马姣姣, 等. 国家湿地公园时空格局特征[J]. *自然资源学报*, 2019, **34**(1): 26-39.  
Zhou T, Niu A Y, Ma J J, *et al.* Spatio-temporal pattern of national wetland parks [J]. *Journal of Natural Resources*, 2019, **34**(1): 26-39.
- [ 22 ] 赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. *地理科学*, 2014, **34**(8): 979-986.  
Zhao L, Zhao Z Q. Projecting the spatial variation of economic based on the specific Ellipses in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(8): 979-986.
- [ 23 ] 刘宇, 兰双双, 张永祥, 等. 基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4236-4244.  
Liu Y, Lan S S, Zhang Y X, *et al.* Spatio-temporal evolution of groundwater vulnerability based on spatial autocorrelation [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4236-4244.

- [24] 潘晓东, 李品, 冯兆忠, 等. 2000~2015年中国地级市化肥使用量的时空变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4733-4742.  
Pan X D, Li P, Feng Z Z, *et al.* Spatial and temporal variations in fertilizer use across prefecture-level cities in China from 2000 to 2015 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4733-4742.
- [25] Cliff A D, Ord J K. *Spatial processes: models and applications* [M]. London: Pion, 1981.
- [26] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2): 93-115.
- [27] Ping J L, Green C J, Zartman R E, *et al.* Exploring spatial dependence of cotton yield using global and local autocorrelation statistics [J]. *Field Crops Research*, 2004, **89**(2-3): 219-236.
- [28] Zhang C S, Luo L, Xu W L, *et al.* Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots of Pb in urban soils of Galway, Ireland [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **398**(1-3): 212-221.
- [29] 孟斌, 王劲峰, 张文忠, 等. 基于空间分析方法的中国区域差异研究[J]. 地理科学, 2005, **25**(4): 393-400.  
Meng B, Wang J F, Zhang W Z, *et al.* Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, **25**(4): 393-400.
- [30] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2004 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2004.
- [31] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴—2014 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [32] Anselin L, Getis A. Spatial statistical analysis and geographic information systems [J]. *The Annals of Regional Science*, 1992, **26**(1): 19-33.
- [33] Talen E, Anselin L. Assessing spatial equity: an evaluation of measures of accessibility to public playgrounds [J]. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 1998, **30**(4): 595-613.
- [34] 王春平. 河南省湿地面积动态变化与保护对策 [J]. 河南林业科技, 2014, **34**(1): 31-32, 48.  
Wang C P. Dynamic variation and conservation measures of wetland area in Henan province [J]. *Journal of Henan Forestry Science and Technology*, 2014, **34**(1): 31-32, 48.
- [35] 邢宇, 姜琦刚, 李文庆, 等. 青藏高原湿地景观空间格局的变化 [J]. 生态环境学报, 2009, **18**(3): 1010-1015.  
Xing Y, Jiang Q G, Li W Q, *et al.* Landscape spatial patterns changes of the wetland in Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(3): 1010-1015.
- [36] 黄宇驰, 王敏, 沙晨燕, 等. 中部地区战略发展生态安全制约及对策 [J]. 环境影响评价, 2015, **37**(6): 6-11, 26.  
Huang Y C, Wang M, Sha C Y, *et al.* Ecological security constraints and countermeasures for strategic development of central China [J]. *Environmental Impact Assessment*, 2015, **37**(6): 6-11, 26.
- [37] Davis J A, Froend R. Loss and degradation of wetlands in southwestern Australia: underlying causes, consequences and solutions [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 1999, **7**(1-2): 13-23.
- [38] Bawa K S, Koh L P, Lee T M, *et al.* China, India, and the environment [J]. *Science*, 2010, **327**(5972): 1457-1459.
- [39] 刘方正, 张鹏, 张玉波, 等. 基于人工地物时空变化的自然保护区空间近邻效应评估: 以沙坡头国家级自然保护区为例 [J]. 生物多样性, 2017, **25**(10): 1105-1113.  
Liu F Z, Zhang P, Zhang Y B, *et al.* Assessment of the space neighborhood effect on nature reserves based on temporal and spatial changes of artificial objects: a case study on Shapotou national nature reserve [J]. *Biodiversity Science*, 2017, **25**(10): 1105-1113.

## CONTENTS

Comparison of Three Receptor Models for Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Shanghai; Using Hourly Resolved PM <sub>2.5</sub> Chemical Composition Data	ZHOU Min (1997)
Impact of Differents in the Concentrations of Ozone on the Chemical Composition of Single Particles	WU Meng-xi, CHENG Chun-lei, HUANG Bo, et al. (2006)
Influence of Secondary Organic Coating on Hygroscopicity of a Sodium Chloride Core; Based on Micro-scale Single Particle Analysis	ZHANG Shu-jia, XU Liang, GUO Xin-mei, et al. (2017)
Comparative Analysis of Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosol Components in the Atmosphere Between Urban and Suburban Areas	LI Xin-yue, ZHANG Kai-shan, DENG Lin-li, et al. (2026)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Elements Bonded with PM <sub>2.5</sub> and PM <sub>10</sub> in Linyi	LU Ping, ZHAO Xue-yan, YIN Bao-hui, et al. (2036)
Characteristics and Sources of Microbial Aerosols in Urban and Mountainous Areas in Autumn and Winter in Xi'an, China	XIE Wen-wen, LU Rui, MU Fei-fei, et al. (2044)
Pollution Characteristics of Cooking Fumes, Particulates, and Non-methane Hydrocarbons in the Exhaust of Typical Beijing Restaurants	HE Wan-qing, WANG Tian-yi, SHAO Xia, et al. (2050)
PM <sub>2.5</sub> Concentration Influencing Factors in China Based on the Random Forest Model	XIA Xiao-sheng, CHEN Jing-jing, WANG Jia-jia, et al. (2057)
Spatio-temporal Variation of PM <sub>2.5</sub> Related Relationships in China from the Perspective of Air Pollution Regional Linkage Control and Prevention	YANG Wen-tao, HUANG Hui-kun, WEI Dong-sheng, et al. (2066)
Characteristics of Spatial and Temporal Evolution and Investigation of Air Pollution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area Based on Ground-Space Observation Data	WANG Yao-ting, LIANG Jia-cheng, ZHENG Zuo-fang, et al. (2075)
Hydrochemical Characteristics and Formation Causes of Ground Karst Water Systems in the Longzici Spring Catchment	TANG Chun-lei, ZHENG Xiu-qing, LIANG Yong-ping (2087)
Tempo-spatial and Retention Analysis of Total Phosphorus in the Three Gorges Reservoir	TANG Xiao-ya, TONG Si-chen, HUANG Guo-xian, et al. (2096)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Chlorophyll a in Typical Tributaries During the Impoundment Period of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, JI Dao-bin, WANG Li-jing, et al. (2107)
Spatial-temporal Distribution of Nutrients in Hanfeng Lake After Official Operation	FU Shi, NI Jiu-pai, HE Bing-hui, et al. (2116)
Spatio-temporal Variations in the Characteristics of Water Eutrophication and Sediment Pollution in Baiyangdian Lake	LIU Xin, SHI Bin, MENG Jing, et al. (2127)
Spatial-temporal Distribution of Suspended Solids and Its Sedimentation Flux and Nutrients Effects in Xin'anjiang Reservoir, China	SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, et al. (2137)
Bioavailability Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping Under Different Hydrological Scenarios	ZHANG Liu-qing, SHI Yu, LI Yuan-peng, et al. (2149)
Succession Characteristics of Algae Functional Groups and Water Quality Assessment in a Drinking Water Reservoir	LI Yan-qing, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, et al. (2158)
Effect of Artificial Mixing on Temporal and Spatial Succession of Algae Community Structure in Jinpen Reservoir	WANG Chen-xu, HUANG Ting-lin, LI Nan, et al. (2166)
Spatial Distribution Characteristics and Driving Factors of Aerobic Denitrification Bacterial Community Structure from Baiyangdian Lake in Xiong'an New Area During the Winter Freezing Period	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUE Ge-cheng, et al. (2177)
Spatial and Temporal Succession Characteristics of Aerobic Anoxygenic Photosynthesis Bacteria in a Stratified Reservoir	ZHANG Hai-han, WANG Yan, HUANG Ting-lin, et al. (2188)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Dynamics to Different Hydrological Scenarios in the Two Largest Freshwater Lakes Connected to the Yangtze River	GUO Yan-mi, LI Yuan-peng, SHI Yu, et al. (2198)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Northern-Side River of the Qinling Mountains in Summer	LIN Zi-shen, HUANG Ting-lin, YANG Shang-ye, et al. (2210)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Tributary Waters of the Lower Reaches of the Yangtze River, China	JIA Tian-qi, LEI Rong-rong, WU Xiao-lin, et al. (2221)
Temporal and Spatial Occurrence of NSAIDs in Taihu Lake and Relevant Risk Assessment	LIAN Jie, LI Yi-fei, WANG Xiao-xuan, et al. (2229)
Occurrence and Ecological Risk of Eight Typical PhACs in Surface Water and Its Impact on <i>Daphnia magna</i>	XU Xin-lei, LIU Jian-chao, LU Guang-hua (2239)
Distribution Characteristics and Migration Rules of Pollutants in Sediments of Reservoirs with <i>Eucalyptus</i> Plantation, Southern China	ZHU Ya, LI Yi-ping, LUO Fan, et al. (2247)
Mechanism of Urban Black Odorous Water Based on Continuous Monitoring: A Case Study of the Erkeng Stream in Nanning	LI Yong-xin, WANG Wei, HE Mei, et al. (2257)
Relationship Between Source-Sink Landscape Pattern and Antibiotics in Surface Water in Peri-urban Watershed	LI Min, TANG Jian-feng, CHEN Li-ding, et al. (2264)
Molecular Chemo-diversity of the Dissolved Organic Matter Occurring in Urban Stormwater Runoff	NIE Yun-han, CHEN Hao, LI Lei, et al. (2272)
Regulating Effect and Mechanism of Calcite/Chlorapatite Mixture Addition on Transformation and Transport of Phosphorus in Sediments	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, et al. (2281)
Stability of Ferrihydrite and Goethite Nanoparticles Under Different Environmental Conditions	WANG Zhi-qiao, MA Jie, CHEN Ya-li, et al. (2292)
Sunflower-Straw-Derived Biochar-Enhanced Fe(III)/S <sub>2</sub> O <sub>8</sub> <sup>2-</sup> System for Degradation of Benzoic Acid	SUN Peng, ZHANG Kai-kai, ZHANG Yu, et al. (2301)
Non-activated Peroxymonosulfate-Induced Degradation of Sulfasalazine; Kinetics and Mechanism Investigations	DING Xi, ZHANG Xue-wei, ZHOU Run-sheng, et al. (2310)
Pollution Characteristics and Removal Effects of Antibiotics in Wastewater from Large-Scale Pig Farms in Guizhou	YANG Zhao, LI Jiang, XIANG Fu-liang, et al. (2320)
Nitrogen Removal in Low-C/N Rural Sewage Treatment by Anoxic/Oxic Biofilter Packed with New Types of Fillers	ZHAO Yuan-zhe, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, et al. (2329)
Nitrogen Removal Performance and Nitrogen/Carbon Balance of Oligotrophic Aerobic Denitrifiers	WEN Gang, WANG Tong, HUANG Ting-lin, et al. (2339)
Bacterial Community Shifts and Nitrogen Removal Characteristics for a SNAD Process Treating Anaerobic Digester Liquor of Swine Wastewater (ADLSW) in a Continuous-Flow Biofilm Reactor (CFBR)	QIN Jia-wei, XIN Xin, LU Hang, et al. (2349)
Characteristics of ANAMMOX Granular Sludge and Differences in Microbial Community Structure Under Different Culture Conditions	JIANG Ying, GUO Meng-lei, XIE Jun-xiang, et al. (2358)
Start-up of an Integrated Process of Denitrifying Phosphorus Removal Coupled with Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	CHEN Ya, YIN Wen, ZHANG Xing-xing, et al. (2367)
Construction and Application of an Evaluation System for Soil Environmental Carrying Capacity	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, et al. (2373)
Synthesis of Magnetic Biochar and Its Application in the Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soils	WANG Jun-nan, CHENG Shan-shan, ZHAN Wen-hao, et al. (2381)
Remediation of Heavy-Metal-Contaminated Soil by EGTA Washing Enhanced with Reduction Solubilization	ZHANG Jin-yong, ZHU Yu-ting, WANG Ming-xin, et al. (2390)
Toxicity of Chromium to Root Growth of Barley as Affected by Chromium Speciation and Soil Properties	FU Ping-nan, GONG Xiao-fei, LUO Li-yun, et al. (2398)
Effect of Fertilizer Reduction and Biochar Application on Soil Nitrogen Loss in Purple Upland	WANG Shu, WANG Zi-fang, LONG Yi, et al. (2406)
Relationship Between the Composition of Soil Aggregates and the Distribution of Organic Carbon Under Long-Term Abandoned Restoration	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHANG Xin-yi, et al. (2416)
Effects of Biochar Application on Soil Microbial Nutrient Limitations and Carbon Use Efficiency in Lou Soil	WANG Qiang, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, et al. (2425)
N <sub>2</sub> O Emissions from Tea Plantations with Sorghum Intercropping and Application of Big Urea Pills	ZHANG Ke-bin, LIU Xin-liang, KANG Man, et al. (2434)
Effects of Different Forest Vegetation Types on Soil Nitrogen-Related Microbial Communities and Functions in Jinyun Mountain	WANG Ying-yan, WANG Fu-hua, LUO Dong-hai, et al. (2445)
Nitrous Oxide Emission and Denitrifying Bacterial Communities as Affected by Drip Irrigation with Saline Water in Cotton Fields	GUO Hui-nan, MA Li-juan, HUANG Zhi-jie, et al. (2455)
Effect of Organic Matter Promotion on Nitrogen-Cycling Genes and Functional Microorganisms in Acidic Red Soils	CHU Cheng, WU Zhao-yue, HUANG Qian-ru, et al. (2468)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Fungi Diversity in the Transition Zone of Moso Bamboo and Broadleaf Forest	WANG Nan, PAN Xiao-cheng, WANG Chuan-kuan, et al. (2476)
Differences Between DNA- and RNA-Based Bacterial Communities in Marine Sediments	LI Ming-yue, YANG Yu-hong, MI Tie-zhu, et al. (2485)
Spatial Patterns and Spatial Autocorrelations of Wetland Changes in China During 2003-2013	ZHOU Ting, MA Jiao-jiao, XU Song-jun (2496)