



环境科学  
*Environmental Science*  
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

## 《环境科学》网络首发论文

题目：松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析  
作者：丁洋，赵进勇，张晶，付意成，彭文启，陈渠昌，李艳艳  
DOI：10.13227/j.hjcx.202009244  
收稿日期：2020-09-25  
网络首发日期：2020-11-26  
引用格式：丁洋，赵进勇，张晶，付意成，彭文启，陈渠昌，李艳艳. 松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析. 环境科学.  
<https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202009244>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 松花湖水质空间差异及富营养化空间自相关分析

丁洋, 赵进勇\*, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳

(中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038)

**摘要:** 为识别中国东北地区最大的人工湖——松花湖水质空间差异与富营养化的空间分布特征, 运用方差分析与因子分析对丰满水库主库区、松花江三湖保护区实验区和蛟河回水区这 3 个区域 2017 年的水质采样检测结果进行了分析, 运用综合营养状态指数法评价了湖区的营养状况, 采用空间自相关分析对松花湖湖区富营养化水平的空间相关性与其聚集度状况进行了研究。主要结果如下: ①方差分析结果表明, 除溶解氧 (DO) 与叶绿素 a (Chla) 外, 总氮 (TN)、总磷 (TP)、水温 (WT)、pH 值在松花湖 3 个区域内存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 其中 TN 与 TP 区域差异最为明显; ②因子分析结果表明, 气候条件因子 (WT)、营养盐因子 (TN、TP) 与藻类生物量因子 (Chla) 变化主导着湖区水质的变化; ③综合营养状态指数法结果表明, 松花湖湖区营养状态整体为轻度富营养化, 3 个区域的富营养化水平由强到弱依次为: 蛟河回水区 > 丰满水库主库区 > 松花江三湖保护区实验区; ④全局空间自相关的结果表明, 湖区富营养化水平整体呈现显著的正空间自相关关系, 由于区域富营养化水平影响范围较大, 松花湖富营养化水平的空间异质性强; ⑤局部空间自相关的结果表明, 蛟河回水区的中部及北部地区是湖区富营养化水平的热点 (高/高集聚) 区域 ( $P < 0.01$ ), 松花江三湖保护区实验区的中部是湖区富营养化水平的冷点 (低/低集聚) ( $P < 0.05$ )。因此进行松花湖水环境治理时, 应将富营养化防治的重点区域落在蛟河回水区与丰满水库主库区。

**关键词:** 水质; 富营养化水平; 空间特征; 空间自相关; 松花湖

DOI:10.13227/j.hjks.202009244

## Spatial Difference of Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake

DING Yang, ZHAO Jin-yong\*, ZHANG Jing, FU Yi-cheng, PENG Wen-qi, CHEN Qu-chang, LI Yan-yan

(Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** To identify the spatial differences in water quality and eutrophication characteristics of Songhua Lake, the largest artificial lake in northeast China, Analysis of Variance (ANOVA) and factor analysis were used to analyze the water quality sampling and testing results in 2017 in three regions, the main reservoir area of Fengman Reservoir (MRAFR), the experimental area of Songhua River Three Lakes Protection Zone (EASRTLZ) and the Jiaohe river backwater area (JRBA), the nutritional status of the lake was evaluated by the trophic state index method, and the spatial correlation and aggregation status of the eutrophication level in Songhua Lake were studied by spatial autocorrelation analysis. The main results were as follows: ① ANOVA show that, except for dissolved oxygen (DO) and chlorophyll a (Chla), there are significant differences ( $P < 0.05$ ) in total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), water temperature (WT) and pH value in the three areas of Songhua Lake, with the most obvious difference between TN and TP; ② Factor analysis show that the climatic condition factor (WT), nutrient salt factor (TN, TP) and algal biomass factor (Chla) changes dominate water quality in the lake; ③ The results of the trophic state index show that the nutritional status of the Songhua Lake lakes as a whole is mildly eutrophic, and the eutrophication levels of the three regions from strong to weak are: JRBA > MRAFR > EASRTLZ; ④ The results of the global spatial autocorrelation show that the eutrophication level of the lakes as a whole show significant positive spatial autocorrelation, due to the influence of regional eutrophication levels. The spatial

收稿日期: 2020-09-25; 修订日期: 2020-11-02

基金项目: 中国水科院创新领军人才项目 (WE0145B532017); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07105-002); 水利部公益性行业科研专项 (201501030)

作者简介: 丁洋 (1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为流域水环境循环综合调控, E-mail: iwhrdy@163.com

\*通信作者, E-mail: zhaojy@iwhr.com

heterogeneity of the eutrophication level of Songhua Lake is low; ⑤ The results of local spatial autocorrelation show that the central and northern areas of JRBA are the hot spots (high/high concentration) of the eutrophication level of the lake ( $P < 0.01$ ), and the central part of EASRTLZ is the cold spot (low/low concentration) of the eutrophication level of the lake ( $P < 0.05$ ). Therefore, when carrying out the water environment management of Songhua Lake, the key area for eutrophication control should fall on JRBA and MRAFR.

**Key words:** water quality; eutrophication level; spatial characteristics; spatial autocorrelation; Songhua Lake

目前,水质恶化、生态功能退化等问题是全球大部分湖泊共同面临的生态环境问题<sup>[1]</sup>,尤其是对湖泊生态系统造成巨大威胁的富营养化问题已引发全球关注<sup>[2]</sup>。中国拥有湖泊众多,其中面积大于1 km<sup>2</sup>的湖泊就已超过2600个<sup>[3]</sup>,然而,这些湖泊却仍旧面临着水质日益恶化、富营养化现象日益严重和生物多样性减少等不可忽视的生态环境问题<sup>[4]</sup>。水体富营养化是指营养物质富集导致浮游植物过度生长,从而造成初级生产力和次级生产力失衡而引起的<sup>[5]</sup>。众多研究表明,水体富营养化会对环境、社会经济甚至人类健康构成威胁<sup>[6]</sup>。2007年中国太湖局部蓝藻暴发造成无锡市200万人生活用水严重短缺<sup>[7]</sup>,2014年美国伊利湖流域西部有毒藻类爆发导致40万人供水中断<sup>[8]</sup>。松花湖是吉林省的重要饮用水水源地,同时还肩负着发电、防洪、水产养殖、灌溉和旅游等多重功能,在吉林省的经济建设和生态环境改善等方面均发挥着重要作用<sup>[9]</sup>。然而,文献[10]对2017—2018年的数据显示,松花湖湖区水体总体已为IV类水水质,且面临着轻度富营养的问题,甚至湖区中的某些地方已经长期呈现富营养化状态<sup>[11]</sup>,难以满足当地居民日常用水的需求。

氮磷等污染物的扩散污染是造成富营养化的主要驱动力<sup>[12]</sup>,对水质监测数据分析与评价有助于进一步识别区域富营养化水平。目前,多元统计分析方法被广泛应用于水质分析中,例如方差分析<sup>[13,14]</sup>、聚类分析<sup>[15]</sup>、主成分分析<sup>[16]</sup>和因子分析<sup>[17]</sup>等,这些方法在解析水质数据,评价水质,分析水质时空变化,识别水质潜在污染源等方面得到了广泛的应用。中国环境监测总站推荐了一种基于营养水平指数的湖库富营养化评价方法,即综合营养状态指数法,该方法旨在识别湖库中的营养水平<sup>[18]</sup>。综合营养状态指数法通过将单变量分析的简单性与多变量分析的准确性相集成,已被广泛采用<sup>[19]</sup>。但是这些研究在综合营养状态指数法的结果分析中没有明确考虑富营养化的空间依赖性,湖区不同区域的富营养化水平通常表现出相似的趋势。为了实现多元统计方法中的参数统计检验,可以合理地消除这些看似自相关的位点,但是这种做法会减少样本位点的数量,通常难以对整个研究区域得出可靠的结论。空间自相关是指某些变量在同一或不同分布区域内的观测数据之间潜在的相互依赖性,空间自相关分析是分析空间分布格局,依赖程度的常用技术<sup>[20]</sup>。目前空间自相关研究领域主要集中在地理<sup>[21]</sup>、经济<sup>[22]</sup>和农业<sup>[23]</sup>等领域,分别用于研究特定区域规律性现象;区域经济水平和经济分布格局时空变化规律;农业资源与土壤成分的空间异质性分析等,在环境领域应用较少,仅在大气污染、土壤污染等方面进行研究<sup>[24-27]</sup>,使用空间自相关分析湖区富营养化水平的空间格局与空间依赖性的研究较少。评价湖泊的营养状况可以说明湖泊生态系统的环境质量水平,可用于指导制定适当的缓解策略<sup>[28]</sup>。基于此,为了识别松花湖的水质空间差异与富营养化的空间分布特征,本研究基于松花湖水质监测数据,运用多元统计方法揭示松花湖水质的空间差异;采用综合营养状态指数法评价了松花湖的富营养化水平;此外,创新性地运用空间自相关方法对富营养化评价结果在全局和局部地区的聚集特征进行表征,揭示出松花湖湖区营养状态的空间分布格局与空间依赖性,以期对松花湖水环境治理提供理论依据,对松花湖水生态环境问题政策制定具有一定的参考价值。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区域概况

松花湖(43°07'~43°50'N, 126°45'~127°38'E)位于中国吉林省吉林市东部,地处东北腹地长白山脉向松嫩平原过渡地带的松花江畔,地跨桦甸市、蛟河市和吉林市丰满区,是中国第3大人工湖泊,同时也是中国东北地区最大人工湖泊<sup>[29]</sup>。松花湖是丰满水电站对松花江筑坝而形成的,流域面积42500 km<sup>2</sup>,其中

湖水平均面积 550 km<sup>2</sup>。松花湖气候属北温带大陆性季风气候，全年平均气温 4.4 ℃，多年平均降水量 657 mm，降雨多集中在 6—9 月，约占全年降水总量的 70%。湖区有 3 条主要入湖河流，分别为松花江、辉发河和蛟河。根据吴计生等<sup>[30]</sup>的研究，将松花湖湖区分为 3 个区域，分别为丰满水库主库区、松花江三湖保护区实验区和蛟河回水区，位置见图 1。

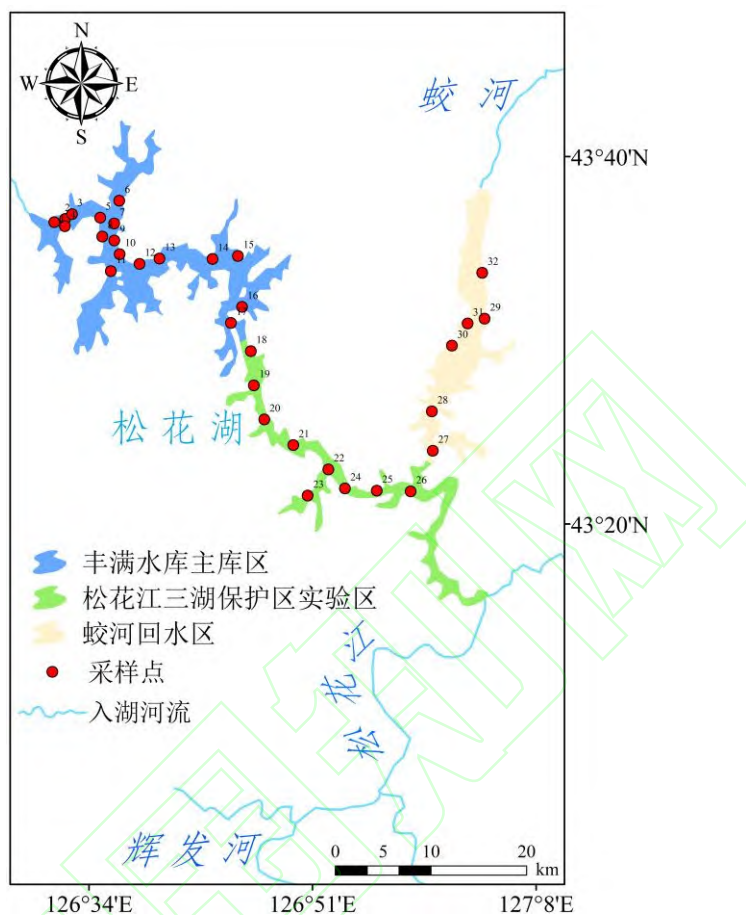


图 1 松花湖湖区示意及取样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of Songhua Lake and distribution of sampling points

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样品采集与分析

于 2017 年 5 月 11 日，在松花湖湖区选取 32 个采样点进行水质调研(图 1)。监测指标包括总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a (Chla)、水温(WT)、溶解氧(DO)和 pH 值，同时，为减小系统误差，以上样品均重复测定 3 次，数据分析过程中取其平均值。本研究进行的采样、预处理、硝化和测量程序均符合文献<sup>[31]</sup>的要求。

### 1.2.2 基于多元统计分析方法的水质空间异质性分析

方差分析是一种假设检验，用于两个及以上样本均数差别的显著性检验，其基本原理是把全部观测数据的总变异分解为组间变异与组内变异，如果组间变异远远大于组内变异，则认为控制因素对因变量产生了影响<sup>[32]</sup>。本研究以监测点空间位置为控制因素，采用方差分析识别松花湖水质的空间差异。

因子分析是通过分析观测指标间的相互关系来产生源成分谱进而把复杂变量归结为数量较少的综合特征因子，可以对变量进行有效的降维<sup>[33]</sup>。本研究采用因子分析探索松花湖水水质因子主导因素，从宏观上提取水质数据的数学特征。

### 1.2.3 综合营养状态指数法

本研究采用综合营养状态指数法评价松花湖富营养化水平。综合营养状态指数法模型的计算如下：

$$TLI = \sum_{i=1}^m w_j TLI_j; w_j = r_{ij}^2 / (\sum_{i=1}^m r_{ij}^2) \quad (1)$$

式中，TLI 是所有营养参数指标的总和， $TLI_j$  是第  $j$  个水质指标的 TLI 值， $m$  是参与评估水质指标的数量， $w_j$  是第  $j$  个水质指标在 TLI 中的权重。金相灿等<sup>[34]</sup>调查分析了中国 26 个主要湖泊，总结了湖泊部分水质参数与 Chla 的相关关系[1 (Chla)、0.84 (TP)和 0.82 (TN)]，尽管有许多不同的评价参数，但 Chla、TP 和 TN 是 3 个基本参数<sup>[35]</sup>。

Chla、TP 和 TN 的 TLI 值计算如下<sup>[36]</sup>：

$$TLI (Chla) = 10 (2.5 + 1.086 \ln Chla) \quad (2)$$

$$TLI (TP) = 10 (9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (3)$$

$$TLI (TN) = 10 (5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (4)$$

式中，Chla 的单位为  $mg \cdot m^{-3}$ ，TP 和 TN 的单位为  $mg \cdot L^{-1}$ 。

湖泊营养状态分为 5 个等级，贫营养( $TLI < 30$ )，中营养( $30 \leq TLI \leq 50$ )，轻度富营养( $50 < TLI \leq 60$ )，中度富营养( $60 < TLI \leq 70$ )和重度富营养( $TLI > 70$ )。

### 1.2.4 空间自相关分析

本研究采用空间自相关分析来研究松花湖湖区富营养化聚集特征及分析其空间格局。空间自相关是一种空间统计方法，是指某些变量在同一或不同分布区域内的观测数据之间潜在的相互依赖性，是检验某个变量属性值是否显著与其相邻空间点的属性值相关联的重要指标，分为正相关和负相关，正相关表明某单元的属性值变化与其邻近空间单位具有相同变化趋势，负相关则相反。空间自相关包括全局自相关和局部自相关，测度指标分别是 Global Moran's  $I$  (全局莫兰指数) 以及 Local Moran's  $I$  (局部莫兰指数)<sup>[37, 38]</sup>。

#### (1) 全局空间自相关

Global Moran's  $I$  是全区域测度空间要素属性值聚合或离散的程度。本研究采用 Global Moran's  $I$  来衡量全局空间自相关性，可用公式 (5) 表示：

$$Global \ Moran's \ I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{s^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (5)$$

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

式中，Moran's  $I$  取值范围为 $[-1, 1]$ 。 $I > 0$  表示空间正相关性，其值越大，空间相关性越明显，即空间要素在整体空间区域聚合。 $I < 0$  表示空间负相关性，其值越小，空间差异越大，即空间要素在整体空间区域离散； $I = 0$ ，空间呈随机性，即空间要素在整体空间区域趋于随机分布。 $n$  是空间单元数目， $x_i$  和  $x_j$  表示空间单元  $i$  和  $j$  的属性值， $w_{ij}$  是空间权重系数矩阵，表示各空间单元邻近关系。

## (2) 局部空间自相关

Local Moran's  $I$  可进一步确定空间要素属性值的空间集聚区或孤立区所在的位置，以及异常点所在的位置。它可以测度各种集聚值及该集聚出现在何区域，局部空间自相关采用局部 Local Moran's  $I$  来分析对研究区域内每个空间单元在整体区域内的空间分布状态，根据每个空间单元的取值分析空间格局，Local Moran's  $I$  指数的计算公式为如下：

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m w_{ij}(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

式中，当  $I_i > 0$  时，区域空间单元  $i$  与相邻空间单元  $j$  存在较强的正空间自相关关系，表示局部空间集聚，当  $I_i < 0$  时，说明存在较强的负空间自相关关系， $n$  是空间单元数目， $x_i$  和  $x_j$  表示空间单元  $i$  和  $j$  的属性值， $w_{ij}$  是空间权重系数矩阵。

## 2 结果与分析

### 2.1 水环境因子特征与评价

由表 1 可知，松花湖 pH 平均值为 8.65，最小值为 8.26，表明水体总体呈弱碱性。松花湖水样中 TN 质量浓度范围为 0.30~4.60  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均值为 2.04  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，TP 质量浓度范围为 0.01~0.49  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均值为 0.23  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，其含量的平均值均超国家 V 类湖库水质限值。DO 质量浓度范围为 7.73~10.49  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，平均值为 9.15  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

表 1 研究区水质因子特征

Table 1 Characteristics of water quality factors in the study area

水质因子	均值±标准差	实测值范围
WT/°C	13.89±1.71	10.5~17.2
pH	8.65±0.24	8.26~9.03
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	9.15±0.56	7.73~10.49
Chla/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	6.27±6.87	0.11~30.75
TN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.04±1.01	0.3~4.6
TP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.23±0.13	0.01~0.49

### 2.2 水环境因子空间变化特征

本研究将松花湖的 3 个区域：丰满水库主库区、松花江三湖保护区实验区和蛟河回水区分为 3 组数据对其水环境因子进行方差分析（均通过方差齐性检验，图 2），结果表明除 DO 与 Chla 外，TN、TP、WT 和 pH 在 3 个区域内存在显著性差异（ $P < 0.05$ ）。

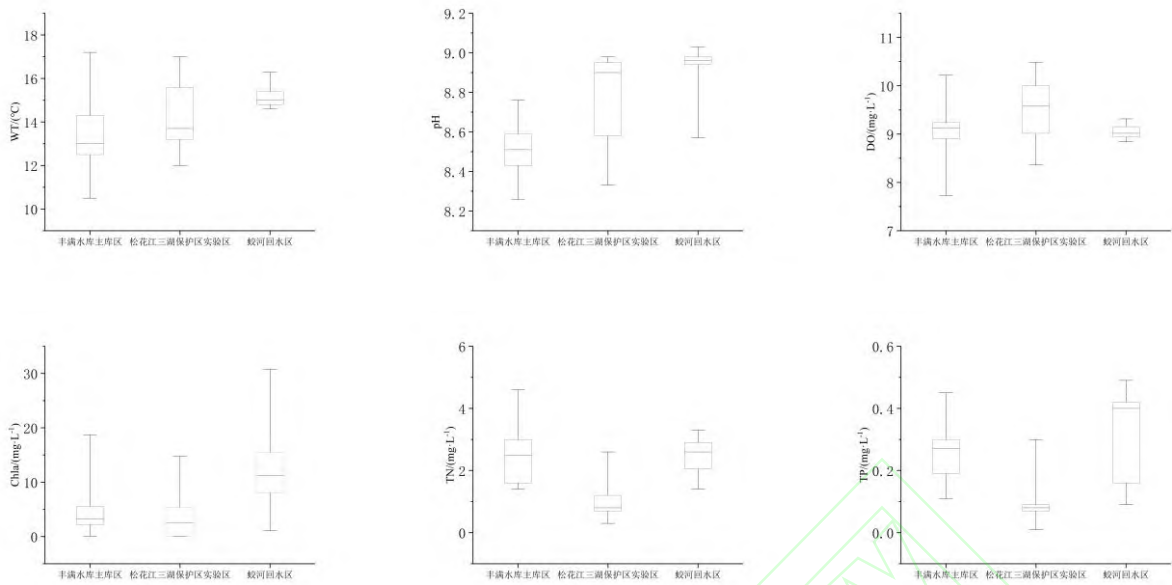


图 2 水环境因子空间差异

Fig. 2 Spatial variations in water environmental factors

### 2.3 水质指标因子分析

经因子分析检验，松花湖各水质指标原始数据之间存在较强的相关性（通过 KMO 与 Bartlett 检验），可以进行因子分析。本文提取了引起水质变化的 3 个因子，其累积方差贡献率为 83.69%，可以充分反映水样原始数据的信息。

表 2 松花湖因子分析结果<sup>1)</sup>

Table 2 Factor analysis results of Songhua Lake

监测指标	因子 1	因子 2	因子 3
Chla	0.17	0.18	0.95*
TN	-0.33	0.94*	0.17
TP	-0.14	0.93*	0.29
WT	0.83*	-0.05	0.40
pH	0.92*	-0.19	0.09
DO	-0.68	0.51*	0.37
特征值	2.42	1.73	0.87
方差贡献率/%	40.42	28.78	14.50
累积方差贡献率/%	40.42	69.19	83.69

1) \*数值表示水质因子在不同因子中载荷大于 0.5 的值

由表 2 可知，松花湖水质指标因子分析提取出 3 个因子，解释了 83.69% 的方差。其中因子 1 的方差贡献率最高，为 40.42%，主要由 WT 和 pH 组成，反应了气候条件与湖泊化学特征（pH）对水质的影响；因子 2 的方差贡献率为 28.78%，主要由 TN、TP 和 DO 组成，反映了湖泊中营养盐（TN 和 TP）与 DO 主导着湖泊水质变化，其中 TN 和 TP 对因子 2 有最强的正相关性；因子 3 的方差贡献率为 14.50%，与之关联的指标为 Chla，其表征富营养化水平与藻类生物量，反映了湖泊中藻类生物量是水质主导因子。

## 2.4 松花湖富营养化空间自相关分析

### 2.4.1 综合营养状态指数空间分布

松花湖综合营养状态指数的空间分布见图 3。整体上，蛟河回水区的综合营养状态指数要高于丰满水库主库区和松花江三湖保护区实验区，富营养化水平以轻度富营养为主；综合营养状态指数最低的为松花江三湖保护区实验区，富营养化水平以中营养为主。湖区采样点的综合营养状态指数的平均值为 52.70，属轻度富营养化，综合营养状态指数的空间分布与营养盐和藻类的空间分布规律类似。

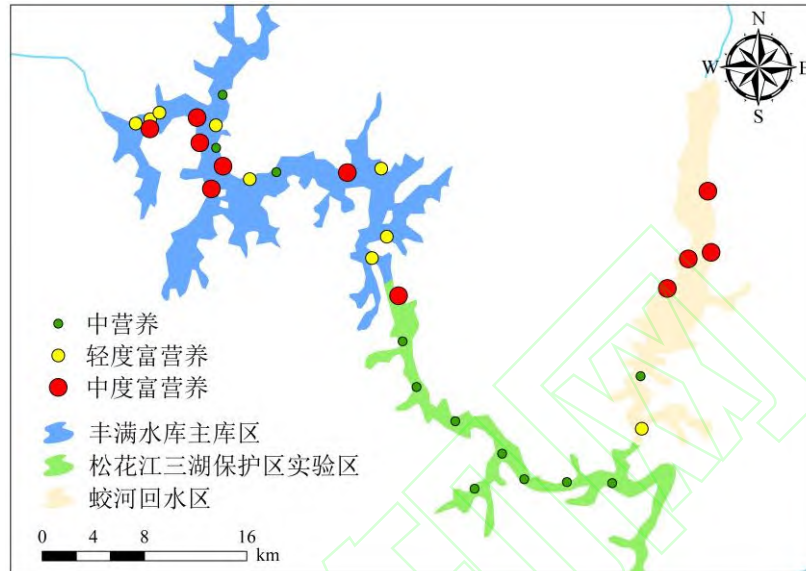


图 3 松花湖综合营养状态指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of TLI in Songhua Lake

### 2.4.2 松花湖综合营养状态指数空间自相关分析

采用 GeoDa 软件对松花湖 32 个采样点的综合营养状态指数进行全局空间自相关分析，结果表明，松花湖 32 个采样点综合营养状态指数的 GlobalMoran's  $I$  为 0.32，说明松花湖富营养化水平在空间上呈显著的正空间自相关( $P < 0.01$ )，各样点的综合营养状态指数趋于空间聚集，说明在本研究采样尺度下，湖区富营养化水平空间结构性得到了较好地反映。

松花湖综合营养状态指数空间自相关与距离的关系如图 4 所示，在 0~14 km 范围内，LocalMoran's  $I > 0$ ，为正空间自相关，存在空间聚集现象；在 14~38 km 范围内，LocalMoran's  $I < 0$ ，为负空间自相关，存在空间孤立现象；在 38~43 km 范围内，LocalMoran's  $I > 0$ ，空间指标又回到正值。



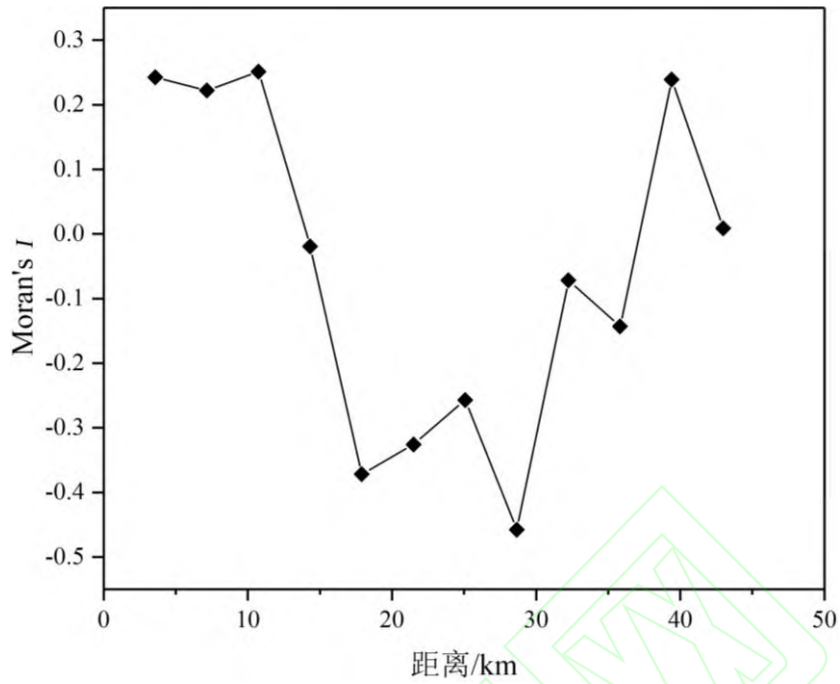


图4 综合营养状态指数的空间自相关性

Fig. 4 Spatial autocorrelation of TLI

为进一步分析松花湖富营养化水平空间聚集程度，采用局部空间自相关分析对湖区综合营养状态指数空间聚集程度进行定量化分析。根据 95%置信度双侧检验量划分冷热点空间分布（图 5），综合营养状态指数热点（高/高集聚）区域主要分布在松花湖蛟河回水区的中部及北部地区，综合营养状态指数冷点（低/低集聚）区域主要存在于松花江三湖保护区实验区的中部。

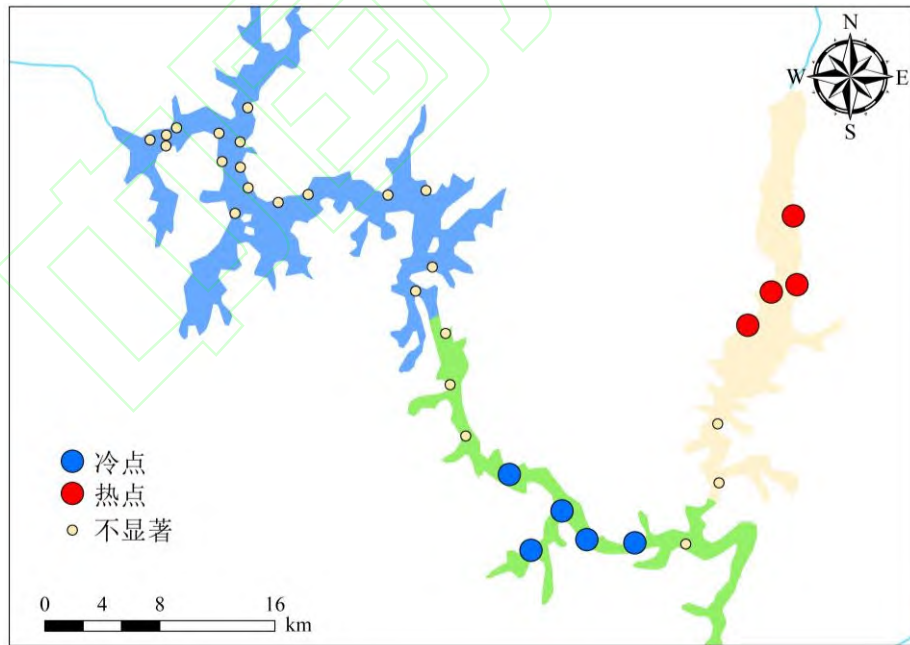


图5 综合营养状态指数热点分布

Fig. 5 Distribution of TLI hot spots

### 3 讨论

#### 3.1 松花湖水质空间特征分析

松花湖水质状况在空间上大体呈现北高南低的分布特征,根据图 2 表明,除 DO 与 Chla 外, TN、TP、WT 和 pH 在松花湖 3 个区域内存在显著性差异 ( $P<0.05$ ),其中 TN 与 TP 区域差异明显,蛟河回水区与丰满水库主库区的 TN、TP 质量浓度要远远高于松花江三湖保护区实验区,松花湖蛟河回水区主要承接上游蛟河的来水,蛟河穿越蛟河市区,是蛟河市主要的排水河道,上游城镇的生活污水等污染物排入蛟河,大部分污染物随蛟河入湖<sup>[38]</sup>;其次,松花湖湖滨带土地利用方式以耕地为主,占到了 44.91%<sup>[39]</sup>,大部分耕地集中在蛟河回水区两岸,土地利用强度高,降水冲刷耕地产生大量地表径流,加剧了该地区的面源污染,氮磷流失现象严重。松花江三湖保护区实验区位于松花湖的中部,地处生态环境条件较好的山区河道,在划定的自然保护区区域内,生态系统结构相对完整和功能相对正常,受人为干扰较小,土地利用现状多为林地和湿地等<sup>[40]</sup>,基本上以自然生态环境和景观格局为主,植被多为自然生长,土地利用强度不大,目前已有研究表明,林地和湿地等面积的增加对水质改善发挥着极其重要的作用<sup>[41]</sup>,加之该区域以山区河道为主,具有河流特点,水体流动性较好,使得水体自净能力得到增强,有利于污染物的稀释扩散,氮磷污染物在运输过程中会逐渐被稀释降解<sup>[42]</sup>。丰满水库主库区,同时也是松花湖风景名胜区的景区,该区域污染物一方面来源于景区景点及旅游设施的开发建设造成的建筑污染,另一方面来源于旅游消费过程中的人类活动<sup>[39]</sup>。

#### 3.2 松花湖富营养化空间自相关特征分析

松花湖湖区采样点的综合营养状态指数的平均值为 52.70,属轻度富营养化。松花湖 32 个采样点综合营养状态指数的 Global Moran's  $I$  为 0.32,空间结构上呈正空间自相关,说明松花湖的富营养化水平在空间上有比较强的相关性。图 6 为松花湖富营养化空间特征概念,  $M$  为湖区任意一点,  $A$  为以  $M$  为圆心,半径为 14 km 的圆形区域,  $B$  为以  $M$  为圆心,外径为 38 km,内径半径为 14 km 的圆环区域,  $C$  为以  $M$  为圆心,外径为 43 km,内径半径为 38 km 的圆环区域。由图 5 分析,  $M$  与  $A$  区域任意一点的富营养化水平呈正相关关系,与  $B$  区域任意一点的富营养化水平呈负相关关系,与  $C$  区域任意一点的富营养化水平呈正相关关系。湖区富营养化水平的空间特征大体为:距离较近的样点富营养化水平呈显著的正相关关系,随着距离的增加富营养化水平逐步呈负相关关系,最后相关性指标又逐渐趋于正值,达到正相关关系。近距离的正相关关系反应的是松花湖湖区相同富营养化水平区域的影响半径,半径为 14 km 左右,区域内影响富营养化水平的因素如水动力条件、水文条件和水体理化性质等相同;负相关关系反映的是湖区富营养化水平差别较大区域之间的平均距离;而远距离的正相关关系反映的是富营养化水平相同的不同区域直接的平均距离,通过距离可以看出富营养化水平相同的区域分别为丰满水库主库区与蛟河回水区,虽然两个区域的污染源有所不同(丰满水库主库区以建筑污染与旅游污染为主,蛟河回水区以农业污染与生活污染为主),但由于污染源都有助于导致湖区富营养化,所以两个区域的富营养化水平同样呈现正相关关系。这种变化趋势反映松花湖湖区富营养化水平存在空间差异,但由于相同或近似富营养化水平区域的影响半径较大,使得松花湖富营养化水平的空间异质性强。

局部自相关的结果表明,综合营养状态指数热点(高/高集聚)区域主要分布在松花湖蛟河回水区的中部及北部地区 ( $P<0.01$ ),蛟河回水区北部区域直接承接蛟河来水,加之湖滨带面源污染的影响,使得该区域为综合营养状态指数的高聚集区,富营养化水平较高,而由于水体的流动自净能力,到蛟河回水区的南部聚集程度有所下降;综合营养状态指数冷点(低/低集聚)区域主要存在于松花江三湖保护区实验区的中部 ( $P<0.05$ ),由于自然禀赋条件优越与人类活动较少等因素,导致该区域为综合营养状态指数的低聚集区。

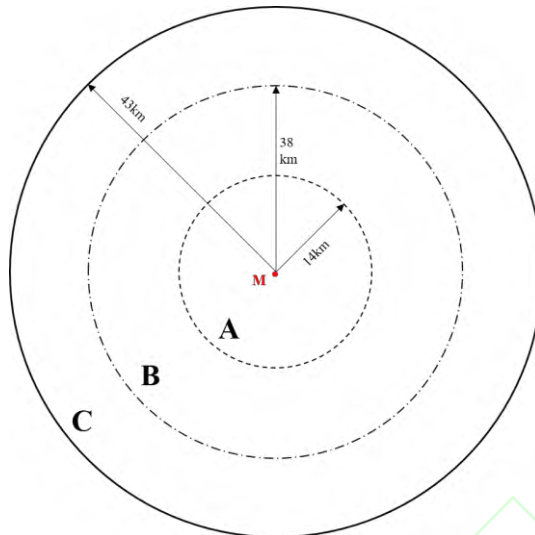


图 6 富营养化空间特征概念

Fig. 6 Conceptual of the spatial characteristics of eutrophication

## 4 结论

(1) 松花湖水质总体为国家Ⅴ类湖库水质，整体水质较差。氮磷等水环境因子在松花湖 3 个区域呈现显著的空间差异 ( $P < 0.05$ )，蛟河回水区与丰满水库主库区的主要污染源为生活污染、农业面源污染与旅游业污染；气候条件与湖泊化学特征因子 (WT、pH)、营养盐因子 (TN、TP) 与藻类生物量因子 (Chla) 是湖区水质变化的主导因素。

(2) 松花湖总体富营养化水平为轻度富营养化，蛟河回水区的富营养化水平最高，为中度富营养化，松花江三湖保护区实验区的富营养化水平最低，为中营养状态。松花湖综合营养状态指数的 Global Moran's  $I$  指数为 0.32，表明在本次采样的尺度下，湖区富营养化水平整体呈现显著的正空间自相关关系。在本次采样的尺度下，松花湖富营养化水平近距离的正空间自相关性显著的距离为 14 km 左右。松花湖湖区富营养化水平存在空间差异，但松花湖富营养化水平的空间异质性不强。

(3) 松花湖湖区富营养化水平的热点 (高/高集聚) 区域主要分布在松花湖蛟河回水区的中部及北部地区 ( $P < 0.01$ )，冷点 (低/低集聚) 区域主要存在于松花江三湖保护区实验区的中部 ( $P < 0.05$ )，对于当地管理部门，应将富营养化防治的重点区域落在蛟河回水区与丰满水库主库区。

## 参考文献:

- [1] Ding Y, Dong F, Zhao J Y, *et al.* Non-point source pollution simulation and best management practices analysis based on control units in Northern China[J].*International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(3):868.
- [2] Du H, Chen Z, Mao G, *et al.* Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach[J]. *Ecological Indicators*, 2019, **102**(7):686-692.
- [3] 张奇,刘元波,姚静,等.我国湖泊水文学研究进展与展望[J].*湖泊科学*,2020,**32**(5):1360-1379.  
Zhang Q, Liu Y B, Yao J, *et al.* Lake hydrology in China: Advances and prospects [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, **32**(5):1360-1379.
- [4] Wu Z S, Cai Y J, Zhang L, *et al.* Spatial and temporal heterogeneities in water quality and their potential drivers in Lake Poyang (China) from 2009 to 2015[J]. *Limnologica*, 2018, **69**(3):115-124.
- [5] Khan F A, Ansari A A. Eutrophication: An ecological vision[J]. *Botanical Review*, 2005, **71**(4):449-482.
- [6] Morgane L M, Chantal G O, Ménesguen Alain, *et al.* Eutrophication: A new wine in an old bottle ?[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **651**(2):1-11.
- [7] Qin B Q, Zhu G W, Gao G, *et al.* A drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management[J]. *Environmental Management*, 2011, **45**(1):105-112.
- [8] Ho J C, Michalak A M. Challenges in tracking harmful algal blooms: A synthesis of evidence from Lake Erie[J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, **41**(2):317-325.
- [9] 崔志丹,冯建国,焦立新,等.松花湖表层沉积物中PAHs及PAEs污染特征[J].*环境科学研究*,2019,**32**(9):1531-1539.  
Cui Z D, Feng J G, Jiao L X, *et al.* Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons and phthalate esters in surface sediments of in Songhua Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(9):1531-1539.
- [10] 中华人民共和国生态环境部.中国生态环境状况公报[EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/>,2019-05-29.
- [11] Wang X, Bai S Y, Lu X G, *et al.* Ecological risk assessment of eutrophication in Songhua Lake, China[J]. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 2008, **22**(4):477-486.
- [12] Beusen A H W, Bouwman A F, Van Beek L P H, *et al.* Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, **12**(23):20123-20148.
- [13] 徐华山,赵磊,孙昊苏,等.南水北调中线北京段水质状况分析[J].*环境科学*,2017,**38**(4):1357-1365.  
Xu H S, Zhao L, Sun H S, *et al.* Water quality analysis of Beijing segment of South-to-North water diversion middle route project[J]. *Environmental Science*, 2017,**38**(4):1357-1365.
- [14] Yuan Y X, Jiang M, Liu X T, *et al.* Environmental variables influencing phytoplankton communities in hydrologically connected aquatic habitats in the Lake Xingkai basin [J]. *Ecological Indicators*, 2018, **91**:1-12.
- [15] 张勇,郭纯青,朱彦光,等.云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析[J].*环境科学*, 2019, **40**(6): 2686-2695.  
Zhang Y, Guo C Q, Zhu Y G, *et al.* Chemical characteristics of groundwater and material sources analysis in buckwheat field, Yunnan province[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6):2686-2695.
- [16] Li Y L, Zhang Q, Cai Y J, *et al.* Hydrodynamic investigation of surface hydrological connectivity and its effects on the water quality of seasonal lakes: insights from a complex floodplain setting (Poyang Lake, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**:245-259.
- [17] 张柳青,石玉,李元鹏,等.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[J].*环境科学*,2020,**41**(5):2149-2157.  
Zhang L Q, Shi Y, Li Y P, *et al.* Bioavailability characteristics of chromophoric dissolved organic matter in Lake Gaoyou, Lake Nansi, and Lake Dongping under different hydrological scenarios [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(5):2149-2157.
- [18] 湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定[Z].中国环境监测总站:北京,2001.
- [19] Liu D, Du Y X, Yu S J, *et al.* Human activities determine quantity and composition of dissolved organic matter in lakes along the Yangtze River [J]. *Water Research*, 2020, **168**, doi: 10.1016/j.watres.2019.115132.
- [20] Qin H T, Huang Q H, Zhang Z W, *et al.* Carbon dioxide emission driving factors analysis and policy implications of Chinese cities: Combining geographically weighted regression with two-step cluster[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **684**:413-424.

- [21] 沈中健,曾坚.厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究[J].地理科学,2020,40(5):842-852.  
Shen Z J, Zeng J. Spatial relationship of heat island intensity to correlated land surface factors in Xiamen city[J].ScientiaGeographicaSinica, 2020, 40(5): 842-852.
- [22] 汪希成,谢冬梅.我国农村居民食物消费结构的合理性与空间差异[J].财经科学,2020,384(3):120-132.  
Wang X C, Xie D M.The rationality and temporal differences of food consumption structure of rural residents in China [J]. Finance & Economics, 2020, 384(3):120-132.
- [23] 陈云飞,周金龙,曾妍妍,等.塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征[J].环境科学,2020, 41(1):438-448.  
Chen Y F, Zhou J L, Zeng Y Y, *et al.* Spatial distribution of soil arsenic and arsenic enrichment in crops in the oasis region of the southeastern Tarim basin [J]. Environmental Science, 2020, 41(1):438-448.
- [24] 周天墨,付强,诸云强,等.空间自相关方法及其在环境污染领域的应用分析[J].测绘通报,2013,(1):53-56.  
Zhou T M, Fu Q, Zhu Y Q, *et al.* Research on the application of spatial autocorrelation method in environmental pollution [J].Bulletin of Surveying and Mapping, 2013, (1):53-56.
- [25] Li L, Liu X M, Ge J J, *et al.*Regional differences in spatial spillover and hysteresis effects: Atheoretical and empirical study of environmental regulations onhaze pollution in China [J].Journal of Cleaner Production, 2019, 230:1096-1110.
- [26] 汪花,刘秀明,刘方,等.喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价[J].环境科学,2019,40(6):2895-2903.  
Wang H, Liu X M, Liu F, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of as at a small scale in agricultural soils of the karst region[J]. Environmental Science, 2019, 40(6):2895-2903.
- [27] Zhang C S, Luo L, Xu W L, *et al.*Use of local Moran's I and GIS to identify pollution hotspots ofPb in urban soils of Galway, Ireland [J]. Science of the Total Environment, 2008, 398:212-221.
- [28] Wang J L, Fu Z S, Qiao H X, *et al.* Assessment of eutrophication and water quality in the estuarine area of Lake Wuli, Lake Taihu, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 650(1):1392-1402.
- [29] Hao L B, Sun L J, Zhao Y Y, *et al.* Sedimentary records of evolution of heavy metals in Songhua Lake, Northeast China [J]. CLEAN - Soil, Air, Water, 2013, 41(10):1010-1017.
- [30] 吴计生,吕军,刘洪超,等.松花湖生态健康评估[J].中国水土保持,2019,(9):65-69.  
Wu J S, Lyu J, Liu H C, *et al.* Evaluation on ecosystem health of Songhua Lake[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019,(9):65-69.
- [31] GB3838-2002地表水环境质量标准[S].  
GB3838-2002 Environmental quality standards for surface water [S].
- [32] 张涛,陈求稳,易齐涛,等.太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J].湖泊科学,2017,29(6):1300-1311.  
Zhang T, Chen Q W, Yi Q T, *et al.*Spatial and seasonal variations of water quality in the upstream plain river networks of the Taihu basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(6):1300-1311.
- [33] 孟利,左锐,王金生,等.基于PCA-APCS-MLR的地下水污染源定量解析研究[J].中国环境科学,2017,37(10):3773-3786.  
Meng L, Zuo R, Wang J S, *et al.* Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR [J]. China Environmental Science, 2017,37(10):3773-3786.
- [34] 金相灿. 中国湖泊环境[M]. 北京:海洋出版社, 1995.  
Jin X C. China lake nvironment [M]. Beijing: Ocean Press, 1995.
- [35] Yang X E, Wu X, Hao H L, *et al.* Mechanisms and assessment of water eutrophication [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE B, 2008, 9:197-209.
- [36] 辛胜林,梁月明,彭文杰,等.亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系[J].环境科学,2018,39(12):5647-5656.  
Xin S L, Liang Y M, Peng W J, *et al.* Relationship between the bacterial abundance and production with environmental factors in a Subtropical Karst reservoir[J]. Environmental Science, 2018, 39(12):5647-5656.
- [37] 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.

- [38] 耿郁,刘富裕.蛟河市城区水资源状况浅析[J].吉林水利,2010,(10):12-14.  
Geng Y, Liu F Y. Analysis of water resources situation in JiaoheCity [J]. Jilin Water Resources, 2010, (10):12-14.
- [39] 高化雨,韩会玲,张晶,等.基于生态脆弱性评价的松花湖湖滨带功能区划研究[J].水生态学杂志,2019,**40**(6):1-7.  
Gao H Y, Han H L, Zhang J. Lakeside function regionalization of SonghuahuLake based on ecological vulnerability evaluation [J].Journal of Hydroecology, 2019,**40**(6):1-7.
- [40] 孙立新. 松花湖流域水土侵蚀和水体富营养化综合防治研究[D].吉林: 吉林大学,2012. 24-26.  
Sun L X. Integrated control of study on the soil erosion and eutrophication inthe Songhua Lake basin [D]. Jilin: Jilin University, 2012. 24-26.
- [41] 胡建,刘茂松,周文,等.太湖流域水质状况与土地利用格局的相关性[J].生态学杂志,2011,**30**(6):1190-1197.  
Hu J, Liu M S, Zhou W, *et al.* Correlations between water quality and land use pattern in TaihuLake basin [J]. Chinese Journal of Ecology, 2011,**30**(6):1190-1197.
- [42] 汤洁,孙立新,边境,等.松花湖富营养化评价及防治措施[J].中国水利,2010,(19):40-42.  
Tang J, Sun L X, Bian J, *et al.*Eutrophication evaluation and prevention measures of Songhua Lake [J]. China Water Resources, 2010,(19):40-42.

