

## 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律

项颂, 万玲, 庞燕

引用本文:

项颂, 万玲, 庞燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160-170.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0904>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 土地利用变化与社会经济因素对湖南典型水库水质变化的影响

杨泽栋, 秦治恒, 白中科, 郝易成

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2270-2277 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1754>

### 基于GIS的红枫湖流域土地利用变化与水质响应

姜畅, 刘鸿雁, 陈竹, 饶程, 李政道, 杨通铨, 吴攀

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1232-1239 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1598>

### 封闭型内陆湖泊夏季氮素赋存特征——以达里诺尔湖为例

杨旭, 李畅游, 李文宝, 史小红, 赵胜男, 王旭阳

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2262-2269 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0004>

### 降雨和施肥对秦岭北麓俞家河水质的影响

郭泽慧, 刘洋, 黄懿梅, 晏江涛, 腾飞, 王永斌

农业环境科学学报. 2017, 36(1): 158-166 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0893>

### 基于多元统计分析方法的西苕溪流域水质时空变化研究

王刚, 李兆富, 万荣荣, 李恒鹏

农业环境科学学报. 2015(9): 1797-1803 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.09.024>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

项 颂, 万 玲, 庞 燕. 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(1): 160–170.

XIANG Song, WAN Ling, PANG Yan. Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(1): 160–170.

# 土地利用驱动下洱海流域入湖河流水质时空分布规律

项 颂<sup>1,2</sup>, 万 玲<sup>1,3</sup>, 庞 燕<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国环境科学研究院湖泊环境研究所, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012; 3. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

**摘 要:**为更好地保护湖泊流域水环境,以洱海流域三大主要入湖水系为研究对象,采用空间分析、统计分析与模型相结合的方法,对2014年入湖河流水质对洱海水质的影响及土地利用驱动下的水质变化特征进行分析。结果显示:2014年三大主要入湖水系COD、TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N均超过Ⅱ类水功能要求,TN、TP是主要污染因子;入湖河流水质存在时空差异,整体水质雨季较差,氮磷重污染区域为波罗江水系,苍山十八溪水系次之,北三江水系氮磷浓度相对低,但季节性差异显著。入湖河流与湖泊水质时空关联密切,雨季两者关联更强;空间上除TN外,入湖河流与湖泊污染分布规律基本一致。全流域尺度下COD与植被面积百分比呈显著负相关( $P<0.05$ );TN、TP与建设用地面积百分比极显著正相关( $P<0.01$ ),与其他用地面积百分比呈显著负相关( $P<0.05$ )。而由于三大入湖水系COD、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N存在显著的空间异质性,采用地理加权回归模型进一步分析发现,COD与植被面积百分比、TP与建设用地面积百分比的回归关系随着空间位置变化有较大差异,前者相关关系由正相关转为负相关,拟合程度由南向北递增,后者在整个流域均呈正相关,拟合程度在西部苍山十八溪水系和北部入湖区域较高。因此建议流域污染治理应以雨季面源污染控制为主,重点加强波罗江水系面源污染综合治理,以及苍山十八溪水系城镇地表径流管控,同时应优化北三江植被等生态用地对径流的截蓄净化功能。

**关键词:**入湖河流;时空变化;空间自相关;地理加权回归

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)01-0160-11 doi:10.11654/jaes.2019-0904

## Spatial-temporal variation of inflow river water quality under land use effect

XIANG Song<sup>1,2</sup>, WAN Ling<sup>1,3</sup>, PANG Yan<sup>1,2\*</sup>

(1. Research Center of Lake Environments, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** This study analyzes the water quality variation of inflow rivers directly affecting lake. Focusing on the three major river systems of the Lake Erhai basin, the effects of inflow rivers on the water quality of Erhai Lake and its change trend under land-use changes in 2014 were studied with spatial analysis method, statistical analysis method and model. Results indicated that the chemical-oxygen demand (COD), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and ammonia nitrogen of inflow rivers in 2014 exceeded class II levels; the main pollutants were the TN and TP. Water quality indexes of inflow rivers showed significantly spatial-temporal variation among the three river systems. The overall river quality was poorer in the rainy season than in the dry season. The contamination of the TN and TP in the Boluojiang river system was the most serious, followed by the Cangshanshibaxi river system. In spite of the low concentrations of TN and TP, significant temporal variation occurred in the Beisanjiang river system. The spatiotemporal association of the river quality between the river and

收稿日期:2019-08-16 录用日期:2019-11-04

作者简介:项 颂(1988—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,工程师,从事水污染治理与生态修复研究。E-mail:xs624834175@126.com

\*通信作者:庞 燕 E-mail:190068749@qq.com

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07301006-006)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (2017ZX07301006-006)

Erhai Lake was significant, especially in the rainy season. The pollutant concentration, excluding TN, in Erhai Lake was higher in the areas with the most polluted inflow rivers. The COD and vegetation area percentage had a significant negative correlation ( $P < 0.05$ ). Furthermore, the river TN and TP had significant positive correlations with the construction land area percentage ( $P < 0.01$ ) as well as a significant negative correlation with other land use in the basin scale ( $P < 0.05$ ). COD, TP and ammonia nitrogen of inflow rivers showed significant spatial autocorrelation. A geographical weighted regression (GWR) model showed that there were significant spatial variations in the regression relationship between the vegetation area proportion and COD. This changed to a negative relationship and the fitting degree increased from the south to the north. The regression relationship of the area proportion of construction land and TP also showed a spatial difference but remained positive throughout the entire basin. The highest fitting degree of the two occurred in the west Cangshanshibaxi basin and north inflowing area. Suggestions regarding pollution regulation in Erhai Lake basin were made to focus on nonpoint pollution control in the rainy season, strengthen the comprehensive treatment of nonpoint pollution in the Boluojiang river system, and control the construction land surface flow in the Cangshanshibaxi river system. Furthermore, more attention should be paid to optimize the ecological land functions of interception and purification on runoff in the Beisanjiang river system.

**Keywords:** inflow river; temporal and spatial change; spatial autocorrelation; geographically weighted regression

湖泊及其流域是人类赖以生存的重要场所,对人类生存和发展意义重大。而入湖河流是湖泊主要水资源的补给通道,也是绝大部分污染物入湖的主要输移通道,其水质水量变化直接影响湖泊水质,因此科学掌握入湖河流水质时空变化特征对于湖泊水质保护和改善至关重要<sup>[1-3]</sup>。

河流水质受地形、地质、气候、植被等自然因素,以及人类生产、生活等人为因素多层次和多尺度的综合影响,呈现出复杂的时空变化特征<sup>[4-5]</sup>。目前国际上已对许多大江大河开展研究,如欧洲的莱茵河、多瑙河<sup>[6-7]</sup>,北美的密西西比河<sup>[8]</sup>,非洲的尼罗河<sup>[9]</sup>,印度的恒河<sup>[10]</sup>,以及中国的长江、黄河、雅鲁藏布江<sup>[10-12]</sup>等。主要研究内容及方法集中在以下方面:河流水质评价,主要方法有单因子指数、综合因子指数、综合水质标识指数等<sup>[5,13]</sup>;水质时空变化特征及污染来源分析,自然及人为因素对河流水质变化的影响研究,以及河湖水质关联分析等<sup>[2,4,14-15]</sup>,研究手段除了常规的数理统计方法,如相关分析、主成分分析、最小二乘法、数理模型等<sup>[16-17]</sup>,还引入遥感(RS)、地理信息系统(GIS)等空间分析工具<sup>[3,18]</sup>;入湖污染通量计算,主要方法有系数法、同位素示踪法、模型模拟等<sup>[19]</sup>。已有的研究成果为河流管理决策提供了有效的科学支撑,但对于水质空间变化特征分析,以往的研究多未明确考虑水质的空间自相关性,而实际上相邻河流或同一河流上游或下游的水质通常呈现类似的趋势,忽略空间依赖产生的潜在偏差会降低研究结果的可靠性<sup>[16,18]</sup>。此外,在探索水质和影响因素的关系时,仍以普通最小二乘法(OLS)为代表的传统数理统计手段为主,这种方法假定回归参数在整个研究区具有一致性,但实际

空间要素对水质的影响随空间位置不同而异,这种关系的空间非平稳性用传统统计方法难以处理<sup>[20-21]</sup>。

洱海作为云南省第二大高原淡水湖泊,是大理的生命源泉,供给大理80万人的饮用水。多年来洱海保护治理一直受到国家及地方各级部门的高度重视,因此,洱海成为我国城市近郊保护得最好的湖泊之一。然而,洱海的富营养化发展趋势尚未得到遏制,2013年9、10月洱海两次出现蓝藻大面积聚集,对周边几十万居民的饮用水安全构成极大威胁,引起当地政府的高度重视<sup>[22-23]</sup>。“治湖先治水,治水先治河”,洱海流域水系发达,大小入湖河溪众多,已有研究发现,入湖河流氮磷年入湖通量分别占洱海外源污染负荷的67.69%和67.32%<sup>[24-25]</sup>。基于此,本研究利用2014年的实地调研数据,将数理统计的定量化与空间分析的可视化有机结合,分析洱海流域入湖河流水质时空变异特征及与洱海水质的联系;并针对区域社会经济快速发展状况,充分考虑数据的空间异质性问题,开展人类活动下土地利用对入湖河流水质的影响分析,弥补了前期研究中忽视空间数据局部变化特征这一缺陷,更深入评估了流域不同位置土地利用对地表水质的影响,对洱海流域的区域生态安全与水环境管理具有重要的科学价值和现实意义。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

洱海流域(99°32'~100°27'E、25°25'~26°16'N)位于云南省大理白族自治州,属澜沧江-湄公河水系,流域面积2565 km<sup>2</sup>,湖泊面积251 km<sup>2</sup>。流域气候属典型的高原大陆性气候,干湿季分明,5—10月为

雨季,11月一次年4月为非雨季,多年年均温度和降雨量分别为15.1℃和1048mm。洱海流域水系发达,入湖河溪大小共计117条:北部主要由弥苴河、罗时江、永安江构成“北三江”水系,北三江水系入湖水量大,多年年均径流量占洱海入湖河流年总径流量的48.9%,但由于河流流程长,沿途农田区分布广,雨季经入湖河流携带入洱海的氮磷负荷高;西部主要由18条垂直于洱海的山溪型河流构成“苍山十八溪”水系,沿线均途经密集村庄,河流流程短、水量相对小,占洱海多年平均径流量的23%,是洱海清水补给的重要水源地;南部主要由波罗江及其支流白塔河构成“波罗江”水系,流经区域处在城镇化快速转型期,传统农田种植、畜禽养殖等农业面源污染向城市面源污染快速转变,入湖水量占洱海总入湖径流量的7.4%;这三大主要水系是洱海清水补给的主要入湖通道,其水质水量变化直接影响着洱海水质<sup>[26]</sup>。

## 1.2 基础数据

### 1.2.1 水质数据

水质数据为2014年洱海三大主要水系入湖河流86个监测点的数据,以及洱海11个监测点的数据(图1),来源于大理州环境监测站、大理州洱海湖泊研究中心、洱源县环境监测站,以及中国环境科学研究院洱海研究基地自行采样监测(表1)。样品采集及分析测试方法参照国家标准<sup>[27]</sup>,根据入湖河流历史水质状况及对洱海水质的影响,选取化学需氧量(Chemical oxygen demand, COD)、总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorous, TP)、氨氮(Ammonia nitrogen,  $\text{NH}_4\text{-N}$ )4个代表性水质指标进行分析。根据《中共大理州委、大理州人民政府2014年洱海流域保护治理工作意见》(大发[2014]1号),洱海主要入湖河流水功能类别为Ⅱ类,入湖TN、TP采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中湖库标准进行评价。

### 1.2.2 土地利用数据

土地利用分类图来自于先前的研究工作<sup>[26,28]</sup>,主要基于2012年春季资源一号02C卫星拍摄的高精度卫片,经非监督分类法进行土地利用分类,参照《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2007),将土地利用主要分为建设用地(JS)、农业用地(NY)、植被(ZB)、水体(ST)、其他用地(QT)5类。其中植被包括林地和牧草地;其他用地包括特殊用地、自然保留地和风景名胜设施用地。

### 1.3 河流水质时空变异性分析方法

首先,基于SPSS 19,在0.05的显著性水平下进行

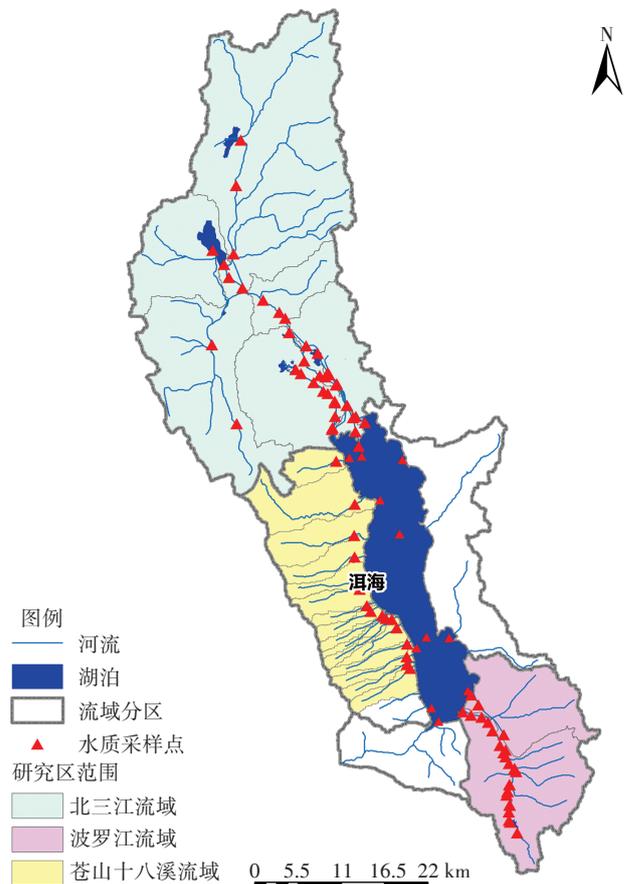


图1 研究区概况

Figure 1 Map of the study area

表1 数据来源

Table 1 The source of data

区域 Subbasins	数据来源 Data sources	采样点数 Sampling number/个	监测频次 Monitoring frequency
北三江水系	洱源县环境监测站、大理州环境监测站	18	每月1次
北三江水系	洱海基地自行监测	22	每季度1次
苍山十八溪水系	大理州洱海湖泊研究中心	16	每月1次
波罗江水系	洱海基地自行监测	30	每月1次
洱海湖体	大理州环境监测站	11	每月1次

水质和土地利用数据的K-S(Kolmogorov-Smirnov)正态性检验,然后采用Kruskal-Wallis非参数检验、空间自相关分析等进行水质的时空变异性分析。

由于文中数据分布的非正态性,故采用Kruskal-Wallis非参数检验分析入湖河流水质的季节性差异。

### 1.4 河湖水质关联分析方法

采用灰色关联分析法<sup>[29]</sup>对洱海流域入湖河流与湖泊的水质进行关联分析,关联系数计算公式如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (1)$$

式中:  $|x_0(k) - x_i(k)|$  为第  $k$  项  $x_0$  与  $x_i$  的绝对差;  $\rho$  为分辨系数, 其值在 0~1 之间,  $\rho$  越小, 关联系数间差异越大, 区分能力越强, 通常取 0.5。

### 1.5 河流水质空间异质性分析方法

基于 Arcgis10.4 平台, 以中国科学院数据云免费提供的 30 m DEM 数据为基础, 进行流域划分。空间自相关分析是指同一个变量在不同空间位置上的相关分析, 空间自相关指标能反映水环境中污染物的分布状况和各地区所含污染物情况的相关关系。本文通过空间自相关分析<sup>[16,18]</sup>, 确定水质参数是否在不同流域空间上相关, 相关程度如何, 相关程度利用全局 Moran's I 来反映, 其计算公式如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (2)$$

式中:  $n$  为所研究的空间区域数;  $X_i$  和  $X_j$  分别为  $i$  区域和  $j$  区域内的水质, 为整个研究区的水质均值;  $W_{ij}$  为空间权重矩阵。Moran's I 介于 -1 至 1 之间, 绝对值越接近 1, 空间自相关性越强; 取值为正, 表示  $X_i$  和  $X_j$  是同向变化, 数据呈正相关; 取值为负, 表示  $X_i$  和  $X_j$  是反向变化, 数据呈负相关; 取值为 0, 则数据呈随机分布, 不具有自相关性。

### 1.6 土地利用对河流水质影响的分析方法

采用 Spearman 秩相关分析进行土地利用和水质关系的初步关联分析, 并结合空间自相关分析的结果, 建立土地利用与水质的局部关联。

#### 1.6.1 Spearman 秩相关分析

Spearman 秩相关分析是一种运用非参数度量两个变量之间的统计相关性的统计方法。鉴于本文中研究数据分布的非正态性, 应用 Spearman 秩相关分析探究土地利用与水质的关联。

#### 1.6.2 地理加权回归分析

根据空间自相关分析结果, 发现水质参数具有极显著的空间自相关性, 因此引入已在其他领域被广泛使用的基于非参数建模思想的地理加权回归模型 (GWR), 以研究空间非平稳前提下的土地利用分布对水质的影响。地理加权回归对传统回归模型进行了扩展, 将数据的空间位置嵌入到回归参数之中, 以

探索自变量与因变量在空间范围内的变化关系, 有效解决了空间非平稳性问题, 减少变量残差 ( $\gamma_j$ ) 的空间自相关<sup>[20-21]</sup>。

$$\gamma_j = \beta_0(u_j, v_j) + \sum_{i=1}^p \beta_i(u_j, v_j) x_{ij} + \varepsilon_j \quad (3)$$

式中:  $(u_j, v_j)$  为第  $j$  个采样点的坐标;  $\beta_i(u_j, v_j)$  为自变量  $x_i$  在  $j$  点处的局部回归系数;  $\beta_0(u_j, v_j)$  及  $\varepsilon_j$  分别为模型在  $j$  点处的回归常数和误差项。

## 2 结果与分析

### 2.1 洱海入湖河流水质时空变化分析

#### 2.1.1 洱海流域入湖河流水质时空分布

洱海流域三大水系入湖河流水质的月均变化如图 2 所示。COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度分别为 4.51~27.69、1.10~4.81、0.049~0.357、0.17~1.34  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , COD 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  月均值处于 III 类水平, TN 和 TP 月均值分别达到劣 V 类和 V 类水平, 4 项指标均超 II 类水质保护目标, 其中 TN、TP 是主要污染指标。

#### 2.1.2 洱海流域入湖河流水质空间变异性分析

入湖河流水质空间变异性的非参数检验结果如表 2 所示。结果显示洱海三大入湖水系 COD、TN、TP、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的检验  $P$  值均小于 0.05, 其中波罗江水系 4 个指标的平均秩均最高, 苍山十八溪氮磷指标的平均秩仅次于波罗江, 也较高, 而北三江氮磷指标的平均秩最低, 但 COD 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的平均秩较高, 说明洱海入湖河流水质空间差异显著, 波罗江水质最差, 有机物和氮磷污染均较重, 苍山十八溪以氮磷污染为主, 北三江以 COD 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  污染为主。

#### 2.1.3 洱海流域入湖河流水质季节差异性分析

水质指标季节性差异检验结果 (表 3) 显示, 除苍山十八溪 COD、北三江 TN 外, 三大水系各指标的平均秩均在雨季高于旱季, 说明雨季入湖河流水质较早季差。此外, COD 在三大水系中均存在显著季节差异 ( $P < 0.05$ ), TN、TP 在北三江水系存在显著季节差异 ( $P < 0.05$ ), 说明波罗江和北三江入湖河流 COD 在雨

表 2 水质指标空间差异性检验

Table 2 Spatial difference tests of water quality index

水系 Subbasins	COD	TN	TP	$\text{NH}_4^+-\text{N}$
波罗江	451.50	432.20	463.41	475.43
北三江	381.57	339.51	268.65	321.24
苍山十八溪	260.26	379.49	420.31	303.79
卡方	82.69	25.96	117.93	99.89
$P$	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05

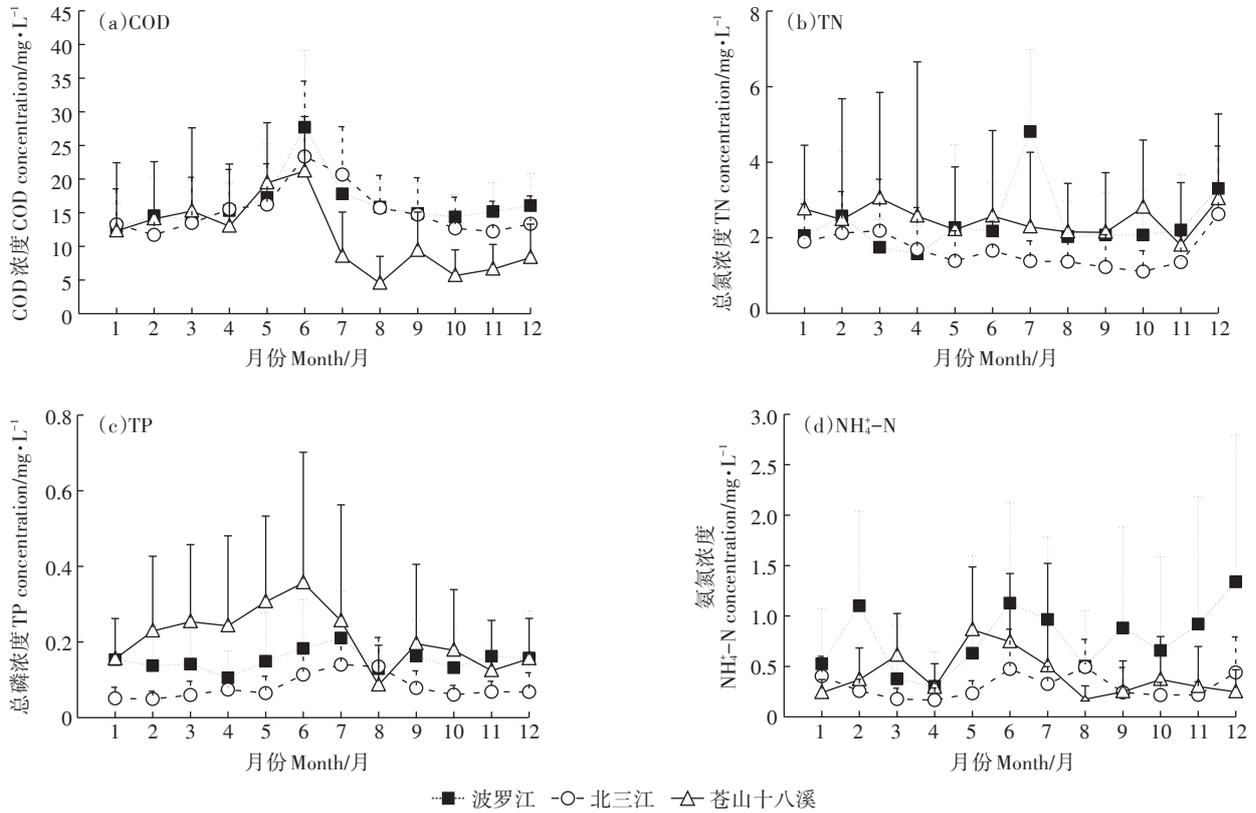


图2 洱海入湖河流水质变化

Figure 2 Variation of inflow rivers water quality in Lake Erhai basin

季浓度明显升高,苍山十八溪在旱季浓度明显升高,而北三江 TN、TP 分别在旱季和雨季明显变差。

## 2.2 洱海入湖河流与湖泊水质的关联分析

### 2.2.1 河湖水质月均关联分析

洱海入湖河流与湖泊水质的月均关联如图3所示,总体而言,5—10月雨季入湖河流与湖泊的水质关联更强。两者 COD 关联系数最大值出现在6月,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  在12月和6月关联系数较高, TN 在7月关联系数出现最大值, TP 在6月和7月关联系数较高,可见6月和7月入湖河流水质的变化对洱海水质影响最强。

### 2.2.2 河湖水质空间关联分析

洱海入湖河流与洱海水质的空间分布如图4所

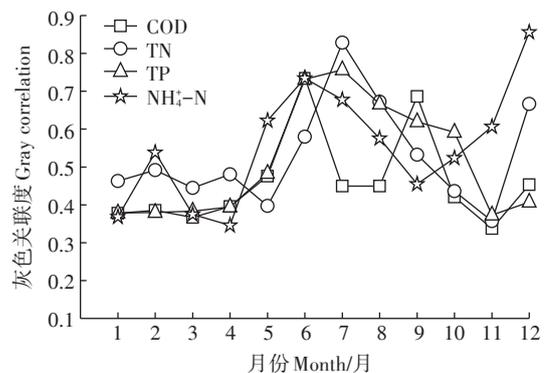


图3 入湖河流与湖泊水质的关联度

Figure 3 The correlation of water quality between inflow rivers and Erhai Lake

表3 水质指标季节差异性检验

Table 3 Seasonal difference tests of water quality index

季节 Season	COD			TN			TP			$\text{NH}_4^+-\text{N}$		
	波罗江	北三江	苍山十八溪	波罗江	北三江	苍山十八溪	波罗江	北三江	苍山十八溪	波罗江	北三江	苍山十八溪
旱季	156.41	107.64	91.14	172.84	159.22	81.28	165.18	111.05	80.80	163.97	131.66	82.26
雨季	189.20	150.86	74.23	175.85	106.57	86.19	182.08	153.31	86.77	183.05	132.33	85.01
卡方	9.15	21.55	5.09	0.08	31.37	0.43	2.43	20.38	0.64	3.10	0.01	0.13
P	<0.05	<0.05	0.02	0.78	<0.05	0.51	0.12	<0.05	0.43	0.08	0.94	0.71

表4 水质指标与土地利用的Spearman相关分析

Table 4 Spearman correlations between water quality and land use

变量 Variables	建设用地(JS) Construction land	农业用地(NY) Agricultural land	植被(ZB) Vegetative cover	水体(ST) Water	其他用地(QT) Other land
COD	0.100	0.279	-0.469*	-0.018	0.161
TN	0.532**	0.134	-0.219	0.130	-0.422*
TP	0.568**	0.335	-0.357	0.096	-0.457*
NH <sub>4</sub> -N	0.272	0.303	-0.373	-0.078	-0.186

注:\*和\*\*分别表示水质指标和土地利用的相关性呈显著( $P<0.05$ )和极显著( $P<0.01$ )相关。

Note: The symbols of \* and \*\* represent significant correlations between water quality and land use at  $P<0.05$  and  $P<0.01$  levels, respectively.

示。COD在入湖河流及湖内的分布均表现为南部最高,北部其次,湖心及周边区域较低;TN在湖内的分布为湖心及西北区域较高,湖体南北区域较低,而入湖河流TN空间分布则与之相反,在海西偏北的区域较低,南北入湖区域均较高;TP在入湖河流及湖内的分布也基本一致,均表现为南部区域较高,北部及湖心区域较低;NH<sub>4</sub>-N在湖内南北区域均较高,湖心偏北区域较低,除北部外的其他区域,入湖河流NH<sub>4</sub>-N浓度高时对应的湖内浓度也较高。可见,除TN外入湖河流与湖体污染物空间分布规律基本一致,说明洱海入湖河流水质对洱海水质影响很大,入湖河流治理是洱海富营养化治理的关键问题之一。

### 2.3 流域土地利用分布对入湖河流水质的影响

#### 2.3.1 水质与土地利用相关分析

入湖河流水质与流域尺度下土地利用的Spearman相关性分析结果(表4)显示,与水质指标有显著相关性的地类为建设用地、植被和其他用地。建设用地面积百分比与各水质指标均呈正相关,且与TN、TP呈极显著正相关( $P<0.01$ );植被面积百分比与各水质指标均呈负相关,且与COD呈显著负相关( $P<0.05$ );其他用地面积百分比与TN、TP呈显著负相关( $P<0.05$ )。

#### 2.3.2 空间异质性下水质与土地利用关联分析

##### (1)空间异质性检验

根据公式(2)计算得出,2014年洱海流域主要入湖河流COD、TN、TP、NH<sub>4</sub>-N的全局Moran's I指数分别为0.24、0.01、0.11、0.10(表5),其中COD、TP、NH<sub>4</sub>-N 3个指标的正态统计量Z值均大于正态函数在0.01显著性水平下的临界值2.58,表明2014年洱海主要入湖河流COD、TP、NH<sub>4</sub>-N存在正的空间自相关,呈聚集性分布。鉴于入湖河流COD、TP、NH<sub>4</sub>-N 3个指标的显著空间自相关性,有必要运用地理加权回归模型(GWR)在空间非平稳前提下对入湖河流水质的影响

因素进行分析。

##### (2)地理加权回归分析

根据土地利用和水质的初步相关分析,以及水质指标的空间自相关情况,选取呈显著相关的COD与植被(ZB)、TP与建设用地(JS)构建两组模型,对研究区不同区域土地利用和水质的关系进行分析,模型的拟合参数见图5和图6。

图5显示,植被对COD的影响并非如Spearman结果所示完全负相关,而是显示出明显的局部特征。从回归系数的方向分析,植被与COD的关系在南部波罗江水系由正相关逐渐变为负相关,此后在其他区域均表现为负相关;从回归系数的大小分析,两者回归系数由南向北递增,同时两者的拟合关系也呈现与回归系数基本一致的变化规律,说明植被对COD的影响随着空间位置变化有较大差异,主要表现为由南向北影响加剧,其中在北三江水系植被对入湖河流COD改善效果最强,而在入湖河流COD污染较重的南部波罗江水系,植被对水质的影响最弱。

图6显示,建设用地对TP的影响与Spearman结果在方向上一致,呈正相关,但局部也存在一定差异。两者回归系数在西部苍山十八溪水系较高,南部波罗江水系次之,北部北三江水系较低,两者拟合度也在西部及北部入湖区域较强,说明建设用地对TP的负面影响主要集中在西部苍山十八溪流域和北部入湖部分,而在TP污染较轻的北三江水系源头区,以及波罗江水系源头区两者作用相对较弱。

表5 洱海入湖河流水质全局Moran's I

Table 5 Moran's I value of inflow rivers water quality in Lake

Erhai basin				
项目 Items	COD	TN	TP	NH <sub>4</sub> -N
Moran's I	0.24	0.01	0.11	0.10
Z	10.76	0.89	5.38	6.31
P	<0.05	0.37	<0.05	<0.05

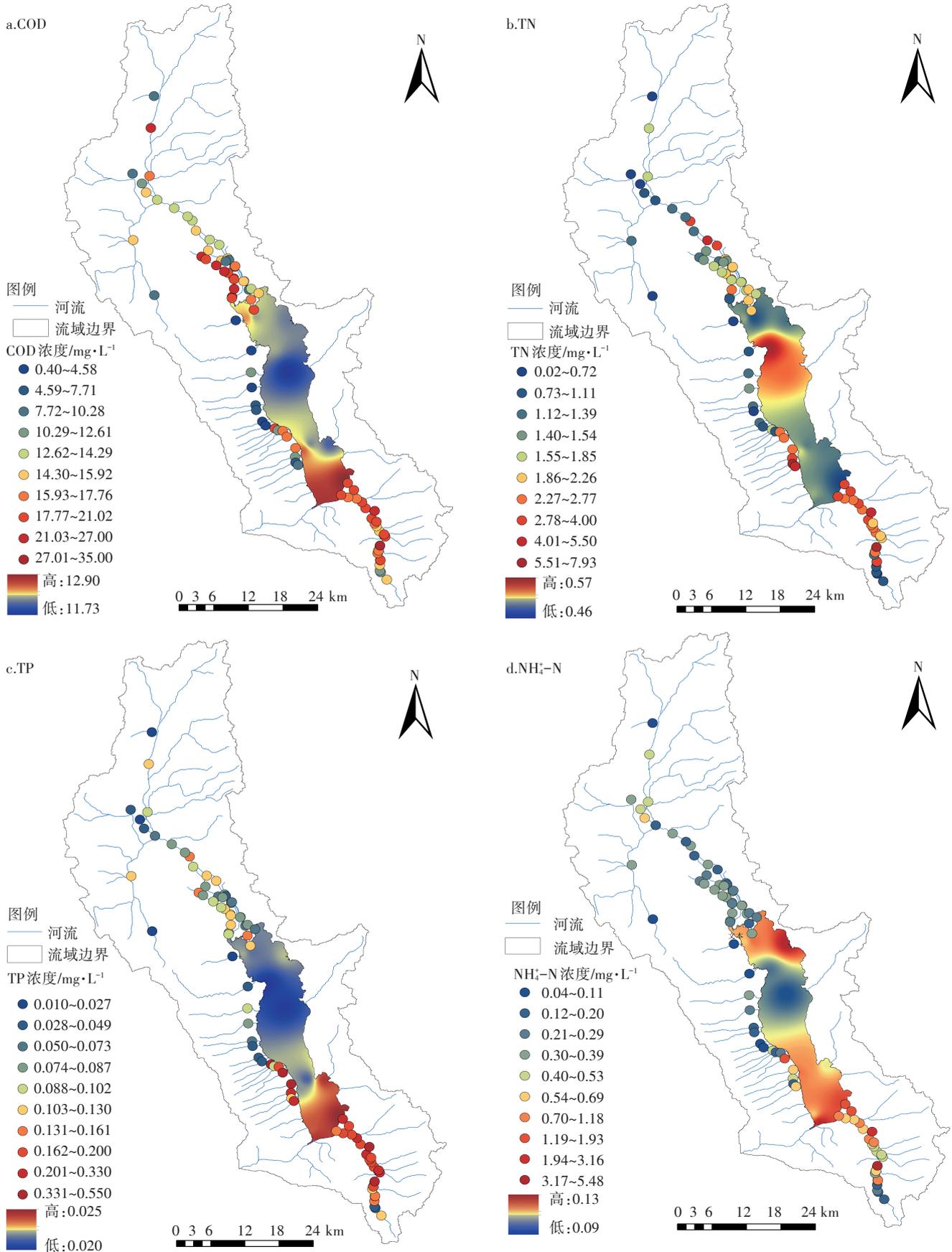


图4 入湖河流与湖泊水质指标的空间分布

Figure 4 Spatial variation of water quality indexes between inflow rivers and the Lake Erhai

### 3 讨论

#### 3.1 洱海入湖河流污染特征

2014年洱海入湖河流水质均超标,氮磷是主要污染因子。水质时空差异显著,雨季整体水质较差,重污染区域为波罗江水系,其次为苍山十八溪水系。这与课题组先前的研究一致,先前对洱海10个主要小流域雨季和非雨季入湖河流水质分析已经发现,TN、TP分别在非雨季、雨季出现最大值,且TP是洱海西部区域入湖河流的主要污染指标,有机物和氮是洱海北部和南部区域的主要污染指标<sup>[28]</sup>;此外与金春玲等<sup>[30]</sup>、梁启斌等<sup>[31]</sup>和羊华等<sup>[25]</sup>的研究结论也相似。

水质指标的季节性变化特征反映其污染来源,2014年入湖河流雨季整体水质较差,可能是由于雨季降雨量增大,更多的污染物随之冲刷进入河道,使污染加重<sup>[15,26]</sup>。就区域污染特征而言,波罗江和苍山十八溪雨季氮磷浓度高,说明两个区域的雨季面源污染是控制关键,其中波罗江处在城镇化快速转型期,污染源由传统农业面源污染向城镇面源污染快速转

变,污染来源相对复杂、多变,雨季降雨冲刷地表导致入河污染增多;苍山十八溪水系的面源污染可能是由于其位于人口最密集的区域,人类生产生活产生的污水多,另外高强度人类活动下区域土地开发建设面积较大,不透水地表增加,从而导致污染发生的风险加大<sup>[13,20,22]</sup>。而北三江水系入湖河流氮磷污染虽相对轻,但两者浓度季节性差异显著,呈现出旱季氮污染较重、雨季磷污染较重的特点,加之北三江入湖水量大<sup>[25]</sup>,因此北三江仍需谨防雨季面源污染造成入湖河流磷浓度升高。

#### 3.2 入湖河流与湖泊水质的关联

研究发现雨季入湖河流与湖泊的水质关联更强,TN在7月河湖关联系数出现最大值,TP在6月和7月河湖关联系数较高;除TN外,入湖河流与湖泊水质表现出了很好的相关性,入湖河流污染重的区域对应的湖体污染物浓度也偏高。这与以往的研究结论类似:羊华等<sup>[25]</sup>的研究发现,入湖河溪磷负荷与洱海水体富营养化程度呈强相关性,尤其是汛期,随着入湖水量增多,洱海水体富营养化程度急剧加重;查慧铭等<sup>[4]</sup>

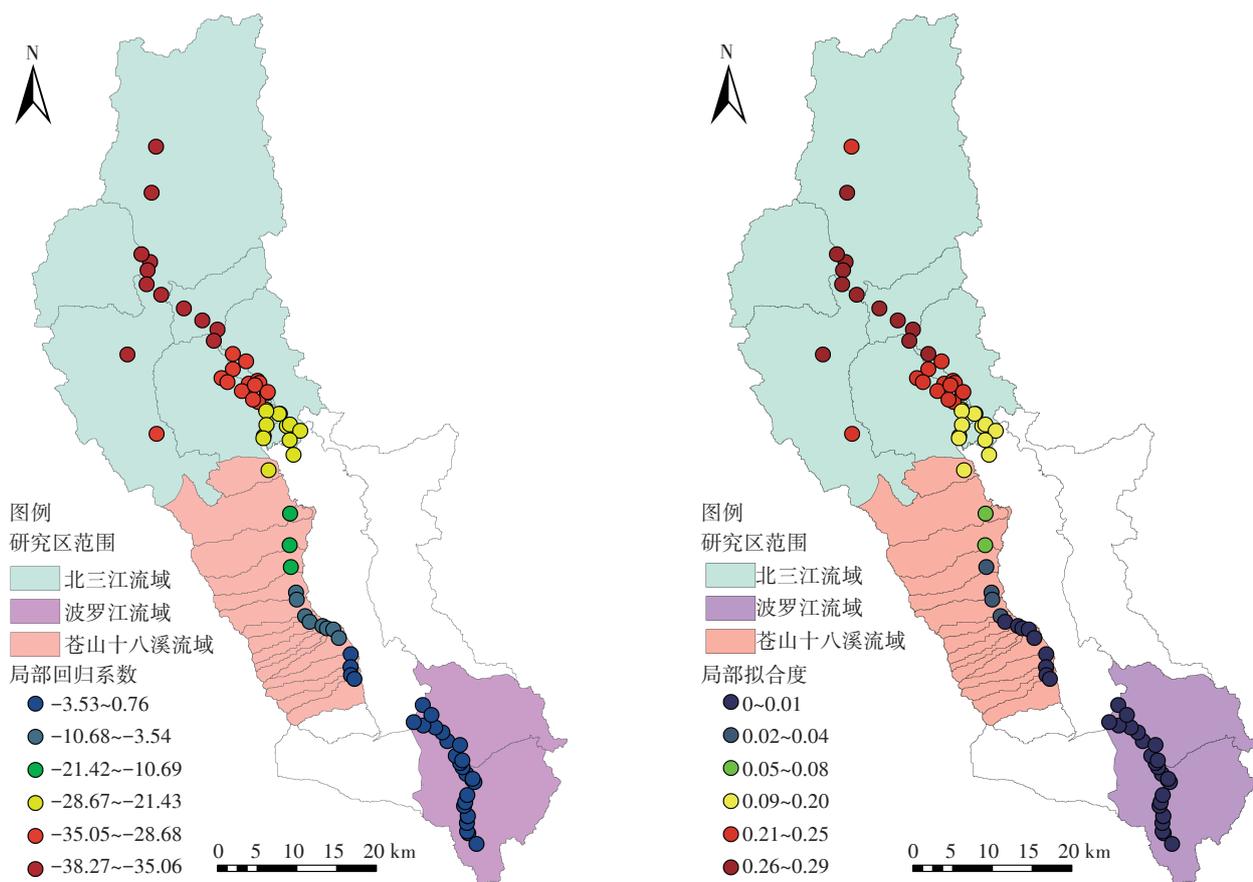


图5 植被面积百分比与COD所构建GWR模型之局部回归系数和拟合度

Figure 5 Regression parameters values and local  $R^2$  for vegetation and COD based on GWR

通过对太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析发现,对于空间异质性较高的大型浅水湖泊,流域河道入湖污染对湖体营养盐时空格局具有重要的塑造作用。说明入湖河流是洱海流域外源输入的重要通道,两者关系密切,尤其在雨季来临前开展入湖河流治理对控制湖泊富营养化极其重要。

此外本次研究发现洱海入湖河流与湖泊TN浓度变化并未呈现出很好的空间一致性,这一方面可能与流域新建的库塘湿地等生态净化系统对其截留净化作用有关,另一方面从入湖途径上,流域山区径流主要通过溪流入湖,而山前坝区径流主要通过密布的沟渠入湖<sup>[30]</sup>,此外作为污染入湖的迁移通道,湖泊水质受入湖河流水质及水量、入湖途径、迁移转化过程等多重因素的综合影响。本次河湖水质空间关联以定性分析为主,后续河湖关联分析中应加强敏感性和不确定性等定量分析,进一步分析两者的关联机制。

### 3.3 土地利用对入湖河流水质的影响

研究发现流域整体尺度下植被面积百分比与水质指标均呈负相关,与COD呈显著负相关( $P<0.05$ );

建设用地面积百分比与水质指标均呈正相关,且与TN、TP极显著正相关( $P<0.01$ )。这种植被用地对水质的正向效应、建设用地对水质的负向效应虽在课题组以往的研究中<sup>[26,28,32]</sup>均有体现:对洱海北部5个小流域土地利用与水质关联分析发现,建设用地与入湖河流水质呈一定程度正相关,植被对水质改善有利,其中植被区面积百分比与旱季TN、TP呈显著负相关,与COD在全年呈一定程度负相关<sup>[26]</sup>;关于洱海西部土地利用与入湖河流水质关系的研究也发现,建设用地面积百分比与河流水质指标呈正相关,植被面积百分比与河流水质指标呈负相关,其中建设用地面积百分比与入湖河流TP浓度呈显著正相关<sup>[32]</sup>。但进一步研究却发现由于入湖河流水质的空间自相关,土地利用对水质的影响在整个流域并不一致,两者关系随空间位置变化而不同,且植被对COD的影响也并非在全流域均为负相关,表现为植被与COD的关系在南部波罗江水系由正相关逐渐变为负相关,改善效应在北三江水系区域较显著,而建设用地对TP的影响虽在全流域均呈负向效应,但在苍山十八溪水系和北

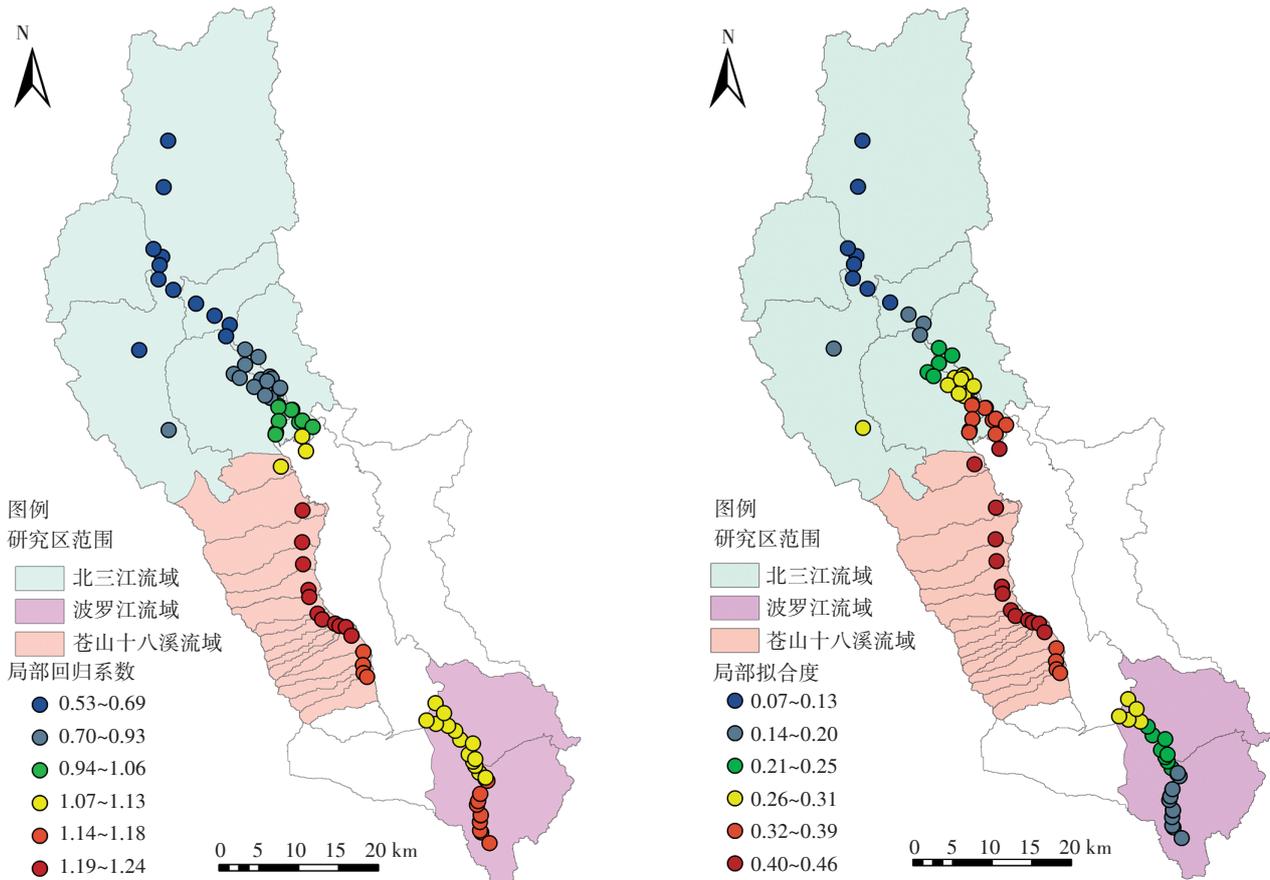


图6 建设用地面积百分比与TP所构建GWR模型之局部回归系数和拟合度

Figure 6 Regression parameters values and local  $R^2$  for construction land and TP based on GWR

部入湖区域作用效果更显著。这与研究区的地形、土地利用分布等密切相关,流域地形随着坡度递减主要由外围的远山地形、中间的平坝地形、湖周的湖滨地形组成,构成两关五坝一圈带的典型地貌特征,植被主要分布在山区,建设用地主要分布在平坝区。北三江水系发源于山区植被,流程长,且入湖前途经3个坝区,坝区地势低,周围由山区植被环绕,植被占比高达42%~56%,这使北三江水系入湖前经过三级天然净化,水质相对较好,植被和河道自净发挥了重要的污染消减作用;而苍山十八溪水系所在区域山高谷深、支沟短小,水系经山区植被发源,途径苍山十八溪坝子后经缓冲带入湖,坝区人口密集、开发强度大,建设用地面积平均达13%,加之区域狭长短小、入湖流程短促,导致建设用地对水质的不利影响<sup>[3,27-28]</sup>。可见,从土地开发利用的角度,北三江水系仍需保持现有的植被覆盖度,而苍山十八溪水系建设用地是重点管控对象。

#### 4 结论

(1)2014年洱海入湖水质超Ⅱ类目标,氮磷是主要污染因子,水质时空差异显著,重污染区域为波罗江水系,其次为苍山十八溪水系,雨季整体水质较旱季差。

(2)入湖河流与湖泊水质时空关联密切,两者关联在雨季更强,空间上除TN外,入湖河流与湖体污染物分布规律基本一致。

(3)流域整体尺度下,COD与植被面积百分比呈显著负相关( $P<0.05$ ),TN、TP与建设用地面积百分比呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与其他用地面积百分比呈显著负相关( $P<0.05$ )。

(4)入湖河流COD、TP、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 均呈显著空间自相关,构建的地理加权回归模型均显示出显著空间差异,其中植被面积百分比与COD的关系由正相关逐渐过渡到负相关,两者拟合程度由南向北递增;建设用地面积百分比与TP在整个流域均呈正相关,西部苍山十八溪流域和北部入湖区域两者拟合程度更好。

#### 参考文献:

- [1] 朱世丹,张 飞,张海威,等. 新疆艾比湖主要入湖河流同位素及水化学特征的季节变化[J]. 湖泊科学, 2018, 30(6):1707-1721.  
ZHU Shi-dan, ZHANG Fei, ZHANG Hai-wei, et al. Seasonal variation of the isotope and hydrochemical characteristics of the main lake rivers in Lake Ebinur, Xinjiang[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(6): 1707-1721.
- [2] Giri S, Qiu Z Y. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 173:41-48.
- [3] Yu D Y, Shi P J, Liu Y P, et al. Detecting land use-water quality relationships from the viewpoint of ecological restoration in an urban area [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 53:205-216.
- [4] 查慧铭,朱梦圆,朱广伟,等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析[J]. 环境科学, 2018, 39(3):1102-1112.  
ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, et al. Seasonal difference of water quality between lake and inflow/outflow rivers of Lake Taihu, China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(3):1102-1112.
- [5] Wu Z S, Wang X L, Chen Y W, et al. Assessing river water quality using water quality index in Lake Taihu basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 612:914-922.
- [6] Hamers T, Kamstra J H, Gils J V, et al. The influence of extreme river discharge conditions on the quality of suspended particulate matter in River Meuse and Rhine (the Netherlands) [J]. *Environmental Research*, 2015, 143:241-255.
- [7] Walker D, Jakovljevic D, Savic D, et al. Multi-criterion water quality analysis of the Danube River in Serbia: A visualization approach[J]. *Water Research*, 2015, 79:158-172.
- [8] White D A, Visser J M. Water quality change in the Mississippi River, including a warming river, explains decades of wetland plant biomass change within its Balize delta[J]. *Aquatic Botany*, 2016, 132:5-11.
- [9] Abdel-satar A M, Ali M H, Goher M E. Indices of water quality and metal pollution of Nile River, Egypt[J]. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 2017, 43(1):21-29.
- [10] Zhang Y L, Sillanp M, Li C L, et al. River water quality across the Himalayan regions: Elemental concentrations in headwaters of Yarlung Tsangbo, Indus and Ganges River[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(8):4151-4163.
- [11] Huang L N, Zhong M Y, Gan Q Y, et al. A novel calendar-based method for visualizing water quality change: The case of the Yangtze River 2006-2015[J]. *Water*, 2017, 9(9):708-708.
- [12] Zhang X, Luo J G, Zhao J, et al. Simulation of the transboundary water quality transfer effect in the mainstream of the Yellow River[J]. *Water*, 2018, 10(8):974-974.
- [13] Sun W, Xia C Y, Xu M Y, et al. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 66:306-312.
- [14] Pratt B, Chang H. Effects of land cover, topography, and built structure on seasonal water quality at multiple spatial scales[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 209/210(4):48-58.
- [15] 于 超,储金宇,白晓华,等. 洱海入湖河流弥苴河下游氮磷季节性变化特征及主要影响因素[J]. 生态学报, 2011, 31(23):7104-7111.  
YU Chao, CHU Jin-yu, BAI Xiao-hua, et al. Seasonal variation of nitrogen and phosphorus in Miju River and Lake Erhai and influencing factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23):7104-7111.
- [16] 陈 强,朱慧敏,何 溶,等. 基于地理加权回归模型评估土地利用

- 用对地表水质的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(5):1571-1580.  
CHEN Qiang, ZHU Hui-min, HE Rong, et al. Evaluating the impacts of land use on surface water quality using geographically weighted regression[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(5):1571-1580.
- [17] Álvarez-cabria M, Barquin J, Penas F J. Modelling the spatial and seasonal variability of water quality for entire river networks: Relationships with natural and anthropogenic factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 545/546:152-162.
- [18] Chu H J, Kong S J, Chang C H. Spatio-temporal water quality mapping from satellite images using geographically and temporally weighted regression[J]. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 2018, 65:1-11.
- [19] 陈凌霄, 秦雪, 金赞芳. 湖泊污染物入湖通量的研究进展[J]. 环境科技, 2014, 27(2):61-64.  
CHEN Ling-xiao, QIN Xue, JIN Zan-fang. Research progress on the pollutant fluxes of lakes[J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 27(2):61-64.
- [20] Wu S S, Yang H, Guo F, et al. Spatial patterns and origins of heavy metals in Sheyang River catchment in Jiangsu, China based on geographically weighted regression[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580:1518-1529.
- [21] Chen Q, Mei K, Dahlgren R A, et al. Impacts of land use and population density on seasonal surface water quality using a modified geographically weighted regression[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572:450-466.
- [22] Ji N N, Wang S R, Zhang L. Characteristics of dissolved organic phosphorus inputs to freshwater lakes: A case study of Lake Erhai, southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601/602:1544-1555.
- [23] 金相灿, 许映苏. 云南大理洱海绿色流域建设与水污染防治规划[R]. 北京: 中国环境科学学会, 2010.  
JIN Xiang-can, XU Ying-su. The Green Erhai Lake basin construction and water pollution control plan of Dali, Yunnan Province[R]. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2010.
- [24] 张 态. 洱海氮磷时空分布特征及其外源负荷研究[D]. 大理: 大理学院, 2011.  
ZHANG Tai. Research on the spatio-temporal distribution of the concentrations of nitrogen and phosphorous and exogenous fluxes in Erhai Lake[D]. Dali: Dali University, 2011.
- [25] 羊 华, 李红燕, 李丽怀. 2015年洱海入湖河流磷负荷时空变化与洱海富营养化浅析[J]. 人民珠江, 2017, 38(7):77-79.  
YANG Hua, LI Hong-yan, LI Li-huai. Study on temporal and spatial variation of phosphorus load in Erhai inflow rivers and eutrophication in Erhai Lake in 2015[J]. *Pearl River*, 2017, 38(7):77-79.
- [26] 项 颂, 庞 燕, 储昭升, 等. 入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究: 以洱海北部流域为例[J]. 环境科学, 2016, 37(8):2947-2955.  
XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, et al. Response of inflow water quality to land use pattern in northern watershed of Lake Erhai[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(8):2947-2955.
- [27] 国家环境保护总局水和废水监测分析方法编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 四版, 北京: 中国环境科学出版社, 2002:210-281.  
Editorial Committee for Water and Wastewater Monitoring Method of State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring method[M]. Fourth Edition, Beijing: China Environmental Science Press, 2002:210-281.
- [28] 庞 燕, 项 颂, 储昭升, 等. 洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究[J]. 环境科学, 2016, 36(11):4005-4011.  
PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, et al. Relationship between agricultural land and water quality of inflow river in Erhai Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2016, 36(11):4005-4011.
- [29] 陈鹏飞, 王丽学, 李爱迪, 等. 基于灰色关联度与BP神经网络的清河水总氮浓度预测模型[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7):40-43.  
CHEN Peng-fei, WANG Li-xue, LI Ai-di, et al. Prediction model of total nitrogen concentration in Qinghe reservoir based on grey relational grade and BP neural network[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(7):40-43.
- [30] 金春玲, 高思佳, 叶碧碧, 等. 洱海西部雨季地表径流氮磷污染特征及受土地利用类型的影响[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11):1891-1898.  
JIN Chun-ling, GAO Si-jia, YE Bi-bi, et al. Nitrogen and phosphorus pollution characteristics of surface runoff and the impacts of land use on runoff water quality in rainy season in the western Erhai Lake basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(11):1891-1898.
- [31] 梁启斌, 刘云根, 王 妍, 等. 洱海入湖河流罗时江氮磷干湿季节分异及影响因子研究[C]//武汉: 2015年全国河湖污染治理与生态修复论坛, 2015.  
LIANG Qi-bin, LIU Yun-gen, WANG Yan, et al. Study on seasonal variation of nitrogen and phosphorous with its influencing factors in Boluo River of Erhai Lake[C]//Wuhan: The national forum on river and lake pollution control and ecological restoration in 2015, 2015.
- [32] 项 颂, 庞 燕, 窦嘉顺, 等. 不同时空尺度下土地利用对洱海入湖河流水质的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(3):876-884.  
XIANG Song, PANG Yan, DOU Jia-shun, et al. Impact of land use on inflow river water quality of Erhai Lake at different temporal and spatial scales[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3):876-884.