

宋焱, 徐颂军, 刘贤赵, 等. 南沙红树林湿地公园水环境质量时空差异分析——基于改进后倍斜率聚类分析的视角[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 303-311. [Song Yan, Xu Songjun, Liu Xianzhao et al. Time and Space Differences of Water Environmental Quality of the Mangrove Wetland Park in Nansha: Based on the Improved Twice-slope Clustering Method. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(2): 303-311.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2016.02.018

南沙红树林湿地公园水环境质量时空差异分析 ——基于改进后倍斜率聚类分析的视角

宋焱^{1,2}, 徐颂军¹, 刘贤赵², 张勇², 邱鹏华³, 牛安逸¹, 许观嫦¹

(1. 华南师范大学地理科学学院, 广东 广州 510631; 2. 湖南科技大学地理科学系, 湖南 湘潭 411201;

3. 海南师范大学地理与旅游学院, 海南 海口 571158)

摘要:于2007年和2014年的丰水期和枯水期分别测量了南沙红树林湿地公园一期、二期及其附近河涌8个采样点的水体温度、pH、DO、COD、BOD₅、TP和TN等物化指标。通过对比监测结果和倍斜率聚类评价结果发现:研究区水质总体上处于Ⅱ级-Ⅲ级或Ⅱ级-Ⅳ级的“尚清洁”状态;红树林湿地公园一期2008年对外开放后至2014年,水环境指标中pH变化范围不大,DO、COD含量有所下降,BOD₅、TP和TN含量均呈增加趋势;2007年南沙红树林湿地公园一期采样点W1、W2、W3水质优于河涌采样点W7和W8,河涌采样点W7和W8水质优于红树林湿地公园二期采样点W4、W5、W6;2014年南沙红树林湿地公园二期采样点W4、W5、W6水质优于红树林湿地公园一期采样点W1、W2、W3和河涌采样点W7、W8;8个采样点中水质改善最明显的是二期采样点W6,水质下降最明显的是一期采样点W3;丰水期河涌水质2014年较2007年有所好转,但红树林湿地公园水质无论枯水期亦或丰水期,多数情况下优于河涌水质;研究区域水环境质量的时空差异总规律为2007~2014年南沙红树林湿地公园二期水质好转,一期水质有所下降。

关键词:倍斜率聚类法;水环境质量评价;红树林湿地;时空差异分析;广州南沙

中图分类号:K928.4;X824;P935.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0690(2016)02-0303-09

水环境作为红树林湿地环境的基本构成要素之一,极易受到旅游开发等社会活动的影响和破坏。因此,进行红树林湿地旅游景区水环境质量评价研究就显得尤为重要,具有重要的理论与实践意义。国内外学者主要采用灰色聚类法^[1-4]、相关加权指数法^[5]、水质综合污染指数法^[6,7]和模糊综合评价法^[8,9]等方法进行湿地旅游景区水环境质量评价。倍斜率聚类法作为一种环境质量评价新方法,以模糊数学^[10,11]和灰色系统^[12,13]等作为基本理论依据,最早由丁进宝^[14]运用于对大气质量进行评价,之后该方法也主要是针对大气环境,鲜有针对水环境质量的倍斜率聚类分析。究其原因在于难以确定DO隶属函数表达式及其取值范围。故本人于2012年开始尝试修正DO隶属函数表达式^[15]。实际应用

中发现:函数值 $f_{jk}(X)$ 仍然容易出现大于1的情况,不能确定各实测值在DO隶属函数图形中的具体位置;且因未对水环境因子的监测结果和污染分级标准进行无量纲化处理,故当聚类系数相同时,无法对级别相同的多个采样点进行水质优劣评价。为了弥补上述领域研究相对欠缺的现状,本研究选取广州市面积最大、素有“广州之肾”之称的李佳湖红树林湿地公园一期和二期工程作为研究对象,以一期开园前和二期开园后等2个时间段作为研究节点,尝试进一步改进倍斜率聚类分析方法的同时,评价南沙红树林湿地旅游开发及深度开发后的区域水环境质量,寻求其时空差异规律,以期为红树林湿地的合理保护与开发提供借鉴。

收稿日期:2015-01-06;**修订日期:**2015-05-12

基金项目:国家自然科学基金项目(41271060)、广东省自然科学基金项目(8151063101000016)资助。[Foundation: National Nature Sciences Foundation of China(41271060)and Nature Sciences Foundation of Guangdong(8151063101000016).]

作者简介:宋焱(1980-),女,湖南长沙人,博士研究生,主要从事旅游环境生态与景观生态研究。E-mail: songyanscnu@163.com

通讯作者:徐颂军,教授。E-mail: xusj@scnu.edu.cn

1 研究区域概况

南沙红树林湿地公园位于南沙区万顷沙镇19涌东西围,北、西江约16条干支流流经境内,加上东北部、西南部和中部的虎门、洪奇门和蕉门等四大口门,区域水资源总量达 $76.9 \text{ m}^3/\text{s}$, $664 \text{ 万 m}^3/\text{d}$ ^[16]。年降水量1 542 mm,多年平均丰水年降水量为2 035 mm,多年平均枯水年降水量1 095 mm,多年平均径流量10.51亿 m^3 ,湿地蓄水约11亿 m^3 ^[17]。1998年以来,人工种植的红树植物主要有无瓣海桑(*Sonneratia apetala*)、海桑(*Fructs sonneratiae caseloaris*)、老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)、秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树(*Aegiceras comiculatum*)、木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)、水黄皮(*Pongamia pinna-ta*)等12科16种,其中真红树10种^[18,19]。2008年南沙红树林湿地公园一期工程正式对外开发,水域面积约200 hm^2 。南沙湿地二期工程于2008年开始建设,位于一期湿地的西部,面积达373 hm^2 ^[20],水域大小与一期接近,2013年4月28日开园。根据万顷沙镇政府统计:2008年国庆小长假,百万葵园游客6~7万人次,湿地公园游客8 000人次,19涌共接待游客10万人次;2010年国庆小长假,百万葵园游客11.22万人次,湿地公园游客4.64万人次,19涌总接待游客13.15万人次^[21];而2013年4月28日~5月5日的五一小长假,百万葵园和南沙湿地公园一期、二期等旅游景区游客则超过82万人次^[22]。

2 数据来源与评价方法

2.1 数据来源

采样点主要分布在南沙红树林湿地公园一、二期及其外围河涌等地(图1),其中W1、W2和W3位于南沙红树林湿地公园一期,W4、W5和W6位于南沙红树林湿地公园二期,另取二期河涌W7和一、二期交界处的河涌W8作为对照。采样次数为4次:一期开园前2007年8月上旬的丰水期、一期开园前2007年12月上旬的枯水期、二期开园后2014年1月上旬的枯水期、2014年6月下旬的丰水期。红树林采样点于船头位置,河涌采样点选择水流平缓、冲刷较弱的地方,采用有机玻璃采水器取样。每个采样点根据选定的测试指标及其可兼容性情况,分别进行取样,每个采样点采样量约12瓶,每瓶取样量约350~1 000 mL。每次采样时先用采样点的水样冲洗3遍已用蒸馏水清洗并晾干的聚乙烯瓶,再采集水样,冷藏保存待分析。所有采样点均采用高精度GPS进行准确定位,并摄像拍照备查。

2007年水温(T)、DO和pH等现场数据分别用温度计、JBP-607型便携式溶解氧分析仪和PHB-4型便携式pH计等进行测定。2014年水温(T)、DO和pH等水样指标由美国YSI公司生产的Proplus便携式多参数水质测定仪现场测得。以上仪器每次采样之前均经过严格的校正。BOD₅采用稀释与接种法(GB/T 7488)测定;COD采用重铬酸钾法(GB/T 11914)测定;TP采用钼酸铵分光光度法

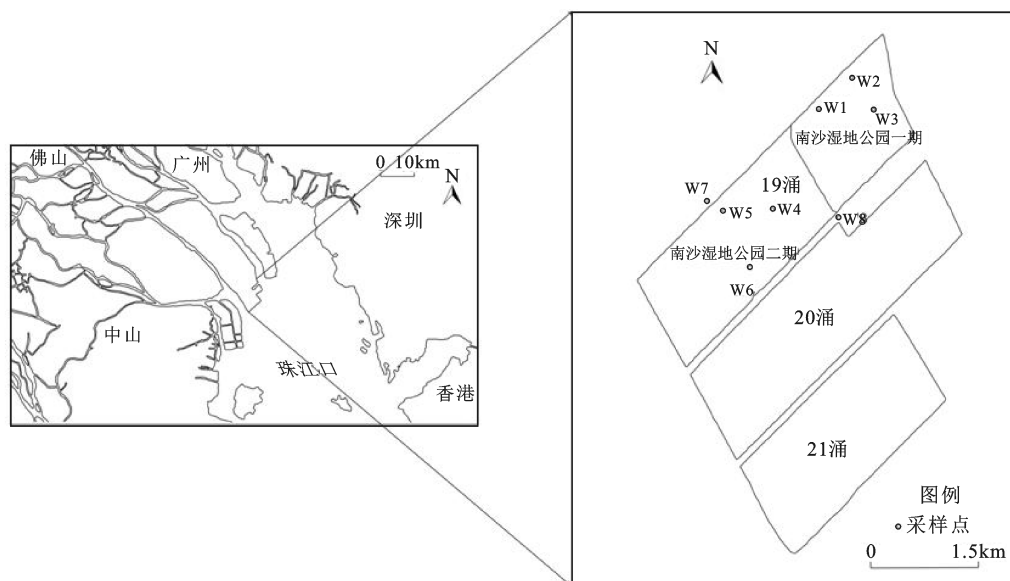


图1 研究区采样点分布示意图

Fig.1 Distribution diagram of sampling sites in case study area

(GB11893-89)测定;TN采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法(本方法与GB11894-89等效)测定。为了减小实验误差,每个采样点取保存方式相同的水样3瓶,重复测3次,取其平均值。

2.2 水环境质量评价方法

2.2.1 隶属函数表达式的确定

与其它污染物不同,DO值越大越好而非越大越差,故DO指标的倍斜率隶属函数表达式可通过加绝对值符号进行相应改进,如式(1)、(2)、(3),作此处理后,各实测值都能在隶属函数图形中找到其具体位置,不会出现 $f_{jk}(X) > 1$ 的情况。当 $f_{jk}(X) < 0$ 时,则规定 $f_{jk}(X) = 0$ ^[23]。其他指标的倍斜率隶属函数表达式详见参考文献[15]。

设各采样点DO指标有 h 个污染级别,且记 $k = 1, 2, \dots, h$,则各采样点DO指标关于级别 k 的隶属函数为 $f_k(X)$,其中 X 为各采样点DO指标的实测浓度。当 $k=1$ 时,DO指标的第1类隶属函数表达式为:

$$f_1(X) = \begin{cases} 1 & X \geq S_1 \\ 1 - \left| \frac{X - S_1}{S_h} \right| & S_1 - S_h \leq X < S_1 \\ 0 & X < S_1 - S_h \end{cases} \quad (1)$$

当 $k=h-1$ 时,DO指标的第 k 类($k=1, 2, \dots, h-1$)隶属函数表达式为:

$$f_k(X) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{S_{k-1} - X}{2S_h} \right| & X \geq S_{k-1} \\ 1 & S_k \leq X < S_{k-1} \\ 1 - \left| \frac{X - S_k}{S_h} \right| & S_k - S_h \leq X < S_k \\ 0 & X < S_k - S_h \end{cases} \quad (2)$$

当 $k=h$ 时,DO指标的第 h 类隶属函数表达式为:

$$f_h(X) = \begin{cases} 1 - \left| \frac{S_h - X}{2S_h} \right| & X \geq S_h \\ 1 & X < S_h \end{cases} \quad (3)$$

式中 S_h 为DO指标在 k 级别的最高标准值, S_{k-1} 、 S_k 分别为DO指标在 k 级别的下限值 and 上限值。将实测浓度和污染分级标准进行无量纲化处理后代入式(1)、(2)、(3),可得DO指标的6级环位标准隶属函数矩阵。

2.2.2 聚类权重值的确定

设某一采样点有 h 个污染级别和 m 个污染物指标,且记 $k=1, 2, \dots, h$; $j=1, 2, \dots, m$, λ_{jk} 为污染物 j 在 k 级别上的无量纲化水质污染分级标准,则各污染物各级别的聚类权重值 W_{jk} 由下式计算^[1]:

$$W_{jk} = \frac{\frac{1}{\lambda_{jk}}}{\sum_{j=1}^m \frac{1}{\lambda_{jk}}} \quad (4)$$

2.2.3 聚类系数与判别原则

假设有 n 个采样点,记 $i=1, 2, \dots, n$,第 i 个采样点与污染级别 k 之间的聚类系数 η_{ik} 的函数表达式为^[1]:

$$\eta_{ik} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m f_{jk}(X) \times W_{jk} \quad (5)$$

若下列表达式 $\eta_{ik} = \max_{1 \leq k \leq h} \{ \eta_{ik} \}$, $i \in [1, 2, 3, \dots, n]$, $k \in [1, 2, 3, \dots, h]$ 成立,则根据聚类系数最大原则,判别各采样点所属水质污染等级。

2.2.4 评价标准

根据全国水资源评价和调查统一规定的全国水系水质分级标准和地表水环境质量国家标准(GB3838-2002),本文将DO、COD、BOD₅、TP、TN共5种污染物划分为6级质量标准,见表1。

表1 水环境质量标准(mg/L)

Table 1 The water environmental quality standard(mg/L)

项目	I	II	III	IV	V	VI
DO	≥7.5	6~7.5	5~6	3~5	2~3	0~2
COD	≤15	≤15	15~20	20~30	30~40	40~∞
BOD ₅	≤3	≤3	3~4	4~6	6~10	10~∞
TP	≤0.02	0.02~0.1	0.1~0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~∞
TN	≤0.2	0.2~0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~∞

注:据《地表水环境质量国家标准(GB3838-2002)》整理。

3 结果与分析

3.1 水质监测结果分析

针对南沙红树林湿地公园一期和二期8个采样点,主要监测pH、DO、COD、BOD₅、TP、TN等6种水环境指标,监测结果如图2,因pH值变化范围不大,故未作为倍斜率聚类法水环境质量评价的指标。由图2可知,总的特征为DO、COD、TP、TN等枯水期含量明显高于丰水期。其中DO含量:2014年1月份枯水期(各采样点平均含量8.951 mg/L)高于2007年12月枯水期(各采样点平均含量8.063 mg/L),而2014年6月份丰水期(各采样点平均含量5.193 mg/L)则低于2007年丰水期(各采样点平均含量5.980 mg/L);COD含量:2014年水文周期内各采样点数值均低于2007年;BOD₅含量:2014年水文周期内基本都

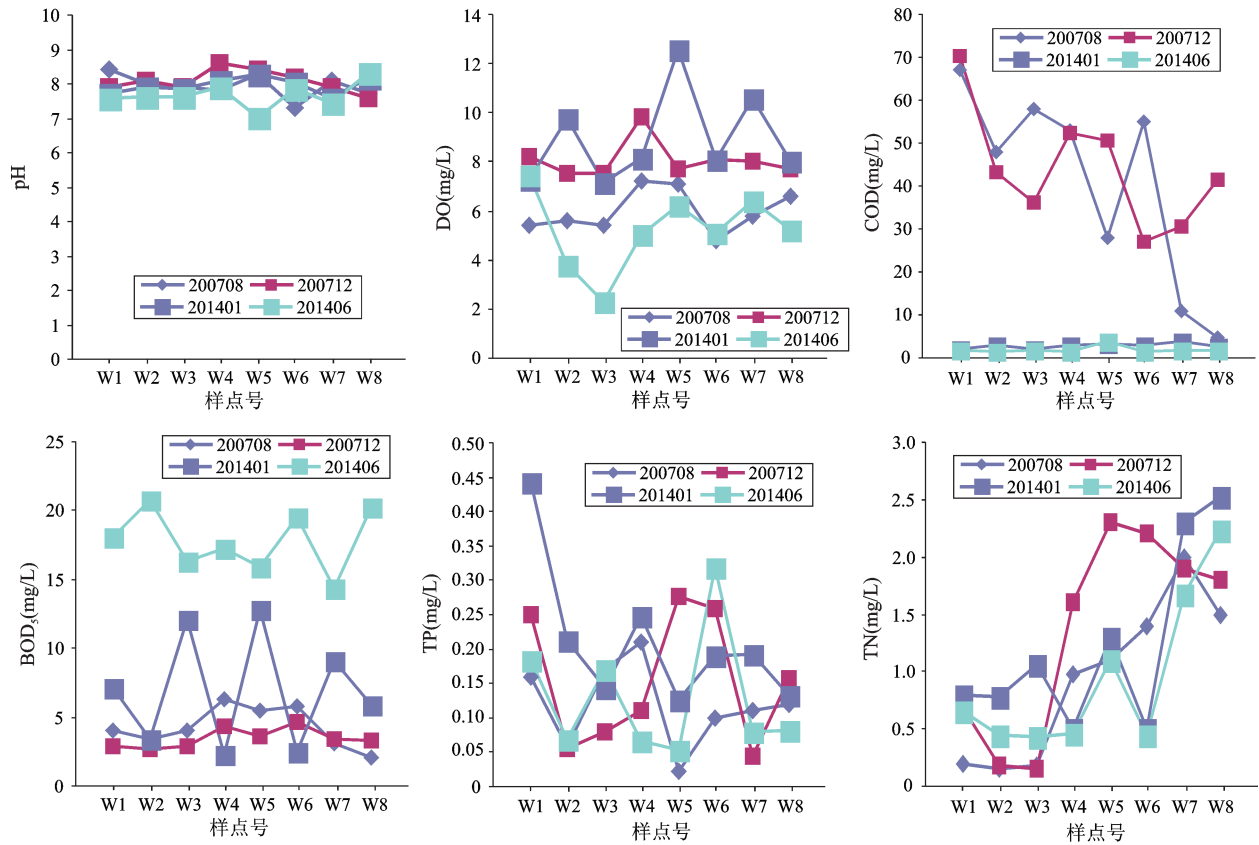


图2 2007年、2014年南沙红树林湿地水环境因子含量变化

Fig.2 Water environmental factors variation in Nansha Mangrove Wetland in 2007 and 2014

高于2007年;TP、TN含量:红树林湿地公园一期2014年水文周期内监测值高于2007年,红树林湿地公园二期2014年水文周期内监测值低于2007年。红树林样点较河涌样点,DO值更高,TP、TN含量较低,而COD、BOD₅含量相差不大。

3.2 基于倍斜率聚类法的水环境质量评价结果分析

3.2.1 各样点聚类系数及水质污染等级的确定

采用平均标准方法对水环境因子的监测结果和污染分级标准进行无量纲化处理,然后将无量纲化监测结果代入式(1)、(2)、(3)和其他指标倍斜率隶属函数表达式,则可列出各污染物6级环位标准的倍斜率隶属函数矩阵。将无量纲化水质污染分级标准代入式(4),可得出各污染物各级别的聚类权重值。隶属函数矩阵和聚类权重值代入式(5)即可求出各采样点各污染级别的聚类系数,由最大聚类系数对应级别,可判断各时期各采样点所属污染等级(见表2)。

3.2.2 南沙红树林湿地水环境质量时空差异分析

由表2可知,枯水期:红树林湿地公园一期

2014年较2007年水质有所下降,采样点W1由Ⅲ级下降为Ⅳ级,采样点W2由Ⅱ级下降为Ⅲ级;红树林湿地公园二期2014年较2007年水质有所好转,采样点W5由Ⅳ级上升为Ⅱ级,采样点W6由Ⅳ级上升为Ⅲ级;河涌水质2014年较2007年亦有所下降,采样点W7由Ⅱ级下降为Ⅳ级。丰水期监测结果与枯水期类似:红树林湿地公园一期2014年较2007年水质有所下降,采样点W3由Ⅱ级下降为Ⅵ级;红树林湿地公园二期2014年较2007年水质有所好转,采样点W4由Ⅳ级上升为Ⅱ级,采样点W6由Ⅳ级上升为Ⅲ级;可喜的是2014年较2007年河涌水质亦有所好转,采样点W7和W8均由Ⅲ级上升为Ⅱ级。总体特征为红树林湿地公园建设期和旅游开发初期(二期)水质好转,红树林湿地公园旅游深度开发期(一期)水质有所下降。

表2红树林与河涌水质污染等级判别结果显示:红树林湿地公园二期建设前的丰水期(2007年8月),河涌水质(Ⅲ级)与红树林湿地公园一期(Ⅱ级)比较,水质稍差,但比红树林湿地公园二期水

表2 2007年、2014年各采样点最大聚类系数及水质污染等级判别结果

Table 2 The results of the biggest clustering coefficient and its pollution level in each sampling sites in 2007 and 2014

采样点	2007年8月		2007年12月		2014年1月		2014年6月	
	污染等级	最大聚类系数	污染等级	最大聚类系数	污染等级	最大聚类系数	污染等级	最大聚类系数
W1	II	0.813	III	0.708	IV	0.740	II	0.778
W2	II	0.912	II	0.937	III	0.855	II	0.864
W3	II	0.800	II	0.951	II	0.784	VI	0.833
W4	IV	0.754	II	0.722	III	0.874	II	0.886
W5	II	0.868	IV	0.677	II	0.728	II	0.825
W6	IV	0.841	IV	0.782	III	0.905	III	0.681
W7	III	0.871	II	0.772	IV	0.610	II	0.749
W8	III	0.887	IV	0.758	IV	0.695	II	0.660

质(Ⅳ级)更好。红树林湿地公园二期建成后的丰水期(2014年6月),河涌水质与红树林湿地公园一期、二期的水质基本保持相同污染等级(Ⅱ级)。红树林湿地公园二期建设前的枯水期(2007年12月),河涌水质(Ⅱ级-Ⅳ级)与红树林湿地公园一期(Ⅱ级-Ⅲ级)比较,水质稍差,但比红树林湿地公园二期水质(Ⅳ级)更好。红树林湿地公园二期建成后的枯水期(2014年1月),河涌水质(Ⅳ级)与红树林湿地公园一期、二期的水质(Ⅱ级-Ⅲ级)相比较,水质稍差。总体特征为红树林湿地公园水质无论枯水期亦或丰水期,多数情况下是优于河涌水质,充分体现了红树林生态系统净化水质的功能。

纵观2007年、2014年红树林湿地公园一期、二期和河涌等处8个采样点的水质污染等级可知,水质得到最明显改善的是二期采样点W6,由2007年丰水期和枯水期的Ⅳ级提升到2014年枯水期和丰水期均为Ⅲ级的水平。水质下降最明显的是一期采样点W3,由2007年丰水期和枯水期的Ⅱ级下降到2014年枯水期和丰水期的Ⅳ级、Ⅱ级和Ⅵ级水平。再次验证2007~2014年南沙红树林湿地公园二期水质好转,一期水质有所下降的水环境质量时空差异规律。

3.2.3 各时段各采样点水质优劣排序分析

倍斜率聚类法不仅可以用于确定单个采样点所属水质污染等级,还可以进行多个采样点水质优劣的评判分析。其判别原则为级别不相同者,级别愈低水质愈好;级别相同者,聚类系数愈小水质愈好^[23]。且因水环境因子的监测结果和污染分级标准均经过无量纲化处理,故聚类系数相同的情况不会出现,更有利于对级别相同的多个采样

点进行水质优劣评价。

表2显示,2007年8月8个采样点中4个Ⅱ级水质,2个为Ⅲ级水质,2个为Ⅳ级水质,其水质优劣排序为W3>W1>W5>W2>W7>W8>W4>W6。2007年12月8个采样点中4个Ⅱ级水质,1个为Ⅲ级水质,3个为Ⅳ级水质,其水质优劣排序为:W4>W7>W2>W3>W1>W5>W8>W6。2014年1月8个采样点中2个Ⅱ级水质,3个为Ⅲ级水质,3个为Ⅳ级水质,其水质优劣排序为:W5>W3>W2>W4>W6>W7>W8>W1。2014年6月8个采样点中6个Ⅱ级水质,1个为Ⅲ级水质,3个为Ⅵ级水质,其水质优劣排序为:W8>W7>W1>W5>W2>W4>W6>W3。总的说来,2007年南沙红树林湿地公园一期采样点W1、W2、W3水质优于河涌采样点W7和W8,河涌采样点W7和W8水质优于红树林湿地公园二期采样点W4、W5、W6。2014年南沙红树林湿地公园二期采样点W4、W5、W6水质优于红树林湿地公园一期采样点W1、W2、W3和河涌采样点W7、W8。此研究结论与之前的2007~2014年南沙红树林湿地公园水环境质量时空差异规律较为一致。

4 讨论

4.1 倍斜率聚类分析方法的改进

DO与其它污染物不同,其值并非越大越差而是越大越好。鉴于前人未对此类水环境指标的倍斜率隶属函数表达式进行定义,作者2012年开始尝试通过对一般污染物倍斜率隶属函数表达式加绝对值符号等形式构建DO倍斜率隶属函数表达式,目的在于确定各实测值在DO隶属函数图形中的具体位置,避免出现 $f_k(X) > 1$ 的情况。但实际应用中发现:参考文献[15]中的DO倍斜率隶属

函数表达式的函数值 $f_k(X)$ 仍然容易出现大于1的情况,故本文试图对DO倍斜率隶属函数表达式进行进一步修正。修正结果如式(1)、(2)、(3),与参考文献[15]的主要不同之处在于当 $k=h-1$, $S_k-S_h \leq X < S_k$ 时,DO指标的第 k 类($k=1,2,\dots,h-1$)隶属函数表达式为: $1-\left|\frac{X-S_k}{S_h}\right|$;当 $k=h$, $X \geq S_h$ 时,DO指标的第 h 类隶属函数表达式为: $1-\left|\frac{S_h-X}{2S_h}\right|$,这样可以避免计算结果超出上限值1。

由表2可知,改进后的倍斜率聚类分析方法用于评价红树林湿地公园水环境质量效果良好。评价结果显示该区域水质总体上处于“尚清洁”的健康或亚健康状态(Ⅱ级-Ⅲ级或Ⅱ级-Ⅳ级),与实际情况较为接近,并能得到很好的解释。且因对水环境因子的监测结果和污染分级标准等都进行了无量纲化处理,故不会出现聚类系数相同的情况,研究区域8个采样点的4期数据均可进行水质优劣评价。

4.2 与等斜率灰色聚类法的比较

通过比较发现(如表3),倍斜率聚类法与等斜率聚类法的评价结果基本一致,反映的红树林湿地公园水环境质量时空规律相同,但是对于个别年份的个别采样点,等斜率聚类法则容易出现评价偏差。如2014年1月的采样点W2,等斜率聚类法判为Ⅱ级,而本法判为Ⅲ级。从2014年1月采样点W2的各污染物浓度来看,BOD₅浓度位于Ⅲ级中心处,TP浓度位于Ⅳ级中心处,TN浓度位于Ⅲ级中心处,显然综合来看,W2判为Ⅲ级更为合理。倍斜率聚类分析方法作为等斜率聚类分析方法的进一步延伸,修正等斜率聚类法的“平顶等腰梯形”式函数为“平顶不等腰”式函数,保证污染物 j 左斜率体现的高级别的贡献率大于右斜率体现的低级别的贡献率,评价过程不受主要污染物控制,但兼顾了其重要影响,评价结果准确性增强,监测信息利用率更高,这些说明倍斜率聚类分析法能为红树林湿地旅游景区水环境质量评价提供新思路。

4.3 旅游开发对红树林湿地水质监测结果的影响

2008年红树林湿地公园一期作为旅游景区对外开放后至2014年,水环境指标中DO值有所下降,BOD₅监测值有所增加,即随着游客数量的增加和旅游开发强度的增强,生活污水及游船等旅游设施使得各类有机污染物在湿地水体中的含量倍增,水体中的氧平衡被破坏,有机污染物在水中分

解所消耗的溶解氧亦呈现递增的态势。COD含量降低说明,随着旅游开发的推进,适合红树林生长的相对还原的湿地水环境状况正在逐步被破坏,水体中具有还原性能的亚硝酸盐、亚铁盐和硫化物等的含量有所减少。另外,红树林湿地公园一期对外开发5a后,水环境中TP和TN含量均呈增加趋势,说明红树林作为旅游景区进行开发,其娱乐功能增强的同时生态功能却在下降,红树林净化水体中营养元素的功能未能得到体现。而红树林湿地公园二期经过5a的恢复建设后,水环境中TP和TN的含量较2007年均有所降低,说明红树林发挥了其净化水中营养盐的功能^[24]。红树林样点与河涌样点水质监测结果的比较亦充分说明红树林湿地生态系统强大的生态调节功能。

4.4 红树林湿地公园建设阶段与水质污染等级之间的相互关系

红树林湿地公园从开始建设至开放初期,随着红树植物种植数量的增加和植株面积的拓展对水质污染物的净化效果明显,不仅仅湿地公园自身的水环境得到净化,与之相连的河涌的水环境亦得到净化。2007年、2014年丰水期红树林湿地公园一期、二期与河涌水质评价结果的差异分析能较好的解释上述论断。二期建设前,一期水质较河涌好,河涌水质较二期好。二期建设完成后,不仅仅二期自身的水质由Ⅱ级-Ⅳ级提升到Ⅱ级-Ⅲ级,超过一期水质,且围绕二期的河涌的水质亦由Ⅲ级提升到Ⅱ级。而红树林湿地公园建设进入深度开发期后,随着游客数量的增加和旅游基础、娱乐设施的完善,其水质有所下降,但总体水环境状况尚好,基本处于健康或亚健康状态。2007年、2014年红树林湿地公园一期丰水期水质由Ⅱ级下降为Ⅱ-Ⅳ级,枯水期水质由Ⅱ-Ⅲ级下降为Ⅱ-Ⅳ级,水质下降幅度不大,且略优于同时期的河涌水质,说明红树植物积极的生态功能可部分地抵消其娱乐功能对水环境的影响破坏。

4.5 河涌水质好转的原因分析

2007年、2014年的枯水期虽然河涌水质基本处于Ⅳ级水平,但可喜的是2014年丰水期河涌水质有所好转,采样点W7和W8均由2007年的Ⅲ级上升为Ⅱ级。原因之一为红树林湿地公园二期的恢复建设对所连水体的净化作用。原因之二为南沙河涌的综合整治工程。主要包括蕉门河综合整治工程、芦湾村排水渠整治工程、大岭村排水渠整治工程、金洲涌

表3 倍斜率聚类法与等斜率聚类法水质污染等级判别结果比较

Table 3 The discriminant result comparison of the water quality pollution levels between the twice-slope clustering method and the equal-slope clustering method

采样点	2007年8月		2007年12月		2014年1月		2014年6月	
	倍斜率聚类法	等斜率聚类法	倍斜率聚类法	等斜率聚类法	倍斜率聚类法	等斜率聚类法	倍斜率聚类法	等斜率聚类法
W1	II	III	III	III	IV	IV	II	II
W2	II	II	II	II	III	II	II	III
W3	II	III	II	II	II	II	VI	V
W4	IV	IV	II	IV	III	II	II	II
W5	II	III	IV	IV	II	II	II	II
W6	IV	IV	IV	IV	III	II	III	II
W7	III	III	II	II	IV	IV	II	II
W8	III	III	IV	IV	IV	IV	II	II

综合整治工程等4项工程。建设内容包括景观建设、堤岸整治、河道清淤和截污等。南沙河涌总长7.17 km,2009年投资0.59亿元,2010年投资0.21亿元^[25]。原因之三为南沙新区对农村生活污水实施集中生化处理,主要采取珠江管理区雨污分流、万顷沙“生态沟”、南沙街有动力生化处理等3种模式。原因之四为南沙新区按照国家关停小火电政策,关闭无任何脱硫设施的工业企业,推行清洁生产。

5 结论

1) 对DO指标倍斜率聚类隶属函数表达式进行修正,对水环境因子的监测结果和污染分级标准进行无纲量化处理等,完善了倍斜率聚类法,为红树林湿地旅游景区水环境质量评价提供新方法。与等斜率聚类法评价结果的比较则进一步验证该方法的科学性、准确性和先进性。

2) 红树林湿地恢复的同时水质好转,红树林湿地开发的同时水质有所下降。南沙红树林湿地公园二期恢复建设7 a后至2014年,其采样点水质优于红树林湿地公园一期采样点和河涌采样点。8个采样点中水质得到最明显改善的是二期采样点W6,水质下降最明显的是一期采样点W3。红树林湿地公园一期2008年作为旅游景区对外开放后至2014年,营养盐及有机污染综合指标中DO、COD含量有所下降,BOD₅、TP和TN含量均有所增加,水质总体呈下降趋势。

3) 红树林对区域水质及所连水体的净化功效明显。无论枯水期亦或丰水期,多数情况下红树林湿地公园水质优于河涌水质。二期建设完成后,不仅仅二期自身的水质由2007年的II级-IV级

提升到2014年的II级-III级,超过一期水质,且围绕二期的河涌水质亦由2007年丰水期的III级提升到2014年丰水期的II级。

4) 广州南沙红树林湿地公园受旅游开发活动影响明显,但总体水环境状况尚好,基本处于健康或亚健康状态。水环境质量时空差异总规律为:红树林湿地公园建设期和旅游开发初期(二期)水质好转,红树林湿地公园旅游深度开发期(一期)水质有所下降。

参考文献(References):

[1] 赵志坚.灰色聚类法在水环境质量评价中的应用[J].四川环境,1997,16(3):50-52. [Zhao Zhijian. Application of grey clustering method to water environmental quality assessment.Sichuan Environment, 1997, 16(3): 50-52.]

[2] 宿伟萍,王继富,刘兴土,等.基于灰色聚类法的大庆市油田开发区湿地水环境质量评价[J].中国农学通报,2011,27(32): 315-319. [Su Weiping, Wang Jifu, Liu Xingtu, et al. The evaluation on water environment quality of wetlands in Daqing Oil development zones based on grey clustering method. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(32): 315-319.]

[3] 周林飞,许士国,孙万光.基于灰色聚类法的扎龙湿地水环境质量综合评价[J].大连理工大学学报,2007,47(2):240-245. [Zhou Linfei, Xu Shiguo, Sun Wanguang. Comprehensive evaluation on water environment quality of Zhalong wetland based on grey clustering method.Journal of Dalian University of Technology, 2007, 47(2): 240-245.]

[4] 李苗,臧淑英,张冬有,等.基于灰色关联分析法的林甸县污水泡中重金属和毒性元素污染情况评价[J].安全与环境学报,2012, 12(1):134-137. [Li Miao, Zang Shuying, Zhang Dongyou, et al. Assessment of heavy metal and toxic element pollution in Wushuipao Lake in Lindian city based on grey correlation analysis. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(1): 134-137.]

- [5] Calvo S, Barone R, Naselli L, et al. Limnological studies on lakes and reservoirs of Sicily[J]. *Naturalista Siciliano*, 1993, X VII(Supplement): 19-25.
- [6] 郝乐友,武中强,朱丹.扎龙湿地水环境评价与保护措施[J].黑龙江水专学报,2005,32(1):82-83. [Hao Leyou, Wu Zhongqiang, Zhu Dan. Protection of water environment of Zhalong Wetland. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 2005, 32(1): 82-83.]
- [7] 张景平,黄小平,江志坚,等.珠江口海域污染的水质综合污染指数和生物多样性指数评价[J].热带海洋学报,2010,29(1): 69-76. [Zhang Jingping, Huang Xiaoping, Jiang Zhijian, et al. Assessment of the pearl river estuary pollution by water comprehensive pollution index and biodiversity index. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(1): 69-76.]
- [8] 周鑫.水环境质量模糊综合评价方法研究[D].成都:四川师范大学,2008.[Zhou Xin. Water environment quality fuzzy quality synthetic evaluation method study---take the case of Dadu River downstream. Chengdu: Sichuan Normal University, 2008.]
- [9] 黄辉,陈旭,蒋功成,等.洪泽湖水环境质量模糊综合评价[J].环境科学与技术,2012,35(10):186-190. [Huang Hui, Chen Xu, Jiang Gongcheng, et al. Comprehensive assessment on water quality of Hongze Lake by fuzzy mathematical model. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(10): 186-190.]
- [10] Huang G H, Hipel K W, Yin Y Y. Fuzzy relation analysis for multicriteria water resources management[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1999, 125(1): 41-47.
- [11] Karmakar S, Mujumdar P P. Grey fuzzy optimization model for water quality management of a river system[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(7): 1088-1105.
- [12] 邓聚龙.灰色系统基本方法[M].武汉:华中科技大学出版社, 2001.[Deng Julong. Basic method of the grey system. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.]
- [13] Karmakar S, Mujumdar P P. An inexact optimization approach for river water-quality management[J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81(3): 233-248.
- [14] 丁进宝.倍斜率聚类法在环境质量综合评价中的应用[J].环境科学,1995,16(1):48-51,94.[Ding Jinbao. A new method for assessing environment quality: twice-slope classification. *Environmental Science*, 1995, 16(1): 48-51, 94.]
- [15] 宋焱,张勇,邱鹏华,等.基于倍斜率聚类法的湿地旅游景区水环境质量评价——以广州南沙湿地公园为例[J].安全与环境学报,2014,14(1):238-241. [Song Yan, Zhang Yong, Qiu Penghua, et al. Water environmental quality assessment for the wetland tourist areas based on the twice-sloping congregation-case of the Nansha Wetland Park in Guangzhou. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(1): 238-241.]
- [16] 刘晓彬.广州南沙地区地质条件与分布状况分析[J].广东土木与建筑,2009(3):43-45.[Liu Xiaobin. The geologic characteristics and distribution in Nansha area of Guangzhou. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2009(3): 43-45.]
- [17] 李英华,杨志峰,崔保山.广州南沙地区湿地生态特征现状分析[J].北京师范大学学报:自然科学版,2004,40(4):534-539. [Li Yinghua, Yang Zhifeng, Cui Baoshan. An analysis on the present wetland ecological characters of Nansha area in Guangzhou. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 2004, 40(4): 534-539.]
- [18] 林雪玲.广州市湿地植物群落特征与分布演替分析[J].防护林科技,2008(4):115-117,142.[Lin Xueling. Characteristics and distribution succession analysis of the wetland plant community in Guangzhou city. *Protection Forest Science and Technology*, 2008(4): 115-117, 142.]
- [19] Wang B S, Liang S C, Zhang W Y, et al. Mangrove flora of the world[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(6): 644-653.
- [20] 马喜生,南宣.南沙湿地游览区二期“五一”迎客[J/OL].<http://news.163.com/13/0423/09/8T4U30J800014AED.html>, 2013-04-23.[Ma Xisheng, Nan Xuan. Nansha wetland's sight-seeing district II opened in May Day. <http://news.163.com/13/0423/09/8T4U30J800014AED.html>, 2013-04-23.]
- [21] 徐越,郑晓彤,金佩欣,等.国家新区南沙湿地旅游资源生态效益探讨[J].广东农业科学,2013(17):189-192. [Xu Yue, Zheng Xiaotong, Jin Peixin, et al. Discussion for ecological benefits of Nansha wetland eco-tourism resources in National new district. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2013(17): 189-192.]
- [22] 彭燕梅.南沙新区五一期间接待游客超82万人次[J/OL].<http://www.gd.chinanews.com/2013/2013-05-06/2/247080.shtml>, 2013-05-06. [Peng Yanmei. Nansha new district receives the tourist over 820 000 during the May Day. <http://www.gd.chinanews.com/2013/2013-05-06/2/247080.shtml>, 2013-05-06.]
- [23] 徐恒振,尚龙生,周传光.海水水质评价的倍斜率隶属函数聚类法[J].海洋环境科学,1996,15(2):23-27. [Xu Hengzhen, Shang Longsheng, Zhou Chuanguang. A method for assessment on seawater quality of the membership function of the twice-slope classification. *Marine Environmental Science*, 1996, 15(2): 23-27.]
- [24] 崔伟中.珠江河口水环境时空变异对河口生态系统的影响[J].水科学进展,2004,15(4):472-478.[Cui Weizhong. Impact of temporal and spatial variation of water environment on ecosystem of the Pearl River estuary. *Advances in Water Science*, 2004, 15(4): 472-478.]
- [25] 张配吉,南宣.南沙投8000万整治河涌[J/OL].<http://news.sina.com.cn/c/2009-01-10/040915009784s.shtml>, 2009-01-10.[Zhang Peiji, Nan Xuan. It costs 80 million to renovate the rivers in Nansha. <http://news.sina.com.cn/c/2009-01-10/040915009784s.shtml>, 2009-01-10.]

Time and Space Differences of Water Environmental Quality of the Mangrove Wetland Park in Nansha:Based on the Improved Twice-slope Clustering Method

Song Yan^{1,2}, Xu Songjun¹, Liu Xianzhao², Zhang Yong², Qiu Penghua³, Niu Anyi¹, Xu Guanchang¹

(1. College of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, Guangdong, China; 2. Department of Geography Science, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 3. College of Geography and Tourism, Hainan Normal University, Haikou 571158, Hainan, China)

Abstract: This study constructs the wider twice-slope clustering membership functions of the clustering index — dissolved oxygen (DO), based on the nondimensionalization of the monitoring results of water environment and the pollution classification standard. The physical chemistry indexes (e.g., temperature, pH, DO, COD, BOD₅, TP and TN) of eight sampling sites were measured in the Nansha Mangrove Wetland Park I, II and the brook nearby at the abundant, medium and dry seasons in 2007 and 2014. The comparison of the monitoring and evaluation results of the eight sampling points in 2007 and 2014 shows the following findings: on the whole, the water quality in the study area is in the health or sub-health state (level II – III or level II – IV). Since its opening to outside as a tourist scenic spot, the Mangrove Wetland Park I has shown some changes in the indexes of water environment in 2008-2014. The monitoring results demonstrate that the change in pH is very small. At the same time, the DO has decreased, while the BOD₅ has increased. A decrease is also observed in the COD content, by contrast, the TP and TN contents have shown a trend of increase. In 2007, the water quality of the sampling points W1, W2 and W3 in the Nansha Mangrove Wetland Park I was better than that of the sampling points W7 and W8 in the brook. The water quality of the sampling points W7 and W8 in the brook was better than that of the sampling points W4, W5 and W6 in the Nansha Mangrove Wetland Park II. In 2014, the water quality of the sampling points W4, W5 and W6 showed a dramatic improvement and was better than that of the sampling points W1, W2 and W3 in the Nansha Mangrove Wetland Park I and the sampling points W7 and W8 in the brook. Among the eight sampling sites, W6 in the Nansha Mangrove Wetland Park II showed the greatest improvement, while the sampling point W3 in the Nansha Mangrove Wetland Park I observed the greatest declining in water quality. Although the water quality of the brook was improved at abundant season in 2014, the water quality of the Mangrove Wetland Park, at either abundant or dry seasons, is at least not less than and in most cases superior to the water quality of the brook. The general rule of the time and space differences of the water environmental quality in the study area is that the water quality of the Mangrove Wetland Park II has been improved, while that of the Mangrove Wetland Park I shows declining a trend in 2007-2014.

Key words: twice-slope clustering method; water environmental quality assessment; mangrove wetland tourist area; time and space differences; Guangzhou Nansha