

◆海洋生态◆

粤东南澳岛近岸海域表层沉积物碳、氮、磷分布特征及污染评价^{*}义家吉,王万虎^{**},王洋,万晓明,王红兵,冯科聪

(中国地质调查局海口海洋地质调查中心,海南海口 570100)

摘要:本研究旨在了解粤东南澳岛近岸海域表层沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的分布情况及污染状况,为该海域环境保护和治理提供科学依据。实验以粤东南澳岛近岸海域32个表层沉积物样品为研究对象,分析其TOC、TN和TP的含量及分布特征,采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对TOC、TN和TP的污染程度进行评价,基于表层沉积物中TOC和TN的摩尔比值探讨其有机质的来源,并在此基础上探讨表层沉积物中TOC、TN和TP的富集影响因素。研究表明,南澳岛近岸海域表层沉积物中TOC、TN和TP含量分别为0.180%–0.920%、0.006%–0.210%和0.015%–0.059%,表现出南澳岛南北两侧高、东西两侧低,南澳岛以东由岸及海,含量逐渐降低的分布特征;与国内相邻海域相比,南澳岛近岸海域表层沉积物TOC、TN和TP含量处于较低水平。根据TOC和TN摩尔比值推断,南澳岛近岸海域表层沉积物中有机质以海源和陆源混合输入为主。南澳岛近岸海域表层沉积物未受TOC和TP污染,但大部分区域受到TN污染;40.6%的表层沉积物处于较清洁及以上水平,59.4%的表层沉积物为轻度污染到中度污染状态,未发现重度污染情况。南澳岛近岸海域表层沉积物中TOC、TN和TP的含量水平主要受水动力、粒径以及人为因素影响,人为因素主要为渔业养殖和陆源排污。

关键词:南澳岛近岸海域 表层沉积物 总有机碳 总氮 总磷 分布规律 污染评价 影响因素

中图分类号:P736 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)05-0871-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20221116.007

海洋沉积物是众多海洋生物的栖息地,是海洋生态系统重要组成部分,近海沉积物富集了大量的营养元素,在一定条件下可以成为水体的营养源^[1]。碳

(C)、氮(N)、磷(P)作为沉积物中重要的表征元素,常被用于评价环境质量^[2,3]。开展近海沉积物中总有机碳(TOC)、总氮(TN)和总磷(TP)的含量以及分布

收稿日期:2021-07-01

修回日期:2021-08-09

^{*} 中国地质调查局“海洋与海岸带地质调查”二级项目“潮汕海岸带综合地质调查”(DD20208013)资助。

【作者简介】

义家吉(1990-),男,在读研究生,主要从事海洋与海岸带综合地质调查研究,E-mail:jiajiyihk@sina.com。

【**通信作者】

王万虎(1991-),男,工程师,主要从事海洋与海岸带综合地质调查研究,E-mail:wwh262242wwh@163.com。

【引用本文】

义家吉,王万虎,王洋,等. 粤东南澳岛近岸海域表层沉积物碳、氮、磷分布特征及污染评价[J]. 广西科学,2022,29(5):871-880.

YI J J, WANG W H, WANG Y, et al. Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Surface Sediments of Nan'ao Island, Eastern Guangdong Province [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(5): 871-880.

规律研究,对判定海洋初级生产力、有机质的来源、有机物污染状况等具有十分重要的意义^[4]。海洋沉积物同时也是重要的储碳库,有机质是海洋沉积物有机碳库的重要组成部分,明确海洋沉积物中有机质的来源和组成,有利于评估海洋沉积物在整个海洋碳收支中的作用,对于扩增海洋碳汇研究有重要意义^[5]。

南澳岛是粤东地区著名的旅游胜地和海水养殖区,地处闽粤交界,位于台湾海峡的西南口,北回归线从其北域通过。独特的地理位置使得南澳岛近岸海域成为水流缓和区,西侧韩江的汉流外砂河、莲阳河以及义丰溪等河流携带的大量陆源物质在此沉积^[6],使得该地区营养物质丰富,生物种类多样,渔业发达。随着社会发展,养殖业和旅游业的无序扩张对南澳岛近岸海域海洋环境产生了一定程度的负面影响,沉积物受到不同程度的污染。陈实等^[7]在2009年开展的研究表明,南澳岛北侧近岸沉积物在大规模的渔业养殖活动影响下受到了不同程度的污染;毛洁等^[8]在2010年的研究显示,南澳岛白沙湾养殖区内沉积物 TN 含量整体上已达到 II 类污染水平,部分沉积物 TP 含量达到 II 类污染水平。已开展的研究重点集中在南澳岛北侧的养殖区内^[7,8],其他区域的研究报道较少,几近空白。此外,已有的研究在时空尺度、评价方法上存在差异,不同的研究成果难以相互比较,导致南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的污染状况一直缺乏全面系统的调查评估。本文以2020年7月在粤东南澳岛近岸海域采集的32个表层沉积物样本为研究对象,分析表层沉积物中 TOC、TN、TP 的含量分布情况及其影响因素,评价 TOC、TN 和 TP 的污染状况,探讨表层沉积物中有机质的主要来源,拟为当地海洋环境保护和治理提供依据,同时为海洋碳汇扩增相关研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2020年7月在粤东南澳岛近岸海域设置32个表层沉积物采样站位,站位分布如图1所示。采用蚌式抓斗取样器抓取表层0-5 cm沉积物,用样品封口袋封装,避光冷藏待测。测试分析的项目有 TOC、TN、TP 和粒度。

1.2 样品分析与测定

TP 的测定采用钼锑抗分光光度法,使用 En-Spire 多功能酶标仪(美国 PerkinElmer 公司)和 SXL-1030 马弗炉(上海精宏实验设备有限公司)共同

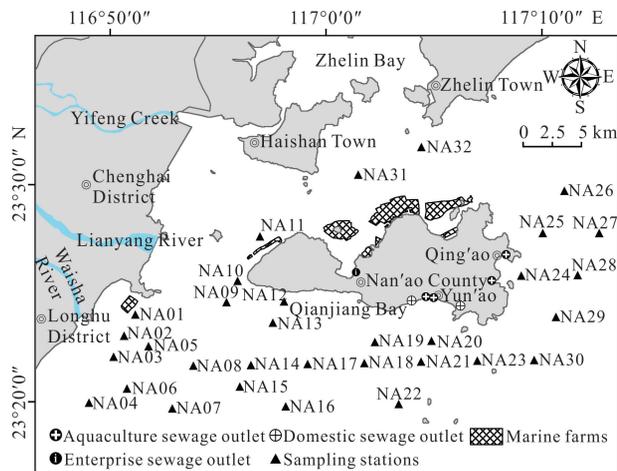


图1 采样站位、海上养殖场和主要排污口分布

Fig. 1 Distribution of sampling stations, marine farms and main sewage outlets

完成检测,其前处理和测试使用欧洲标准测试测量委员会推荐的沉积物磷形态分离法(SMT)。称取200 mg样品过筛后放入瓷坩埚中,置于马弗炉在450℃条件下灼烧3 h,冷却后小心倾倒至离心管,将20 mL 3 mol/L 盐酸提取液用滴定管分次加入坩埚中转移样品并润洗,直至全部转入离心管。将离心管平放固定于恒温振荡培养箱中,25℃、200 r/m 振荡16 h,结束后立即用离心机在5 000 r/min 条件下离心15 min。取上清液用0.45 μm 水系滤膜过滤,然后适当稀释后使用钼锑抗分光光度法显色,在700 nm 波长下测定吸光值。每次测试均以磷酸二氢钾标液建立工作曲线,以此计算得到沉积物 TP 的含量。

TN 和 TOC 使用 Elementar vario MACRO cube 型元素分析仪,采用动态闪烧-色谱分离法测定。样品经前处理后分为两部分:一部分不经酸处理,将冻干样品研磨过筛后保存于干燥器中待分析;另一部分经过酸处理,于滤纸上称取1 g 样品置于漏斗坩埚,用1 mol/L 盐酸反复冲洗样品去除无机碳,直至无气泡产生并静置过夜,随后用去离子水反复冲洗去除残留的酸,并将样品低温烘干,称重计算处理过的样品质量以获得样品处理前后的比例,并将样品研细保存于干燥器中待分析。样品前处理完成后及时上机测试,称取一定质量的待测样品(10-50 mg,视含量高低而定),使用元素分析仪分别测定酸处理和未经酸处理的样品中 N 和 C 的含量。其中未经酸处理样品中 N 的含量即为沉积物 TN 含量,经酸处理样品中 C 的含量为沉积物 TOC 含量。

粒度分析使用 Mastersizer-3000 型激光粒度仪进行测量。仪器测量限值为0.01-3 500 μm,测量

准确度和重复性优于 0.5%。首先将数克沉积物样品置入玻璃杯中,加纯净水,再加入 0.5 mol/L 六偏磷酸钠 5 mL,浸泡样品 24 h,每隔 8 h 轻轻搅拌 1 次,使样品充分分散;然后将浸泡样品全部倒入激光样槽中,超声振动、高速离心,使样品再次充分分散;最后测定粒度质量分数。

所有样品测定均由中国地质大学(武汉)地质调查实验中心完成,TOC、TN 和 TP 的含量分别以占干沉积物总量的质量百分数表示。采用国家标准近海沉积物样品(GBW07314)进行样品测定质量控制,每个样品测定 3 次,计算标准偏差,标准偏差均小于 2%,表明分析数据可靠。

1.3 分析与评价

1.3.1 数据处理与分析

应用 SPSS 24.0 软件对调查数据进行多元统计分析;应用 Arcgis 10.6 和 Origin 8.0 软件对相关数据进行作图,应用反距离权重法绘制各要素等值分布图;海上养殖区和主要排污口的分布来源于遥感解译和实地调查;表层沉积物中 TOC 与 TN 摩尔比值用公式(1)进行计算。

$$M = \frac{C_{\text{TOC}} \times M_{\text{TN}}}{C_{\text{TN}} \times M_{\text{TOC}}}, \quad (1)$$

式中, M 为表层沉积物中 TOC 和 TN 的摩尔比值, C_{TOC} 为表层沉积物中 TOC 的实测值, C_{TN} 为表层沉积物中 TN 的实测值, M_{TOC} 、 M_{TN} 分别为 TOC、TN 的摩尔质量。

1.3.2 污染评价

对于沉积物污染评价目前业内尚未统一标准和方法,因此本研究拟采用行业目前通行的两种沉积物污染评价方法——单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[9,10]对研究区表层沉积物质量进行评价。

(1)单因子污染指数法。

单一污染因子的标准指数计算公式如下:

$$P_i = C_i / C_s, \quad (2)$$

式中, P_i 为单一污染因子标准指数, C_i 为评价因子 i 的实测值, C_s 为评价因子 i 的评价标准值。TOC 评价标准值采用《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)中的一类标准限值;但由于国家标准《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)仅对 TOC 含量评价标准做出了规定,前人对 TN 和 TP 的评价多参照加拿大安大

略省环境和能源部制定的沉积物质量评价指南,因此本研究 TN 和 TP 的评价标准值也采用该指南中的一类标准限值^[11]。TOC、TN 和 TP 的评价标准值分别为 0.055%、0.060% 和 2%。以单因子污染指数 1.0 作为界定该因子是否对环境产生污染的基本界线。

(2)内梅罗综合污染指数法。

采用内梅罗综合污染指数法对研究区表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的综合污染状况进行评价,计算方法见公式(3)。

$$P = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i\right)^2}{2}}, \quad (3)$$

式中, P 为内梅罗综合污染指数, P_i 为单一污染因子标准指数, P_i 计算见公式(2), P_{max} 为表层沉积物指标中最大的污染分指数。内梅罗综合污染指数与污染程度的对应关系参照文献^[9],如表 1 所示。

表 1 内梅罗综合污染指数与污染程度的关系^[9]

Table 1 Relationship between Nemerow comprehensive pollution index and pollution degree^[9]

P	表层沉积物质量等级 Surface sediment quality grade	污染程度 Pollution degree
$P \leq 0.7$	I	Clean
$0.7 < P \leq 1$	II	Relatively clean
$1 < P \leq 2$	III	Light pollution
$2 < P \leq 3$	IV	Moderate pollution
$P > 3$	V	Heavy pollution

2 结果与分析

2.1 南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN、TP 及粒径的分布规律

南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC 含量为 0.180% - 0.920%,平均值为 0.560%。从 TOC 的分布规律来看,外砂河入海口近岸海域、南澳岛北部柘林湾湾口、东部青澳湾以及外砂河口近岸海域均有一个高值区,含量为 0.540% - 0.920%;低值区位于南澳岛西部狭长水道内以及东南侧远岸海域,含量为 0.180% - 0.420%,呈北东 - 南西向展布[图 2(a)]。

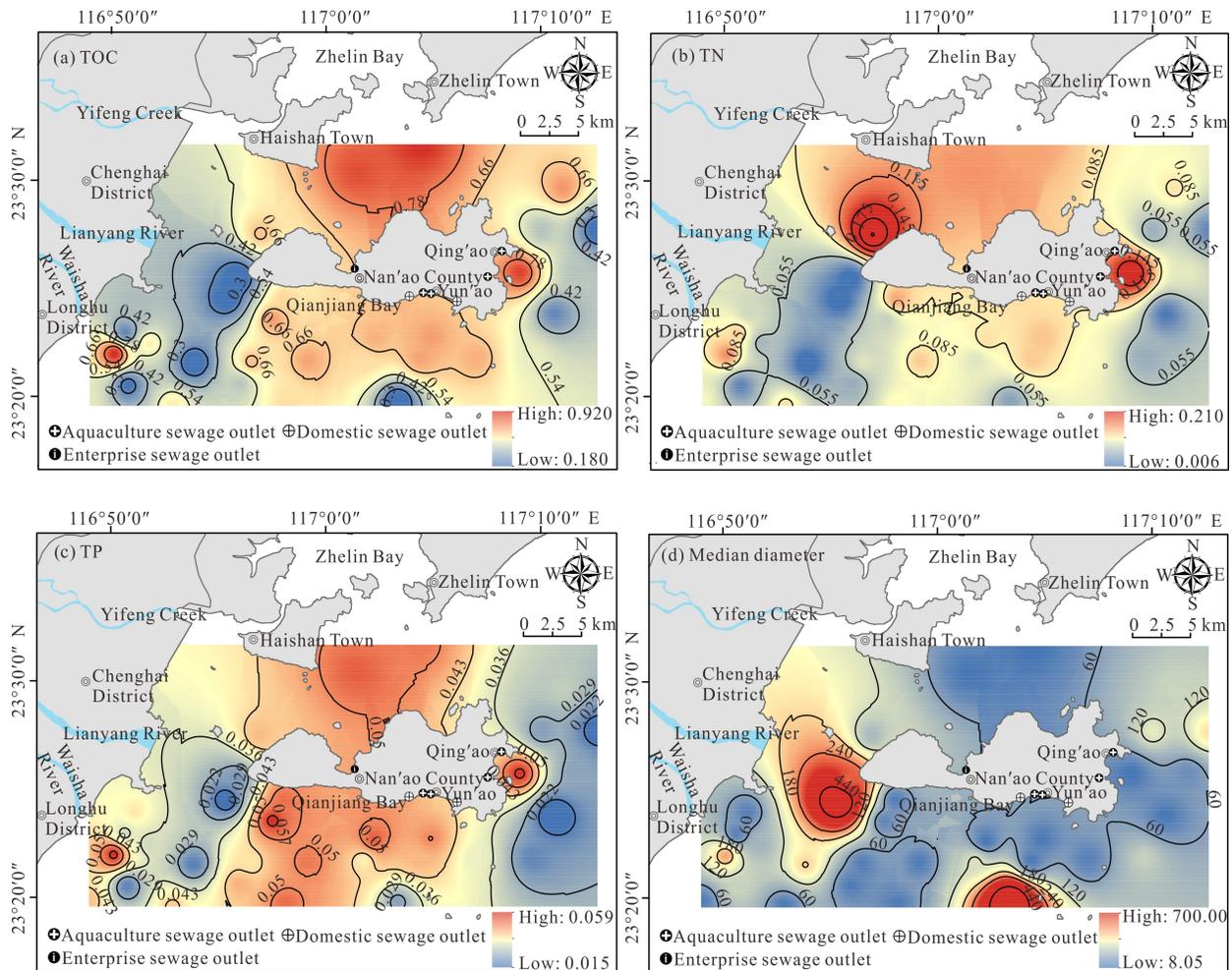


图2 南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 及中值粒径分布

Fig. 2 Distribution of TOC, TN, TP and median particle size in surface sediments from Nan'ao Island coastal area

南澳岛近岸海域表层沉积物 TN 含量为 0.006% - 0.210%，平均值为 0.073%。低值区域位于南澳岛东部远岸海域和莲阳河入海口近岸海域，含量为 0.006% - 0.055%。高值区域有两个，位于研究区西北部养殖区以及东部青澳湾近岸海域，含量均为 0.115% - 0.210%，其他区域含量为 0.055% - 0.115% [图 2(b)]。

南澳岛近岸海域表层沉积物 TP 含量为 0.015% - 0.059%，平均值为 0.039%。TP 分布规律与 TOC 相似，高值区位于外砂河入海口近岸海域、南澳岛北部柘林湾湾口、东部青澳湾以及南部前江湾、云澳湾近岸海域，含量为 0.044% - 0.059%；低值区位于南澳岛西部狭长水道内以及东侧远岸海域，含量为 0.015% - 0.036%；其他区域含量为 0.036% - 0.044% [图 2(c)]。

研究区表层沉积物中值粒径为 8.05 - 700.00 μm [图 2(d)]，研究区表层沉积物类型主要为含砾中

粗砂、中细砂、中砂质细砂、粉质细砂、砂泥质粉砂、泥质粉砂等^[12]。研究区西部韩江入海口近岸区域以砂质堆积为主，莲阳河、义丰溪入海口处主要为粉质细砂，少部分为含砾中粗砂，中值粒径为 120.00 - 700.00 μm ；南澳岛北侧柘林湾外湾以及东侧青澳湾近岸海域水动力条件较弱，主要沉积较细粒的泥质粉砂，中值粒径为 8.05 - 60.00 μm ；南澳岛南侧近岸海域以砂泥质粉砂为主，中值粒径为 8.05 - 120.00 μm ，远岸以含砾中粗砂为主，中值粒径为 120.00 - 700.00 μm 。

研究区表层沉积物 TOC、TN 和 TP 含量分布特征相似，总体上表现为南澳岛南北两侧高于东西两侧近岸海域；在南澳岛以东由岸及海，表层沉积物 TOC、TN 和 TP 含量逐渐降低；同时养殖区表层沉积物 TOC、TN 和 TP 含量普遍高于非养殖区，表层沉积物粒径小的区域普遍高于粒径大的区域，排污口附近海域普遍高于其他区域。与国内邻近海域比较

(表2),研究区表层沉积物 TOC、TN 和 TP 含量处于较低水平。其中,与南澳岛养殖区相比,研究区 TN 含量与其相当,但是 TOC 和 TP 含量要明显低于养殖区;与位于研究区北部的柘林湾养殖区和珠江口桂山岛近岸海域相比,研究区 TOC、TN 和 TP 含量远远低于这两个区域;与离岸较远的南黄海相比,研究区 TOC、TN 和 TP 含量则处于一个相对高的水平。柘林湾养殖区的养殖规模更大、开始时间更早,而桂山岛近岸海域位于人类活动强烈、交通运输发达

的珠江口区域,这些区域渔业养殖和交通运输等人类活动强度均高于研究区。再者,离岸较远的南黄海区域,人类活动强度也低于研究区。因此,研究区表层沉积物中 TOC、TN、TP 含量低于南澳岛养殖区、人类活动更强烈的柘林湾养殖区以及桂山岛近岸海域,高于人类活动强度较弱的南黄海区域,表明人类活动对沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量有较大影响,不容忽视。

表2 南澳岛近岸海域与相邻海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量比较

Table 2 Comparison of TOC, TN and TP content in surface sediments between coastal and adjacent sea area of Nan'ao Island

研究区域 Study area	样品采集时间(年) Sample collection time (Year)	TOC (%)	TN (%)	TP (%)	参考文献 References
Nan'ao Island coastal area	2020	0.180 - 0.920(0.560)	0.006 - 0.210(0.073)	0.015 - 0.059(0.039)	This paper
Aquaculture area of Nan'ao Island	2009 - 2010	0.815	0.030 - 0.084(0.066)	0.037 - 0.087(0.047)	[7,8]
Western Guangdong Waters	2006 - 2007	0.740	0.160	0.024	[13]
Yangtze Estuary	2015	0.56	0.034	0.041	[14]
Jiaozhou Bay	2017	0.340 - 1.340(0.820)	0.050 - 0.130(0.090)	0.060 - 0.150(0.120)	[15]
Middle of Bohai Sea	2015	0.210 - 1.430(0.850)	0.010 - 0.120(0.060)	0.010 - 0.040(0.030)	[16]
Dongshan Bay of Fujian	2016	1.120 - 1.380(1.240)	0.160 - 0.210(0.190)	0.050 - 0.074(0.063)	[17]
Daya Bay	2006	0.780 - 1.690(1.050)	0.310 - 0.450(0.370)	0.033 - 0.047(0.043)	[18]
Zhelin Bay aquaculture area	2008	0.380 - 1.280(1.090)	0.040 - 0.250(0.190)	0.020 - 0.060(0.050)	[19]
Guishan Island coastal area	2009	1.170 - 1.850(1.460)	0.130 - 0.170(0.160)	0.030 - 0.190(0.080)	[19]
Southern Yellow Sea	2007	0.480	0.067	0.024	[20]

Note: Values before parentheses are content ranges and values within parentheses are average

2.2 南澳岛近岸海域表层沉积物有机质来源分析

海洋沉积物中的有机质主要来源于海源输入和陆源输入两种方式,海源输入是指以海洋藻类为主的浮游生物死亡后沉降的有机质输入,而陆源输入是指以地表径流裹挟的、以陆地植物和人类活动释放为主的有机质输入。由于海洋中浮游生物富含蛋白质, C/N 较低;而陆地植物富含纤维素,蛋白质含量较低,细胞内 C/N 较海洋浮游植物更高^[21],因此沉积物中有机质的来源可以通过沉积物中 TOC 与 TN 的摩尔比值(TOC/TN)来判定。沉积物中 TOC/TN 为 4 - 8 时,海洋沉积物中的有机质以海源输入为主,在 12 以上时以陆源输入为主,在 8 - 12 时则为海源和陆源的混合输入^[22]。研究区表层沉积物中 TOC/TN 为 3.70 - 36.70 [图 3(a)],平均值为 11.73,说明研究区表层沉积物中有机质以海源和陆源的混合输入为主。南澳岛西部韩江入海口近岸海域和南澳岛东南部青澳湾外湾两个区域表层沉积物中 TOC/TN 大于 12 [图 3(b)],说明这两个区域表层沉积物

有机质来源以陆源输入为主,可能的原因是韩江每年向海域输送大量的泥沙,这些泥沙堆积在韩江入海口附近^[23],使得该区域沉积物主要受到来自韩江来沙裹挟的陆源物质影响;另一方面是南澳岛附近海域底层海流终年向北,韩江的汉流外砂河、莲阳河以及义丰溪等河流携带的大量陆源物质在底层海流作用下,自南向北运移,由于海湾岬角的阻隔,在南澳岛最东侧青澳湾,湾外更容易受到来自大陆的陆源携带物的影响^[24-26]。外砂河入海口近岸、南澳岛西北侧近岸、南侧远岸海域以及青澳湾湾口表层沉积物中 TOC/TN 小于 8,这些区域大部分位于养殖区以及养殖排污口附近或离岸较远。离岸较远的区域远离陆源物质影响,而养殖区内人为投放大量饵料且饵料多为各种杂鱼以及鱼粉,可能是上述区域表层沉积物有机质来源于海洋的主要原因之一^[7]。外砂河口近岸区域沉积物主要来源于外砂河径流来沙和海洋潮流携沙,潮流携沙主要表现为由海向岸运移^[27]。近年来在人类活动的影响下,韩江入海输沙量急剧减少,2006 -

2012年的总减沙量为 $3\,215.19 \times 10^4$ t, 年均减沙量为 459.32×10^4 t^[28]。外砂河作为韩江第二大的泄洪排沙通道, 分砂占比达到 31%^[29], 外砂河径流来沙相应减少, 导致该区域陆源物质来源减少, 沉积物净输运趋势表现为由海向岸运移, 这与陈瀚等^[12]的研究结果一致。陆源物质来源减少, 沉积物由海向岸运移, 可能是该区域表层沉积物中有机质海源贡献较高的原因之一。

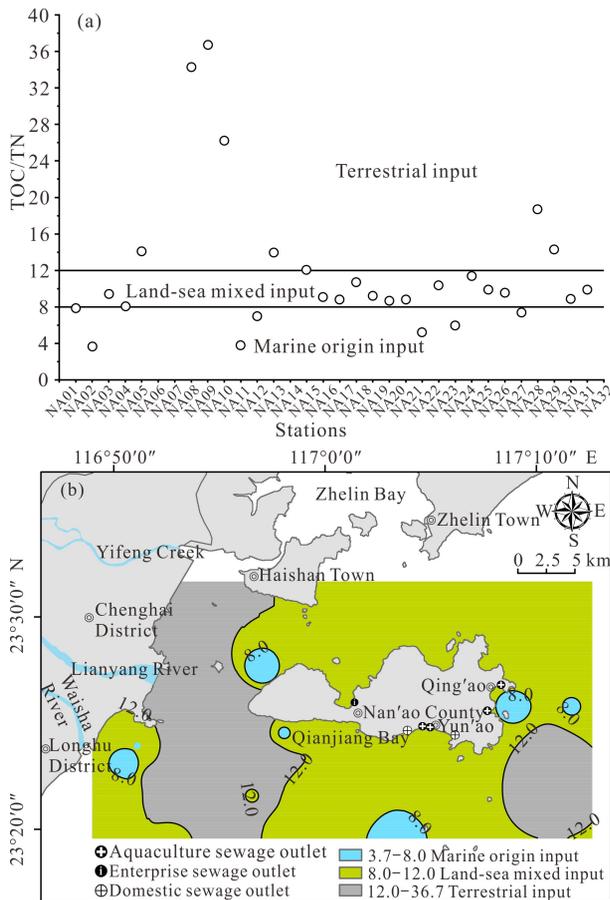


图3 南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC/TN 分布

Fig. 3 Distribution of TOC/TN in surface sediments from Nan'ao Island coastal area

2.3 南澳岛近岸海域表层沉积物污染状况评价

2.3.1 单因子污染状况评价

如图4所示, 32个站位表层沉积物 TN 的单因子污染指数为 0.12 - 3.74, 平均值为 1.34, 其中有 21 个站位污染指数大于 1.0, 超标率为 65.6%, 这表明研究区表层沉积物受 TN 污染比较严重, 有一定生态风险; TP 的单因子污染指数为 0.25 - 0.98, 平均值为 0.66; TOC 的单因子污染指数为 0.06 - 0.46, 平均值为 0.28。所有站位 TP 和 TOC 单因子污染

指数均小于 1.0, 表明研究区表层沉积物未受 TOC 和 TP 污染, 生态风险较小。

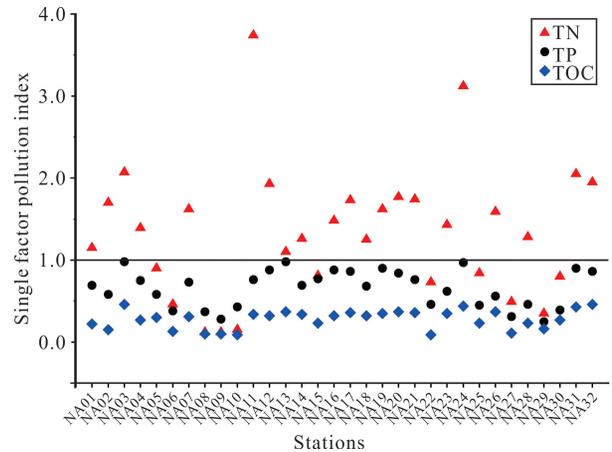


图4 南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 单因子污染指数分布

Fig. 4 Distribution of single factor pollution index of TOC, TN and TP in surface sediments from Nan'ao Island coastal area

2.3.2 综合污染状况评价

如图5(a)所示, 研究区表层沉积物内梅罗综合污染指数为 0.23 - 2.88, 平均值为 1.10, 说明该区域表层沉积物大部分为轻度污染状态。其中, 有 8 个站位内梅罗综合污染指数小于 0.70, 占比 25.0%, 为清洁状态; 5 个站位内梅罗综合污染指数为 0.70 - 1.00, 占比 15.6%, 为较清洁状态; 17 个站位内梅罗综合污染指数为 1.00 - 2.00, 占比 53.1%, 为轻度污染状态; 2 个站位内梅罗综合污染指数为 2.00 - 3.00, 占比 6.3%, 为中度污染状态, 研究区内无重度污染区域。清洁和较清洁区域主要位于莲阳河入海口远岸海域和南澳岛东南侧的远岸区域[图5(b)]; 轻度污染区主要位于南澳岛南北两侧以及外砂河、莲阳河入海口近岸海域; 中度污染区域有两个, 位于南澳岛西北侧渔业养殖区内和青澳湾湾口。

2.4 南澳岛近岸海域沉积物 TOC、TN、TP 含量和分布特征的影响因素

海洋沉积物中 TOC、TN、TP 的含量和分布特征受到物质来源、沉积物粒径、沉积环境、沉积区域的水文条件和以农业养殖、交通运输和工业生产为主的人类活动等多种因素的影响^[30-32], 本研究从沉积物粒径、水动力环境以及人类活动 3 个方面探讨其影响机制。

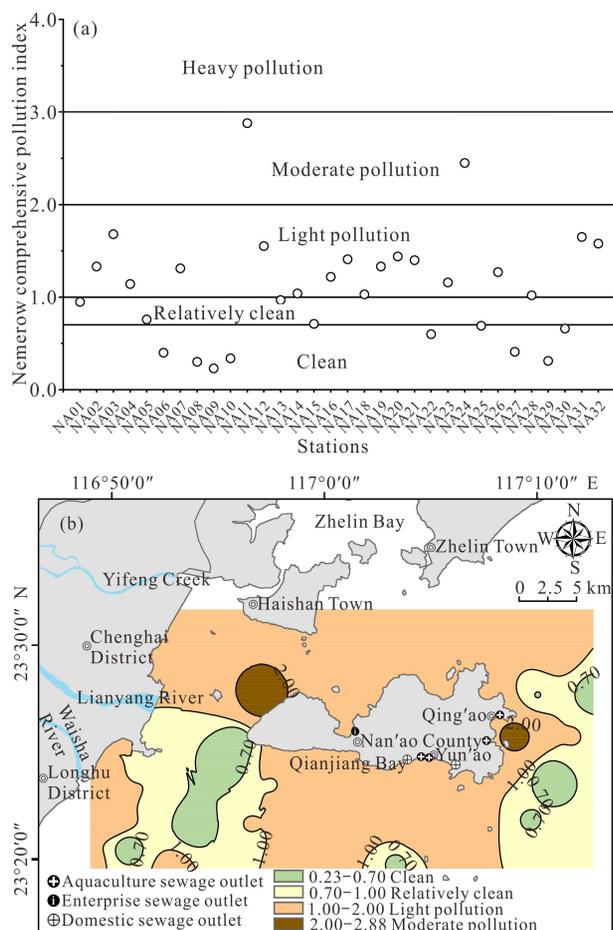


图5 南澳岛近岸海域表层沉积物内梅罗综合污染指数分布

Fig. 5 Distribution of Nemerow comprehensive pollution index in surface sediments from Nan'ao Island coastal area

2.4.1 沉积物粒径

沉积物粒径作为沉积物最基本的理化特征,它是沉积物中生源要素在动力沉积过程中最重要的影响因素^[33]。对研究区表层沉积物中值粒径与 TOC、TN、TP 含量进行 Pearson 相关性分析,结果表明中值粒径与 TN 含量呈显著的负相关关系($P < 0.05$),相关系数为 -0.421 ;与 TP 和 TOC 含量呈极显著的

负相关关系($P < 0.01$),相关系数分别为 -0.485 和 -0.534 (表 3)。上述结果表明,研究区内表层沉积物粒径越小,TOC、TN 和 TP 含量越高,其主要原因是表层沉积物粒径越小,其比表面积越大,吸附能力越强^[31],TOC、TN 和 TP 含量越高,反之则含量越低。

2.4.2 水动力环境

研究区水动力环境主要受陆域径流、沿岸流、台湾暖流、黑潮影响。水动力较强的区域位于南澳岛与韩江入海口之间,涨、落潮流平均流速分别为 0.56 m/s、 0.30 m/s,最大流速为 1.07 m/s,而研究区南北两侧近岸海域由于受众多岛礁影响,水动力条件较弱^[34]。结合研究区表层沉积物 TOC、TN 和 TP 含量的分布特征来看,水动力较强的区域,表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量较其他区域低,水动力较弱的区域含量则较其他区域高,形成这种现象的主要原因有两方面。

一方面是水动力引起的沉积物再悬浮,泥沙在近底潮流速大于 0.40 m/s 时就容易被再悬浮,水动力越强,沉积物再悬浮越剧烈^[35],再悬浮过程中的一系列物理化学反应导致沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量发生改变。其一是再悬浮过程中沉积颗粒物中的 N 从还原性相对强的沉积物中进入氧化性相对较高的水体中,由于硝化速率大于反硝化速率,造成部分 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 形式的 N 释放到水体中,导致沉积物中 TN 含量较低^[36]。其二是在沉积物再悬浮过程中 P 的释放和吸收作用是同时存在的,何种作用为主取决于上覆水中磷酸盐的浓度及扰动强度等因素^[37,38],扰动强度越大、上覆水中的磷酸盐浓度越低越有利于沉积物中磷酸盐的释放,反之则有利于吸附^[39]。研究区大部分海水中活性磷酸盐浓度长期处于 II 类海水水质以上水平,含量小于 0.30 mg/L,处

Table 3 Correlation analysis between median grain size and TOC, TN, TP, Nemerow comprehensive pollution index of surface sediments in study area

类型 Types	中值粒径 Median diameter	TN	TP	TOC	内梅罗综合污染指数 Nemerow comprehensive pollution index
Median diameter	1	-0.421^*	-0.485^{**}	-0.534^{**}	-0.414^*
TN		1	0.725^{**}	0.749^{**}	0.998^{**}
TP			1	0.833^{**}	0.744^{**}
TOC				1	0.757^{**}
Nemerow comprehensive pollution index					1

Note: * indicates significant correlation at 0.05 level (two-sided test), ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level (two-sided test)

于一个较低的水平^[40]。再悬浮过程中,水动力强的区域扰动强度大,而水体中活性磷酸盐浓度较低,活性磷酸盐的释放作用大于吸附作用,导致 TP 含量较低。其三是再悬浮过程中由于大量颗粒物再悬浮,细菌分解有机质的能力加强,导致沉积物中 TOC 含量减少^[36]。

另一方面是在水动力较弱的区域,表底层水交换能力弱,底层水体温度常年较低,形成一个还原性的沉积环境,使得该区域的有机质更易于被沉积物保存^[41,42],含量水平高于其他;而水动力较强的区域,表底层水交换频繁,底层水温相对较高,随着温度的升高,硝化细菌活性增强,底栖生物活动加快,生物扰动作用增强,沉积物中不同形态的无机氮释放作用加强^[43],导致沉积物中 TN 含量较低。

2.4.3 人为因素

南澳岛是粤东地区著名的旅游胜地、天然的海滨浴场,同时也是粤东地区著名的海水养殖区。自 20 世纪 80 年代起,南澳岛北侧近岸海域开始人工养殖石斑鱼等优质海产品,至 2020 年,南澳县水产品总产量达 1.92×10^5 t,渔业产值 2.04 亿元,渔业养殖面积居于全市前列^[44]。近年来由于旅游业快速发展,岛上的青澳湾等地建有许多度假村、酒店和餐厅,渔业活动和旅游开发均对近岸海域环境造成了一定影响。一方面因渔业养殖活动投放大量的饵料,造成大量含 C、N、P 营养元素的残饵以及鱼类的排泄物进入水体^[7];另一方面,酒店餐厅向海洋中排放大量富含营养性污染物的生活污水,导致该海域海水中含 C、N、P 等元素的营养物质含量升高,这些营养物质经过一系列的物理化学反应后被保存在表层沉积物中,导致渔业养殖区内和青澳湾湾口表层沉积物中的 TOC、TN 和 TP 含量较高。

3 结论

南澳岛近岸海域表层沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量主要受水动力条件、沉积物粒径、渔业养殖以及陆源排污等人类活动影响,含量的平均值分别为 0.560%、0.073%、0.039%,外砂河入海口近岸海域、南澳岛青澳湾以及南北两侧海域是 TOC、TN 和 TP 的主要富集区。与国内临近海域相比,南澳岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的含量处于较低水平。南澳岛近岸海域大部分区域表层沉积物中有机质以海源和陆源混合输入为主,养殖区及养殖排污口附近和远岸海域表现为海源输入为主,在入海河流泥

沙沉积区则表现为以陆源输入为主。单因子污染指数评价结果表明,南澳岛近岸海域表层沉积物未受 TOC 和 TP 污染,但有 65.6% 的站位表层沉积物受到 TN 污染,且污染程度较高。综合污染评价结果表明,南澳岛近岸海域表层沉积物大部分为轻度污染状态,其中 40.6% 的站位为较清洁及以上水平,59.4% 的站位为轻度污染到中度污染水平,中度污染的区域有两个,分别位于南澳岛西北侧渔业养殖区内和青澳湾湾口,没有重度污染区域。

参考文献

- [1] 岳维忠,黄小平. 近海沉积物中氮磷的生物地球化学研究进展[J]. 台湾海峡, 2003, 22(3): 407-414.
- [2] 张辉. 黄东海沉积物中营养盐分布及交换通量研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [3] 吕桂才,张哲,王江涛,等. 山东南部近海沉积物中碳、氮、磷的分布特征[J]. 海洋科学, 2010, 34(9): 1-4.
- [4] 刘军,臧家业,冉祥滨,等. 乳山湾外低氧海域沉积物中有机碳、氮、磷及其形态特征分析[J]. 海洋科学, 2012, 36(7): 70-78.
- [5] 赵美训,丁杨,于蒙. 中国边缘海沉积有机质来源及其碳汇意义[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(9): 70-76.
- [6] 孙金龙,徐辉龙,吴鹏,等. 粤东南澳-澄海海域晚第四纪沉积特征和沉积环境演变[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(3): 30-36.
- [7] 陈实,乔永民,侯磊,等. 汕头南澳海域表层沉积物氮、磷的形态分布及污染评价[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(3): 128-133.
- [8] 毛洁,杨宇峰,谷阳光,等. 汕头南澳养殖区表层沉积物中生源要素的分布及其污染评价[J]. 生态科学, 2012, 31(3): 252-258.
- [9] 褚瑶瑶,张艳,崔正国,等. 威海近海人工鱼礁区沉积环境要素的时空分布与沉积物质量评价[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 99-105.
- [10] 潘雄,顾文俊,李欢,等. 洪湖沉积物碳氮磷分布特征及污染评价[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 41-46.
- [11] 高亚茹. 渤海湾近岸海域沉积物中氮磷形态分布特征[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020.
- [12] 陈翰,陈忠,颜文,等. 汕头近岸海域表层沉积物粒度特征及其运输趋势[J]. 沉积学报, 2014, 32(2): 314-324.
- [13] 谷阳光,王朝晖,吕颂辉,等. 粤西海域表层沉积物生源要素分布与污染评价[J]. 深圳大学学报(理工版), 2010, 27(3): 347-353.
- [14] 樊鑫,程芳晋,俞志明,等. 长江口及其邻近海域表层沉积物粒径及生源要素分布特征[J]. 海洋科学, 2017,

- 41(7):105-112.
- [15] 雷明丹,王朝晖,江涛. 青岛近岸海域表层沉积物生源要素分布及污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2021, 40(1):93-100.
- [16] 钟文聪,王朝晖,江涛. 渤海中部海域表层沉积物生源要素分布特征及其环境评价分析[J]. 海洋环境科学, 2020,39(1):39-45,52.
- [17] 王文婷,王朝晖,刘磊,等. 东海典型港湾表层沉积物中主要生源要素分布及污染状况分析[J]. 海洋通报, 2019,38(6):690-697.
- [18] 谷阳光. 广东沿海沉积物中生源要素、重金属分布及其潜在生态危害评价[D]. 广州:暨南大学,2009.
- [19] 冯杰. 广东省典型养殖海域沉积物生源要素及重金属分布特征与生态危害评价[D]. 广州:暨南大学,2011.
- [20] 韩天伟,吕晓霞,宋金明,等. 南黄海表层沉积物中生源要素的分布规律及其环境意义[J]. 广西科学院学报, 2017,33(2):87-92,101.
- [21] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry Proxies*, 1997, 27(5/6):213-250.
- [22] MILLIMAN J D, QINCHUN X, ZUOSHENG Y. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean [J]. *American Journal of Science*, 1984, 284(7):824-834.
- [23] 王文介,欧兴进,林怀兆. 韩江河口发育的现代过程及其演变[J]. 热带海洋, 1986, 5(1):37-45.
- [24] 肖晖,郭小钢,吴日升. 台湾海峡水文特征研究概述[J]. 台湾海峡, 2002, 21(1):126-138.
- [25] 廉耀康,李炎. 台湾浅滩沉积物粒度特征及输运趋势[J]. 台湾海峡, 2011, 30(1):122-127.
- [26] 史经春,李跃林,刘文华,等. 粤东青澳湾表层沉积物重金属含量分布特征和污染评价[J]. 台湾海峡, 2012, 31(2):254-260.
- [27] 徐辉荣. 韩江河口滩涂演变分析[J]. 广东水利水电, 2009(5):26-28.
- [28] 胡巍巍. 人类活动对韩江水沙径流变化的影响[J]. 水土保持研究, 2016, 23(2):157-160,165.
- [29] 吴天胜,陈荣力,吴小明,等. 韩江河口治理规划方案潮流泥沙模型试验研究[J]. 人民珠江, 2007(6):35-38.
- [30] 张珊珊. 长江口表层沉积物生源要素时空分布特征及其影响因素研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2017.
- [31] 宋国栋. 黄东海沉积物中磷的形态及其影响因素研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2014.
- [32] 王华新,线薇薇. 长江口表层沉积物有机碳分布及其影响因素[J]. 海洋科学, 2011, 35(5):24-31.
- [33] 刘素美,张经. 沉积物中重金属的归一化问题——以Al为例[J]. 东海海洋, 1998, 16(3):48-55.
- [34] 张家豪,何倩倩,韩鑫. 粤东南澳海域海床演变分析[J]. 中国水运, 2020, 20(9):146-148.
- [35] 李九发,何青,徐海根. 长江河口浮泥形成机理及变化过程[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3):302-310.
- [36] 王丕波,宋金明,郭占勇,等. 海洋表层沉积物再悬浮的诱因及其对生源要素循环的影响[J]. 海洋科学, 2005, 29(10):77-80.
- [37] 钱端萍,陈振楼,胡玲珍,等. 崇明东滩沉积物再悬浮对沉积物-水界面氮、磷交换行为的影响[J]. 环境科学, 2003, 24(5):114-119.
- [38] KOMADA T, REIMERS C E. Resuspension-induced partitioning of organic carbon between solid and solution phases from a river-ocean transition [J]. *Marine Chemistry*, 2001, 76(3):155-174.
- [39] 张路,范成新,秦伯强,等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1):35-42.
- [40] 蔡德华,陈振明,唐书悻. 南澳岛周边海域海水质量近10年变化趋势浅析[J]. 环境影响评价, 2020, 42(2):63-66.
- [41] 李凤业,史玉兰,申顺喜,等. 同位素记录南黄海现代沉积环境[J]. 海洋与湖沼, 1996, 27(6):584-589.
- [42] 韦钦胜,王保栋. 南黄海冷水团海域及西部近岸区表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征及其生态学指示意义[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7):1697-1707.
- [43] 周召千. 东海沉积物中氮的形态研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2008.
- [44] 汕头市统计局. 汕头统计年鉴:2020 [R/OL]. (2020-12-18)[2021-08-09]. https://www.shantou.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/content/post_1852298.html.

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Surface Sediments of Nan'ao Island, Eastern Guangdong Province

YI Jiaji, WANG Wanhu^{**}, WANG Yang, WAN Xiaoming, WANG Hongbing, FENG Kecong
(Haikou Marine Geological Survey Center of China Geological Survey, Haikou, Hainan, 570100, China)

Abstract: This study aims to understand the distribution and pollution status of Total Organic Carbon (TOC), Total Nitrogen (TN) and Total Phosphorus (TP) in the surface sediments of the coastal area of Nan'ao Island in southeast Guangdong Province, and to provide scientific basis for environmental protection and management of the sea area. In this article, 32 surface sediment samples collected from the coastal waters of Nan'ao Island in the southeast of Guangdong Province were taken as the research objects, and the contents and distribution characteristics of TOC, TN and TP were analyzed. The pollution degree of TOC, TN and TP was evaluated by the single factor pollution index method and Nemerow comprehensive pollution index method. Meanwhile, the source of organic matter in the surface sediment and the enrichment factors of TOC, TN and TP in the surface sediments were discussed based on the molar ratio of TOC to TN. The results show that the contents of TOC, TN and TP in the sediments of Nan'ao Island coastal area are 0.180%–0.920%, 0.006%–0.210%, and 0.015%–0.059%, respectively, indicating that high on the north and south sides of the island, and low on the east and west sides. On the east side of Nan'ao Island from the shore to the sea, the content is gradually decreasing. Compared with the adjacent sea areas in China, the TOC, TN and TP contents of surface sediments in the coastal areas of Nan'ao Island were at a low level. According to the molar ratio of TOC and TN, it is inferred that the organic matter in the surface sediments of the offshore area of Nan'ao Island is dominated by the mixed input of marine and terrestrial sources. The surface sediments in the offshore area of Nan'ao Island are not polluted by TOC and TP, but most of the area is polluted by TN. 40.6% of surface sediments are at relatively clean and above levels, 59.4% of the surface sediments are mildly polluted to moderately polluted, and no severe pollution is found. The content levels of TOC, TN and TP in the surface sediments of the offshore area of Nan'ao Island are mainly affected by hydrodynamics, particle size and human factors. The human factors are mainly fishery aquaculture and terrestrial sewage discharge.

Key words: Nan'ao Island coastal; surface sediments; total organic carbon; total nitrogen; total phosphorus; distribution characteristics; pollution assessment; influencing factors

责任编辑:米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址:<http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>