

Experimental Study and Scheme Design on Disinfection of Ship Drinking Water

Xiaodong Tang

Research and Development Institute, Hudong-Zhonghua Shipbuilding (Group) Co., LTD., Shanghai
Email: 848517165@qq.com

Received: May 15th, 2019; accepted: May 30th, 2019; published: June 6th, 2019

Abstract

There are two main types of ship drinking water: municipal tap water and desalination water. When the water stores in the ship's water tank for some time, the disinfectant has decayed in the water and bacteria reproduction, resulting in water quality is difficult to meet *Standards for drinking water quality* (GB5749-2006). Therefore, it must be continuously sterilized. In this study, calcium hypochlorite, sodium hypochlorite, and ultraviolet disinfection were used to sterilize the ship fresh water, and their applicability was analyzed. When using calcium hypochlorite to sterilize water, it was found that the natural attenuation of residual chlorine was slow in a closed environment. When the initial concentration of residual chlorine was 0.68 mg/L, the residual chlorine content was still larger than 0.3 mg/L after half a month. The experiment of sterilizing water containing 10⁵ CFU/100 mL *Escherichia coli* in the water storage tank and the disinfection showed a good effect when the initial residual chlorine content was 3.82 mg/L. The disinfection by-product (DBP) concentration was much lower than the limits in GB5749-2006 when doing the 14-day circulating disinfection test of water storage tank, which indicated that the drinking water treated by calcium hypochlorite was safe for long-term storage and drinking. The results showed that the sodium hypochlorite also had a good disinfection effect. When testing ultraviolet disinfection, it was found that ultraviolet (UV) had better disinfection effect in a certain velocity, but without continuous disinfection function. According to the result of the experiments, the different disinfection methods should be chosen based on the different spots of the drinking water on ships. The water feeding the ship, desalinated by reverse osmosis, and storage in the water tank should be disinfected by calcium (or sodium) hypochlorite, and the terminal water should be disinfected by ultraviolet ray.

Keywords

Secondary Reverse Osmosis Water Production, Fresh Water Disinfection, Ship, Drinking Water

船舶饮用水消毒试验研究及方案设计

唐小东

沪东中华造船(集团)有限公司研发设计院, 上海
Email: 848517165@qq.com

收稿日期: 2019年5月15日; 录用日期: 2019年5月30日; 发布日期: 2019年6月6日

摘要

船舶饮用水主要有二种: 市政自来水和海水淡化水。船舶淡水舱内的水储存超过一定时间, 水中的消毒剂衰减完, 细菌重新繁殖, 导致水质难以达到GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》, 因此必须对其进行持续消毒处理。本研究采用次氯酸钙、次氯酸钠、紫外线消毒等几种最常用方式对船舶淡水进行消毒, 分析它们的适用性。使用次氯酸钙法进行消毒试验时, 发现密闭环境下, 其余氯自然衰减比较缓慢, 当余氯初始浓度为0.64 mg/L时, 保存半月后余氯含量仍在0.3 mg/L以上; 对含有 10^5 CFU/100 mL大肠杆菌的贮水箱进行消毒, 初始余氯为3.82 mg/L时, 有良好的消毒效果; 进行14 d的贮水箱循环消毒试验时, 其副产物浓度远低于GB5749-2006要求, 表明消毒处理的饮用水长期存储饮用是安全的。使用次氯酸钠进行消毒试验, 结果表明其同样具有良好的消毒效果。采用紫外线消毒, 发现其在一定流速内具有较好的杀菌效果, 但没有持续消毒功能。根据试验研究结果, 船舶上不同位置饮用水应采用不同的消毒方式, 对船舶给水、反渗透淡化水及水舱淡水消毒推荐使用次氯酸钙(钠)法, 对终端用水推荐使用紫外线消毒法。

关键词

二级反渗透产水, 淡水消毒, 船舶, 饮用水

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

对船员的健康而言, 船舶饮用水保障十分重要。船舶饮用水主要由岸基补给保障, 水源为含有余氯的市政自来水, 在短时间内水质有保证; 此外, 还有由船舶自备海水淡化装置提供的自保障。一般情况下, 合格的海水淡化装置生产的淡化水经水质调节处理, 能满足饮用要求[1]。伴随航行时间变长, 水舱水中的消毒剂不断消耗, 使水舱内的余氯含量下降, 导致水中的微生物再度繁殖, 如: 致病菌的繁衍等[2]。供水水质问题一般由微生物, 水中颗粒物等致病菌、有机污染物引起的。肠道致病菌可引起很多致死的疾病例如霍乱、伤寒和其他腹泻类疾病[3][4]。对于由岸上补给的水源来说, 由于存在一定的余氯, 水质保鲜的时间稍长; 对于海水淡化装置生产的淡水, 其保鲜期则更短。当水舱内的水保存2天甚至更长的时间, 由于细菌的大量繁殖, 水质难以达到GB5749-2006《生活饮用水卫生标准》, 必须对其进行消毒处理。一般情况下, 水舱的储存容积可满足5~15天的供水要求, 大大超过2天的供水容量。

福建检验检疫局曾对某口岸入出境船舶实施饮用水卫生监测44批次, 现场调查发现, 80%船舶至多每年清洗一次饮用水舱, 20%船舶清洗时间超过一年, 甚至只在修船时才清洗水舱, 100%船舶在清洗时未进行有效消毒[5]。对目前舰船的调研, 总体而言, 舰船饮用水消毒措施处于落后状态。2005年以前建造的舰船, 主要通过人工添加消毒剂方式进行消毒, 由于未配备专门的添加装置, 消毒剂的添加时机、数量没有严格规定, 同时还存在消毒剂溶解不良现象, 使得消毒效果无法保证, 导致造成饮用水的污染。

对某常规潜艇淡水供应卫生状况调查结果表明细菌学指标超标严重, 细菌总数和大肠菌群均合格的只占 45.7%, 有 69% 未检出游离余氯。对水面舰艇水舱饮用水水质进行调查, 结果发现某舰艇水舱饮用水的大肠菌群为 63 个/L。秦思昌等[6]对某舰艇的饮用水水质进行检测, 发现细菌总数和大肠菌群分别为 20 个/ml 和 12 个/L, 均未达到 GB5749-2006 的要求, 影响了舰员的身体健康。为满足舰船人员对饮水的需求, 确保饮用水安全可靠, 采取标准规范的净化消毒技术措施和方法对舰船饮用水进行必要的处理具有重要的现实意义[7]。

饮用水消毒的方法很多, 船舶上常用的消毒方法包括: 氯法消毒、高温消毒、紫外消毒、电化学消毒法等[8]。由于船舶长时远离陆地, 所使用的消毒方式应具有操作便捷和消毒剂安全稳定、易储存的特点。本文中介绍了使用次氯酸钙、次氯酸钠和紫外线照射的消毒技术对水舱进行消毒, 研究其消毒效果, 并针对不同的淡水场合提出针对性的消毒工艺。

2. 材料与方法

2.1. 试验条件

试验以反渗透产水为研究对象, 采用的消毒剂有次氯酸钙和次氯酸钠, 以预先配制的不同浓度的大肠杆菌的杀灭程度及淡水中的余氯含量作为消毒效果考核指标。试验采用的仪器有自动加药消毒装置, 主要用于次氯酸钙或次氯酸钠消毒剂的自动投加; 紫外消毒装置, 产生紫外线对饮用水进行消毒。

2.2. 试验药品与仪器

2.2.1. 试验试剂

试验所用试剂如表 1 所示。

Table 1. Experimental reagents

表 1. 试验试剂

试剂	规格	生产厂家
次氯酸钙	食品级	杭州市宏源实业有限公司
次氯酸钠	食品级	杭州市宏源实业有限公司
大肠埃希氏菌大肠杆菌	优级纯	广东环凯微生物科技有限公司

2.2.2. 试验仪器及设备

试验仪器及设备如表 2 所示。

2.3. 次氯酸钙消毒试验

2.3.1. 贮水箱中初始余氯衰减规律

于密封的贮水箱内配制不同浓度梯度的余氯, 考察不同初始余氯含量下的自然衰减规律。

2.3.2. 贮水箱消毒效果研究

向贮水箱中投加大肠杆菌, 使贮水箱内大肠杆菌含量约为 10^5 CFU/100 mL, 再向贮水箱中投加一定浓度的次氯酸钙, 30 min 后检测水中总大肠杆菌数, 检验其杀菌效果。

2.3.3. 贮水箱循环消毒试验

水箱中初始余氯为 0.7 mg/L 时, 投加约 10^5 CFU/100 mL 的大肠杆菌, 水箱中余氯衰减至 0.3 mg/L 时继续投加消毒剂至余氯为 0.7 mg/L, 并循环投加若干次, 2 周后取水样检测消毒副产物。

Table 2. Information of experimental apparatus**表 2.** 试验仪器及设备

仪器名称	规格	产地
电子天平	AL204	梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司
余氯测定仪	PCII	美国哈希公司
气相色谱仪-ECD	Agilent 7820	安捷伦科技有限公司
HP-5 毛细管柱	30 m × 0.320 mm × 0.25 μm	安捷伦科技有限公司
微量注射器	10 μL、50 μL	安捷伦科技有限公司
紫外线消毒器	LCW-II-U	山东良成环保科技股份有限公司
便携式微生物实验室分析仪	MEL	美国哈希公司
医用超净台	SW-CJ-1FD	苏净集团苏浙安泰空气技术有限公司
超纯水仪器	UPWS	杭州亿捷有限责任公司

2.4. 次氯酸钠消毒试验研究

向贮水箱中投加大肠杆菌，使贮水箱内大肠杆菌含量约为 10^5 CFU/100 mL，再向贮水箱中投加一定浓度的次氯酸钠，30 min 后检测水中总大肠杆菌数，检验其杀菌效果。

2.5. 紫外消毒试验研究

试验用紫外消毒装置额定功率 40 W、流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，通过调解阀开度改变流量。在水箱内配制约含有 10^5 CFU/100 mL 的大肠杆菌的淡化水，启动紫外消毒装置，水经水泵打入紫外消毒管道，检测在不同流量下紫外消毒装置出水中的菌落数及大肠杆菌数目，以测试紫外消毒效果。

3. 结果

3.1. 次氯酸钙消毒试验

3.1.1. 贮水箱中初始余氯衰减规律

图 1 是不同初始余氯下余氯的自然衰减规律。如图 1 所示，实际初始余氯浓度分别为 0.64 mg/L、1.14 mg/L、2.03 mg/L 和 4.1 mg/L，随着反应的进行，发现在密闭环境下，反应时间为 15 d 时，初始余氯浓度为 4.10 mg/L 要比其他余氯浓度衰减的幅度大，初始余氯浓度为 0.64 mg/L、1.14 mg/L、2.03 mg/L 的余氯自然衰减比较缓慢，保存时间在半月以上余氯的浓度仍在 0.3 mg/L 以上。

3.1.2. 贮水箱消毒效果研究

设置水箱中投加次氯酸钙后，余氯的浓度为 2.03、0.78 和 0.27 mg/L，研究消毒 30 min 后余氯的衰减及微生物变化情况，得表 3。由表 3 可知使用次氯酸钙消毒时，当初始余氯为 2.03 mg/L、0.78 mg/L 时，30 min 后可以将 10^5 CFU/100 mL 的大肠杆菌杀灭完全，且初始余氯为 2.03 mg/L 时，30 min 后仍然含有 1.46 mg/L 的余氯含量，而大肠杆菌和菌落总数均未检出，说明有良好的持续消毒作用；当初始余氯为 0.78 mg/L 时，30 min 后仍然含有 0.26 mg/L 的余氯含量，而大肠杆菌和菌落总数也未检出，说明较低浓度的初始余氯也具有一定的消毒作用；而当初始余氯在 0.27 mg/L 时，消毒 30 min 后水中余氯基本耗尽，大肠杆菌及菌落总数都还有残余，杀毒效果并不理想。故用次氯酸钙消毒时，初始投加量不可过少。

3.1.3. 贮水箱循环消毒试验

表 4 是贮水箱在进行 14 d 次氯酸钙循环消毒试验后，取水样检测所得的 7 种消毒副产物含量。由表

4 可以看出, 1,2-二氯乙烷、二氯甲烷和 1,1,1-三氯乙烷均未检出, 二氯乙酸、三氯甲烷、三氯乙酸和硝酸盐 4 种消毒副产物检测出的浓度分别为 0.011, 0.0227, 0.0127, 0.12 mg/L, 均符合生活饮用水卫生标准。对长期存储的饮用水, 采用次氯酸钙进行循环消毒, 其副产物浓度远低于 GB5749-2006 要求, 说明次氯酸钙消毒处理的饮用水长期存储饮用时安全的。

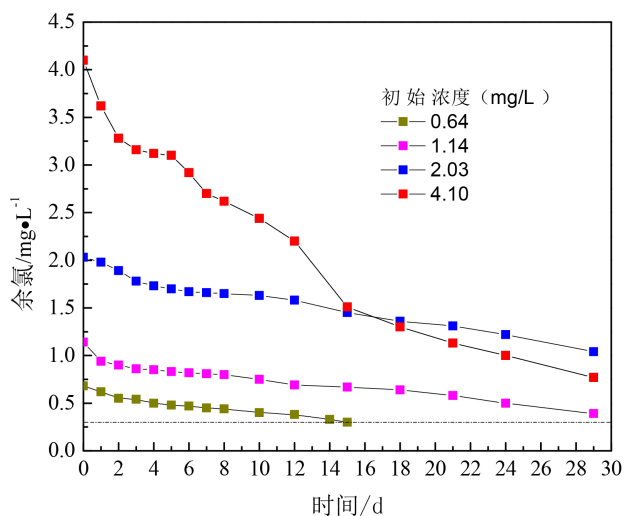


Figure 1. Attenuation of residual chlorine at different initial concentrations of calcium hypochlorite
图 1. 不同初始浓度下余氯的衰减规律

Table 3. Disinfection effect and variation law in water storage tank with initial residual chlorine concentrations of 2.03, 0.78 and 0.27 mg/L

表 3. 贮水箱不同初始余氯下消毒效果

序号	指标	接触时间(min)	
		0	30
1	余氯(mg/L)	2.03	1.46
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	未检出
2	余氯(mg/L)	0.78	0.26
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	未检出
3	余氯(mg/L)	0.27	<0.02
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	2

Table 4. DBPs of calcium hypochlorite

表 4. 次氯酸钙消毒副产物

序号	指标(mg/L)	检测结果(mg/L)	GB5749-2006 限值(mg/L)	结论
1	二氯乙酸	0.0110	0.05	符合
2	1,2-二氯乙烷	未检出(<0.00006)	0.03	符合
3	二氯甲烷	未检出(<0.00003)	0.02	符合
4	三氯甲烷	0.0227	0.06	符合
5	1,1,1-三氯乙烷	未检出(<0.00008)	2	符合
6	三氯乙酸(mg/L)	0.0127	0.1	符合
7	硝酸盐(以 N 计)	0.12	10	符合

3.2. 次氯酸钠消毒试验研究

投加次氯酸钠后淡水余氯衰减规律及循环消毒试验结果基本与投加次氯酸钙时一致，因此仅对次氯酸钠的消毒效果进行讨论。

水箱中投加次氯酸钠后，余氯的浓度为 4、0.68 和 0.29 mg/L，研究消毒 30 min 后余氯的衰减及微生物变化情况，得表 5。由表 5 可知使用次氯酸钠消毒时，当初始余氯为 4 mg/L、0.68 mg/L 时，30 min 后可以将 10^5 CFU/100 mL 的大肠杆菌杀灭完全，且初始余氯为 4 mg/L 时，30 min 后仍然含有 3.32 mg/L 的余氯含量，说明有良好的持续消毒作用；而当初始余氯在 0.29 mg/L 时，消毒 30 min 后水中余氯基本耗尽，大肠杆菌及菌落总数都还有残余，杀毒效果并不理想。故用次氯酸钠消毒时，初始投加量不可过少。

Table 5. Disinfection effect and variation law in water storage tank with initial residual chlorine concentrations of 0.68 and 0.29 mg/L

表 5. 贮水箱不同初始余氯下消毒效果

序号	指标	接触时间(min)	
		0	30
1	余氯(mg/L)	4	3.32
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	未检出
2	余氯(mg/L)	0.68	0.26
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	未检出
3	余氯(mg/L)	0.29	<0.02
	总大肠菌群(CFU/100 mL)	10^5	9

相较于次氯酸钙消毒剂，次氯酸钠的溶解效果更好，但氯酸钙中的钙离子可以增加淡化水的硬度，提高淡化水矿物含量。

3.3. 紫外消毒试验研究

贮水箱内配有含大肠杆菌 10^5 CFU/100 mL 的反渗透产水，检测不同流量下紫外消毒装置出水中的菌落数及大肠杆菌数目，发现在流量不超过 3.15 L/min ($0.19 \text{ m}^3/\text{h}$) 时均未在出水中检出总大肠菌群，如表 6；当流量达到 4.31 L/min ($0.26 \text{ m}^3/\text{h}$) 时，出水中检出了总大肠菌群，这是由于流量增加，紫外线对反渗透产水的接触时间过短，导致消毒不彻底。试验表明当贮水箱中初始大肠杆菌浓度为 10^5 CFU/100 mL 时，紫外消毒装置的最大适宜流量为 $0.19 \text{ m}^3/\text{h}$ ，而非紫外消毒装置厂商推荐的 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。实际应用中应根据淡水中微生物的含量通过试验确定紫外消毒装置的最佳处理流量。

Table 6. Effect of ultraviolet disinfection test

表 6. 紫外消毒试验效果

序号	流速(L/min)	菌落总数(CFU/mL)	总大肠菌群(CFU/100 mL)
1	0.62	未检出	未检出
2	1.65	未检出	未检出
3	1.98	未检出	未检出
4	3.15	未检出	未检出
5	4.31	1	2

试验中也发现,对消毒后的淡水贮存一段时间后,又出现了微生物的滋生现象,J. Wist 等[9]在研究中也发现,使用紫外对原水光照 1.5 h,菌落数下降显著,但光照停止后菌落重新生长且在 24 h 内恢复到处理前的水平。这主要是因为紫外消毒无持续消毒效果,一旦离开紫外线照射,水中将重新滋生微生物。

4. 船舶饮用水消毒系统方案

船舶饮用水来自补给水或反渗透产水,其中需要对饮用水进行消毒(或余氯补充)的点有 3 处,见图 2。第 1 处位于补给水或反渗透淡化水进入船舶淡水舱前,用于消毒及确保饮用水中含有一定量的余氯;第 2 处位于船舶淡水舱附近,用于补充淡水舱内消耗的余氯;第 3 处位于饮用水终端,用于快速消毒,确保饮用安全。

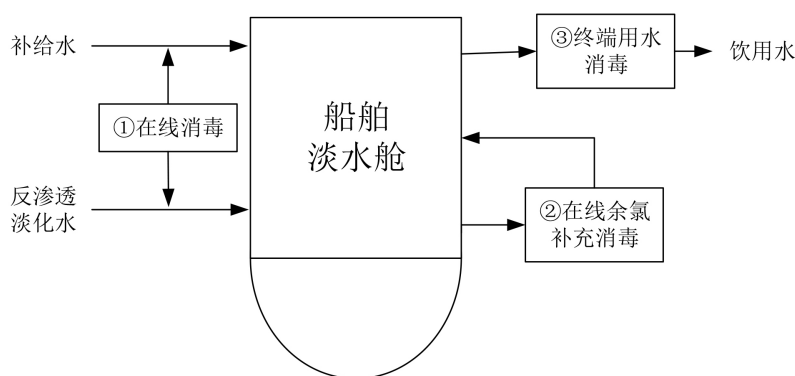


Figure 2. The system drawing of ship's drinking water disinfection
图 2. 船舶饮用水主要消毒位置图

4.1. 补给水/淡化水在线消毒

补给水一般为码头自来水,GB5749-2006 规定自来水末端余氯 ≥ 0.05 mg/L 即可,自来水末端余氯含量一般很低;而反渗透淡化水由海水淡化得到,不存在余氯。因此在进入水舱前应投加一定量的消毒剂,对淡水进行消毒的同时保证淡水进水淡水舱内依然含有一定的余氯,一般要求在 1 mg/L 左右。采用次氯酸钙(钠)可以满足这一需求,其中次氯酸钙在消毒的同时能适当增加饮用水中的钙含量,提高饮用水的矿化度,这在淡化水中尤其适用。

4.2. 淡水舱余氯补充

船舶水舱淡水在贮存过程中,余氯会随着时间消耗掉,若不及时补充余氯,水舱中可能滋生细菌等微生物,影响饮用安全。通过定期对水舱投加消毒剂可有效抑制水舱中微生物的滋生。采用次氯酸钙(钠)作为余氯补充剂,结合水舱在线余氯监测仪,可以实现淡水舱余氯自动补充功能。

4.3. 饮用水终端消毒

当水舱淡水作为饮用水最终使用时,为防止饮用水在管路输送过程中引入细菌等微生物,需在用水终端进行消毒,由于终端处饮用水直接使用,不需要持续消毒效果,同时消毒速度要快,因此采用紫外消毒比较合适。紫外消毒具有消毒速度快、无消毒副产物等优点,同时可有效杀灭的“两虫”——隐孢子虫和贾第鞭毛虫。

5. 结论

综合以上不同消毒措施的实验结果可以得出:

1) 次氯酸钙(钠)作为传统消毒剂对淡化饮用水消毒效果明显, 使用其进行循环消毒时, 其副产物浓度远低于 GB5749-2006 要求, 经过了数十年的应用实践, 其安全性有保证。

2) 紫外线消毒在保证照射强度条件下消毒效果良好的同时, 具有无消毒副产物的优点。可有效杀灭隐孢子虫和贾第鞭毛虫。但紫外消毒无持续消毒能力, 适用于消毒后直接使用的场合。

3) 通过对船舶饮用水系统特点分析, 总结了针对性的消毒工艺: 对船舶给水、反渗透淡化水及水舱进行消毒时, 宜采用具有持续消毒作用的次氯酸钙(钠)法; 在终端供水时, 可考虑使用紫外线消毒法对饮用水进行消毒。

参考文献

- [1] 吴水波, 张乾, 邵天宝. 海水淡化水矿化方法浅析[C]//中国膜工业协会膜科学与技术编辑部. 2012 北京国际海水淡化高层论坛论文集, 2012: 177-180.
- [2] 丁冰泉, 邹士洋, 伍俊荣, 等. 舰船饮用水消毒现状及发展[J]. 海军医学杂志, 2012, 33(4): 286-287.
- [3] Mcguire, M.J. (2006) Eight Revolutions in the History of US Drinking Water Disinfection. *Journal American Water Works Association*, **98**, 123-149. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07612.x>
- [4] 黄锐, 李翠梅, 罗贤达, 等. 影响供水管网中余氯与浊度的因素及相关性分析[J]. 给水排水, 2015(5): 147-151.
- [5] 郭朝义, 吴晓卿. 船舶饮用水消毒处理探讨[J]. 中国水运(下半月), 2008, 8(7): 30-31.
- [6] 秦思昌, 邱金华, 汤美华, 等. 舰艇水舱饮用水水质调查[J]. 海军医学杂志, 2001, 22(1): 68-69.
- [7] 丁冰泉, 邹士洋, 伍俊荣. 浅谈舰船饮水净化消毒技术要求[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(8): 88-89.
- [8] 黄富民, 丁冰泉, 伍俊荣, 等. 舰船饮用水二次消毒方法选择的研究进展[J]. 海军医学杂志, 2012, 33(2): 132-134.
- [9] Wist, J., Sanabria, J., Dierolf, C., Torres, W., *et al.* (2002) Evaluation of Photocatalytic Disinfection of Crude Water for Drinking-Water Production. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **147**, 241-246. [https://doi.org/10.1016/S1010-6030\(01\)00615-3](https://doi.org/10.1016/S1010-6030(01)00615-3)

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2164-5485, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: aep@hanspub.org