

Sedimentology Significance from Sediment Dynamics of Research Method, Technology, Progress

Yalin Qi^{1,2}, Yande Zhao^{1,2}, Yuanhao Li^{1,2}, Ke Wang^{1,2}

¹Exploration & Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an Shaanxi

²National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an Shaanxi

Email: qiyi_cq@petrochina.com.cn

Received: Feb. 5th, 2018; accepted: Feb. 19th, 2018; published: Feb. 26th, 2018

Abstract

Analyzing the motion law of water and sediment is common topic of sedimentary dynamics and sediment dynamics. Research of sediment dynamics can provide an important way for solving sediment problem such as river regulation and water conservancy project construction. This paper introduces the approach of sediment dynamics study, testing technology and research progress, using research methods of sediment dynamics, experimental technology and theoretical results from the perspective of sedimentary dynamics, researching on quantitative relationship between various variables and conditions of sedimentary dynamic process from dynamic view, and then studying the dynamics mechanism of sediment transport and deposition, establishing and improving depositional environment mark under the constraint of hydrodynamic, which will expand theory field and thoughts of sedimentary dynamics research, and improve precision of sedimentary environment study, promote the establishment of depositional model and formation of discipline concept, and enrich the connotation of sedimentary dynamics.

Keywords

Sedimentary Dynamics, Sediment Dynamics, Water Dynamics, Model Test, Numerical Simulation

泥沙动力学研究方法、技术、进展及沉积学意义

齐亚林^{1,2}, 赵彦德^{1,2}, 李元昊^{1,2}, 王克^{1,2}

¹中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安

文章引用: 齐亚林, 赵彦德, 李元昊, 王克. 泥沙动力学研究方法、技术、进展及沉积学意义[J]. 地球科学前沿, 2018, 8(1): 92-98. DOI: 10.12677/ag.2018.81010

²低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安
Email: qiyl_cq@petrochina.com.cn

收稿日期: 2018年2月6日; 录用日期: 2018年2月19日; 发布日期: 2018年2月26日

摘要

分析水沙运动规律是沉积动力学与泥沙动力学面对的共同课题。泥沙动力学研究为解决江河治理和水利工程建设中的泥沙问题提供了重要思路和手段。本文介绍了泥沙动力学的研究方法、试验技术和研究进展。从沉积动力学角度借鉴泥沙动力学领域的研究方法、试验技术和理论成果, 从动态观点研究沉积动力过程中各种变量与条件之间的定量关系进而研究沉积物搬运和沉积的动力机制, 建立和完善受水动力约束的沉积环境标志, 将拓展沉积动力学研究的理论视野和思路, 提高沉积环境研究的精度, 推动沉积模式的建立和学科概念的形成, 丰富沉积动力学的内涵。

关键词

沉积动力学, 泥沙动力学, 水动力学, 模型试验, 数值模拟

Copyright © 2018 by authors 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

由于缺乏精细的现代监测和沉积动力过程模拟手段, 国内沉积学领域在沉积动力过程和沉积机理等方面的研究较为薄弱, 沉积环境标志的确定表现出极大的复杂性和多解性, 沉积环境的解释具有很大的主观随意性和不确定性[1], 在沉积模式的建立、学科概念的形成等方面依然处于跟踪、借鉴阶段[1] [2] [3]。沉积动力学主要从动态角度研究沉积动力过程中各种变量与条件之间的定量关系, 进而研究沉积物搬运和沉积的动力机制, 是当前国际沉积学研究热点[1] [2] [3]。泥沙动力学主要研究泥沙及各种固体颗粒在重力、流水、波浪等动力作用下的侵蚀、搬运和沉积规律, 进而解决江河治理、水利水电工程、航道工程及生态环境等领域中的泥沙问题[4] [5]。分析水沙运动规律是沉积动力学与泥沙动力学所面对的共同课题。湍流理论是分析水流运动规律、水沙作用机制和泥沙运动规律的理论基础, 以流体力学特别是湍流理论为基础[6], 国内水力学及河流动力学, 港口、海岸及近海工程等水利工程学科领域在水沙运动规律的研究方法、试验技术和理论成果等方面较传统的沉积动力学领域具有明显的优势, 为解决江河治理和水利工程建设中泥沙问题提供了重要的思路和手段[7] [8] [9] [10] [11], 也为拓展沉积动力学的研究思路、方法和手段提供了借鉴。

2. 方法和技术

挟沙水流中泥沙存在静止、起动、推移和悬浮等 4 种典型的运动状态。泥沙运动的驱动力是水流作用, 水流运动是主导因素, 泥沙运动是从属运动。泥沙运动是一个跨尺度、多物理过程相耦合的复杂过程, 其研究的方法有现场观测和模拟, 其中, 模拟包括数值模拟和河工模型试验[7] [8] [9] [10] [11]。

2.1. 现场观测

现场观测是利用仪器设备对自然界固有的流动现象或工程的全尺度流动现象进行系统观测[12] [13]。实测某期洪水前、后沉积物表面高程的变化,可以确定新产生的沉积体的空间形态。实测某一时刻空间各点的流速,可以建立流速场。精确的测量可为泥沙运动的理论分析和泥沙数学模型的建立提供基础的验证资料,从而总结出水沙运动规律,是深入研究河道、河口等环境水流内部结构和运动机理的前提。河口的沉积过程分析中,可将该环境的沉积分解为事件沉积(洪水挟沙及卸载沉积)和背景沉积(波浪、潮汐等水动力对泥沙再搬运及卸载沉积),事件沉积的水动力过程可理解为具一定宽度(B_0)、深度(H_0)、初始流速(v_0)、动力黏滞系数(μ)特征的一维非恒定河流水平射入湖泊。河口水体空间任意点的流速 $v(x, y, z)$ 取决于河流的深度(H_0)和初始流速(v_0)而非宽度(B_0),是 $f(H_0, v_0)$ 的函数,进而可以通过实测拟合出 $v(x, y, z)$ 与 $f(H_0, v_0)$ 的关系,建立受河流水动力控制的河口流速场。目前,用于泥沙动力学研究的主要测量设备,除常规的用于水力学、工程流体力学、河流动力学等设备外,在水工方面比较先进的测量设备有用于测量水位波动的压力传感器,测量流速的粒子图像测速仪(PIV)和声学多普勒流速仪(ADCP),测量悬浮沉积物浓度的声学多普勒剖面仪(PCADP),以及遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、高精度定位系统(GPS) [12] [13]。上述测量仪器组合应用,可快速准确地测量诸如河道、河口等环境水流的流速、水深、含沙量及长时段的冲淤变化等各种流动参数。

2.2. 河工模型试验

河工模型试验主要用来研究预测水库或河道的水流结构、泥沙运动规律、排沙特性、冲淤形态、河势变化、河床变形等,是研究进而解决河床演变、河道整治及洪水预测预演和水库运用方式等重大工程的泥沙问题的主要手段[14] [15] [16] [17] [18]。

河工模型试验的原理是应用河流动力学知识,在分析河流原型的基础上,根据水沙动力学相似原理,模拟与原型相似的边界条件和动力条件,在实验室进行水沙动力机制及过程分析。通过设置不同的边界条件,在实验室还原自然界沉积物的沉积动力过程[14] [15] [16] [17] [18],其原理与沉积动力过程研究中的水槽试验[19]具有相似性。在河口动力过程及沉积机理的研究中,开展河工模型试验,通过设置不同的边界条件,在实验室还原河口沉积物的沉积动力过程,能给出流动现象并定性描述,能显示运动特点及其主要趋势;有助于理解不同类型砂体的形成过程、形成机理、展布特征及演化规律;有助于形成概念,检验理论的正确性。

由于比尺效应的存在,河工模型试验可给出定性描述,难以给出半定量-定量描述,如果要实现半定量-定量描述,原型与模型要按照相似准则在几何、重力、阻力、流速、流量、泥沙粒径、泥沙起动、泥沙输送能力、总加沙量等方面保持相似,如果无法完全满足所有要素相似,流速、流量、泥沙粒径、总加沙量等关键要素必须保持相似[14]-[19]。实践中,上述条件难以同时满足。如模型设计时仅仅考虑几何相似,模型沙的粒径不按照相似准则设计,与其对应的流速也将无法按照相似准则设计。若依然按几何相似的原理去解释,可能会导致对沉积动力过程、砂体成因及规模的误判。

2.3. 数值模拟

沉积作用是一个多变量的函数,沉积现象的数学表述,是理论沉积学的重要探索方向之一[1]。从泥沙动力学统计规律出发,河流流速近似正比于坡降的 $1/2$ 次方和水力半径的 $2/3$ 次方,反比于河道表面的糙率(曼宁公式),坡降和水力半径自调整并成反比。河流入湖过程实质是湍动(紊动)射流过程,是动量由河流(高速流体层)向相邻的湖泊(低速流体层)横向传递的过程。河口的流速场 $v(x, y, z)$ 与河流主要特征参数 $f(H_0, v_0)$ 的关系,除了前述通过实测拟合得到,也可以由湍动射流理论(描述一类流体在另一类流体中

运动规律的理论)给出,即惯性作用下河流的流速与其在湖泊中的推进长度呈负指数关系衰减。反映河流搬运能力的单宽输沙率近似正比于流速的4次方[4][5],或可搬运的最大推移质泥沙粒径近似正比于流速的2次方(艾里定律)。河流流速取决于坡降、水力半径和糙率,流速控制了泥沙的冲刷、搬运和卸载沉积[4][5]。在半定量-定性分析泥沙搬运和沉积行为的前提下,泥沙动力学问题可转为水动力学问题,相对复杂的沉积动力过程数值模拟可以简化为水动力场的数值模拟。

数值模拟是通过简化流体物理性质的方法建立反映问题本质的力学模型,在连续性方程、动量方程和能量方程等流体运动基本方程的控制下,通过计算机数值计算和图像显示技术对流体运动进行模拟,得到复杂问题基本物理量(如流速、压力、温度、浓度等)在流场内空间分布以及这些物理量随时间的变化情况,进而分析包括流体运动等相关物理现象的方法[20]-[26]。与模型试验相比,数值模拟不仅成本低,可以避免比尺效应,而且在工况选择以及复杂流场的分析处理等方面具有明显的优越性,对于用户关心的参数和计算中的误差可以随时进行动态跟踪显示,随时调整优化参数;能给出诸如流速矢量图、等值线图、等值面图、流动轨迹图等详细和完整的资料。

数值模拟有助于深入理解流体的运动性质。在忽略河床变形影响的前提下,数值模拟可以对短周期、小范围的水沙输移及河床变形进行模拟,是研究水沙运动规律、预测河流演变过程等泥沙动力学问题的重要手段[20]-[26],在解决河口、海岸、港口、航道等工程中的水流和泥沙问题的科研及工程实践上得到广泛应用[20]-[26]。

目前,以水流、泥沙等为模拟对象的成熟商业软件有TK-2D/2DC、Delft3D、MIKE21等[27]。其中,TK-2D/2DC是交通部天津水运工程科学研究所推出的海岸、河口、内河河流水沙模拟系统,Delft3D是由荷兰水力研究院(Delft Hydraulics)开发设计的三维或二维可视水动力-水质联合模拟系统,MIKE21是丹麦水力学研究所(DHI)研制的二维仿真模拟系统。上述几种模拟系统可全面或部分仿真模拟海岸、河流、湖泊与河口的水动力、波浪、泥沙输移等,在环境工程、水利工程、海洋工程等诸多领域得到了广泛应用[27]。数值模拟系统可对多种沉积环境的水动力场进行精确的模拟,为半定量-定性分析泥沙的搬运、卸载沉积和合理解释沉积体空间展布特征提供依据,为沉积动力学研究提供了思路和方法。

3. 进展或成果

泥沙动力学与地貌学、环境学等学科的交叉研究呈现出蓬勃发展的趋势,在理论和工程实践中取得了很大进展。

3.1. 湍流运动特性

泥沙运动的研究起源于地貌学,同时大量借鉴了流体力学的研究成果。湍流是自然界普遍存在的流体运动状态,是包括河流在内地表水体运动的主要形式,是流体力学研究的重要内容。湍流由近乎无穷多尺度漩涡构成,具有三维非定常随机不规则有旋流动的特点,其随机性表现在湍流微团不仅有横向脉动,而且有相对于流体总运动的反向运动,轨迹极其紊乱。湍流微团的随机运动引起动量、能量和质量的传递,黏性不可压缩流体湍流运动时,由于相邻流体层间存在流速差异和物质交换(图1),动量以分子动量(分子热运动和分子间的吸引力造成,牛顿内摩擦定律表征)和涡流动量(湍流微团的脉动运动或涡旋运动造成,雷诺时均方程表征)两种传递机理由高速流体层向相邻的低速流体层横向传递。湍流的动量、能量和质量的传递速率远高于层流,表现出极强的摩擦阻力和能量损耗[6]。湍流的上述动量横向传递机理有助于直观理解湍流射流中水体卷吸和掺混环境流体的过程。

3.2. 河流-水库泥沙淤积特征

钟德钰、韩其为等系统研究了水流结构、泥沙运动、推移质和悬移质输沙、河床变形等问题,提出了

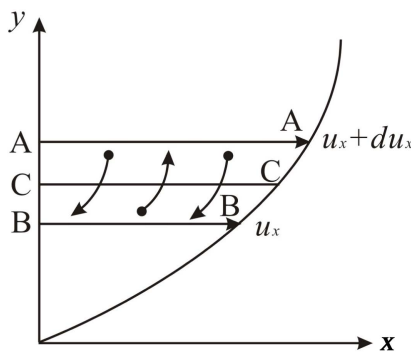


Figure 1. Material exchange pattern of turbulent

图 1. 湍流物质交换模式图

河床湍流随机理论、泥沙起动条件、非恒定流不平衡输沙方程式等观点[28] [29]。张瑞瑾、邵学军等论述了层理与床面底形(沙纹 - 沙垄 - 平整床面 - 逆行沙垄和驻波 - 急流与深潭)和水流流态(缓流 - 临界流 - 急流)的相互关系[4] [5]。钟德钰等给出了反映河床演变规律的河床冲刷平衡、河势变化、河型成因、河道形态、弯道环流及泥沙输移特性等影响因素[28]。韩其为对水库三角洲的形成、形态、推进及转化进行了定量分析, 给出了三角洲、锥体及带状等 3 种形态水库淤积的形成条件, 导出了淤积的基本方程, 建立了淤积体积、淤积面坡降及坝前淤积高程之间的关系[30]。韩其为提出了水库异重流潜入条件, 得出了异重流空间运动方程, 以及异重流流速和含沙量沿程变化的计算公式[30]。

3.3. 三角洲平原沉积体生长模式

河流是连接蚀源区和沉积区的主要输沙通道[4] [5], 其搬运能力正相关于流速, 而流速正相关于坡降和水力半径(坡降和水力半径自调整且反相关), 反相关于河道表面的糙率, 上述规律控制了河流的水动力特征及泥沙的卸载沉积机制。在河流中下游及末端平原区, 河流坡降减小→水面展宽→流速减缓→搬运能力降低→泥沙卸载沉积→河床抬高→水流越岸→河流分流→流速降低→泥沙卸载沉积, 即因河流坡降减小, 导致河流流速减缓, 导致河流泥沙卸载沉积, 进而导致河流分流。三角洲平原沉积体的生长过程, 是河流挟带的泥沙在动力、地貌控制下卸载沉积的过程, 是“动力 - 沉积 - 地貌”相互作用的过程, 即动力自调整于地貌并控制沉积, 沉积自适应于动力并塑造地貌, 地貌受控于沉积并制约动力。准平原化是该环境下泥沙卸载沉积的发展方向。

3.4. 内陆三角洲前缘河口区水动力机制

内陆三角洲前缘河口区是河、湖相互作用的场所[7] [31]。河流的惯性作用是该环境的主要动力, Bates C C.应用湍动射流理论解释了该环境 3 种不同类型三角洲的成因并相应地建立了定量生长模式[32]。虽然 Bates C C.对湍动射流过程和机制的理解并不够准确, 考虑到湍动射流理论是从动力学角度定量 - 半定量分析三角洲前缘河口区沉积体生长动力过程不可或缺的理论, 齐亚林等从湍动射流机制角度对内陆三角洲前缘河口区水动力机制做了进一步解释, 揭示了河流入湖过程水动力的变化机制, 提出河流密度无论是大于、等于或小于湖泊密度, 河、湖 2 类水体间的相互作用机制, 本质上没有区别, 均是依靠惯性作用, 均是动量射流, 垂直河流运动方向的截面, 河流(高速流体层)沿程均要等速卷吸和掺混湖泊(低速流体层)进入流动系统并横向向其传递动量。卷吸和掺混的结果是, 沿程射流的断面不断扩大, 流量增加, 由于动量守恒, 流速不断降低[33]。在此过程中, 河流厚度最薄(深度)的方向首先消耗完毕并停止继续推进, 河流在湖泊中的推进长度取决于河流的深度而非宽度, 河流推进长度非常有限[33]。至于重力流, 虽

然其与静止的湖泊的相互作用机制(卷吸和掺混)可用湍流理论解释,但由于流动过程中存在能量补充(势能向动能转化),湍动射流理论难以定量解释或预测其运动规律。

3.5. 内陆湖泊三角洲前缘河口区沉积体生长模式

事件性洪水是泥沙搬运的主要形式,内陆湖泊三角洲前缘河口区的沉积主要发生在洪水期,其沉积体的生长过程,是挟沙水流进入湖泊时泥沙快速卸载形成河口坝沉积体的过程。波浪是塑造河口、湖岸地貌的重要动力因素,能使洪水在河口区卸载沉积的泥沙通过作横向、离岸、向岸运动而再分配,不同强度的波浪塑造不同的湖岸剖面形态。河流的摆动和湖岸线的迁移,导致某期洪水在河口区卸载沉积的泥沙,或被随后的重力、波浪等动力搬运、卸载沉积的泥沙不同程度的覆盖并埋藏(湖平面扩大,半深湖-深湖区),或被随后的波浪、重力等动力再次起动、搬运进而不同程度的改造(湖平面扩大,滨浅湖区),或被后期洪水搬运且在平原卸载沉积的泥沙不同程度的覆盖并埋藏(湖平面缩小,河流发生摆动),或被后期洪水再次起动、搬运进而不同程度的改造(湖平面缩小,河流未发生摆动),形成多动力成因泥沙的空间叠置关系。受控于该期洪水惯性作用下搬运、卸载沉积形成的泥沙沉积体,与形成的地质年代无关,已经不具有继续向湖推进的动力条件。

4. 结论及启示

现代沉积环境中复杂的营力作用可以直接观察和记录,其作用的结果在沉积物的特征上能够得到如实反映,根据地质学领域普遍应用的“将今论古”的现实主义原则和比较岩石学方法,现代沉积环境的研究是推断古代沉积环境的依据,应用现代沉积环境与产物的关系能够推断古代沉积物的形成环境。借鉴上述原则和方法,从动态观点研究沉积动力过程中各种变量之间的定量关系进而研究沉积物搬运和沉积的动力机制,挖掘、解读、借鉴泥沙动力学在诸如床面底形判别准则方面的成果,建立不同沉积环境与水动力场、床面底形、沉积构造的关系,建立和完善受水动力学约束的沉积环境标志,将拓展沉积动力学的理论视野和思路,提高沉积环境研究精度,推动沉积模式的建立和学科概念的形成。

参考文献 (References)

- [1] 何起祥. 沉积地球科学的历史回顾与展望[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 10-18.
- [2] 孙枢. 中国沉积学的今后发展:若干思考与建议[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 3-10.
- [3] 鲜本忠, 朱筱敏, 岳大力, 等. 沉积学研究热点与进展: 第 19 届国际沉积学大会综述[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 816-826.
- [4] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学 [M]. 第 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-231.
- [5] 邵学军, 王兴奎., 河流动力学概论[M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 226-238.
- [6] 章梓雄, 董曾南. 粘性流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 1-490.
- [7] 曹叔尤. 水力学及河流动力学基本问题研究的现状与任务[J]. 四川大学学报工程科学版, 2002, 34(1): 1-5.
- [8] 谢鉴衡. 河流模拟[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990: 166-167.
- [9] 谢鉴衡, 魏良琰. 河流泥沙数学模型的回顾与展望[J]. 泥沙研究, 1987(3): 3-15.
- [10] 金德生. 实验流水地貌学研究的回顾与展望[J]. 地理学报, 1991(1): 57-65.
- [11] 解河海, 张金良, 郝振纯, 等. 水库异重流研究综述[J]. 人民黄河, 2008, 30(5): 28-30.
- [12] 陈诚, 唐洪武, 陈红, 等. 国内河工模型地形测量方法研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 76-79.
- [13] 马小川, 范奉鑫, 阎军. 海洋沉积动力过程原位监测平台及其应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011(4): 179-185.
- [14] 廖小永, 卢金友. 水工实体模型变态问题研究现状与展望[J]. 人民长江, 2008, 39(24): 57-60.
- [15] 汪德胜. 水力变态模型相似律问题的探讨[J]. 泥沙研究, 1987(4): 74-81.

- [16] 陈长植, 郑双凌, 马吉明. 变态模型对水流运动相似的影响[J]. 水利水电技术, 2007, 38(4): 35-38.
- [17] 张红武, 冯顺新. 河工动床模型存在问题及其解决途径[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 418-423.
- [18] 虞邦义, 吕列民, 俞国青. 河工模型时间变态问题试验研究[J]. 泥沙研究, 2006(2): 22-28.
- [19] 李敏, 朱红涛, 郭巧珍, 等. 沉积物理模拟技术进展及发展趋势[J]. 地质科技情报, 2010, 29(4): 137-142.
- [20] 窦国仁, 董凤舞. 河口海岸泥沙数学模型研究[J]. 中国科学: 数学, 1995(9): 995-1001.
- [21] 解刚. 山区河流平面二维泥沙数学模型[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2004: 1-94.
- [22] 陆永军. 三维紊流泥沙数学模型及其应用[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京水利科学研究院, 2002: 1-120.
- [23] 刘高峰. 长江口水沙运动及三维泥沙模型研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2011: 1-156.
- [24] 张明亮. 河流水动力及水质模型研究[D]: [博士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007: 1-108.
- [25] 郭颂歌. 浅水流动及其挟沙状态下的数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010: 1-59.
- [26] 李孟国. 海岸河口水动力数值模拟研究及对泥沙运动研究的应用[D]: [博士学位论文]. 青岛: 青岛海洋大学, 2002: 1-163.
- [27] 左利钦, 陆永军. 水沙数学模型与可视化系统的集成研究[J]. 水利水运工程学报, 2007(4): 1-8.
- [28] 钟德钰, 张磊, 王光谦, 等. 泥沙运动力学研究进展和前沿[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 52-58.
- [29] 韩其为, 胡春宏. 50年来泥沙研究所主要研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6(3): 170-182.
- [30] 韩其为. 水库淤积[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-643.
- [31] 张华杰. 湖泊流场数学模型及水动力特性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 1-140.
- [32] Bates, C.C. (1953) Rational Theory of Delta Formation. *AAPG Bulletin*, **37**, 2119-2162.
- [33] 齐亚林, 刘显阳, 杨时雨, 等. 内陆湖泊三角洲河口区水动力特征及地质意义[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 49-55.

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: 2163-3967, 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: ag@hanspub.org