DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2026.20251418

溪洛渡河道型水库空间梯度综合健康评价体系研究

赵明亮[1],徐 浩[2],刘芳枝[1],雷 湘[3],彭 辉[2],冯胜航[1]

(1. 中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心,湖北 宜昌 443000;2. 长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局,重庆 400025;3. 重庆水务集团股份有限公司水质检测分公司,重庆 400060)

摘要:水体健康评价是诊断生态系统功能状态的重要工具和关键手段,针对河道型水库的生态特征,以溪洛渡水库为例,构建了一套整合水环境、水生态、底泥环境及水动力的多维度健康评价体系。该体系涵盖水环境、水生态结构与功能、底泥环境和水动力4个系统层,并选取了水质、营养状态、浮游藻类、有机污染、重金属污染和流速等9项指标(分属6个准则层)进行量化评估。评价结果显示,2023年该河道型水库综合健康指数为80.9,整体处于"良好"。水库健康状况空间差异显著,上游优于中下游,后者因流速减缓存在水华风险,需引起管理方关注;水环境与底泥环境状况相对理想,而水动力条件受限及浮游藻类群落生物量偏低是影响水库整体健康水平的主要因素;该评价结果与水库实际生态状况较为吻合,表明所构建的评价体系具有应用价值,可推广应用于同类河道型水库的健康评价中。

关键词:河道型水库;健康评价;空间梯度;溪洛渡水库;水动力

中图分类号:X171.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)01-0052-05

Spatial Gradient Assessment of Ecosystem Health in River-Type Reservoirs: A Case Study of Xiluodu Reservoir

ZHAO Ming-liang[1], XU Hao[2], LIU Fang-zhi[1], LEI Xiang[3], PENG Hui[2], FENG Sheng-hang[1]

(1. River Basin Complex Administration Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443000, China;
2. Upper Changjiang River Bureau of Hydrological and Water Resources Survey, Chongqing 400025, China;
3. Water Quality Testing Branch of Chongqing Water Group Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: Water body health assessment is an important tool and key means for diagnosing the functional status of ecosystems. In view of the ecological characteristics of river-type reservoirs, taking Xiluodu Reservoir as an example, a multi-dimensional health evaluation system integrating water environment, water ecology, sediment environment and water dynamics has been constructed. The framework comprises four subsystems of water environment, water ecological structure & function, sediment environment, and hydrodynamics. Nine specific indicators (under 6 criteria) including water quality, trophic status, phytoplankton, organic pollution, heavy metal pollution, and flow velocity, are chosen for quantitative evaluation. The results show that the reservoir's comprehensive health index in 2023 was 80.9, indicating an overall "Good" status. Significant spatial heterogeneity exists, upstream areas consistently outperformed mid-downstream sections, where reduced flow velocity elevates algal bloom risks, warranting management attention. While the water and sediment environments were relatively favorable, constrained hydrodynamics and low phytoplankton biomass were the key limiting factors for ecosystem health. The assessment results align closely with the observed ecological conditions, demonstrating the framework's practical applicability for health evaluation in similar river-type reservoirs.

Key words: river-type reservoir; health evaluation; spatial gradient; Xiluodu Reservoir; hydrodynamics

1 概况

溪洛渡水库位于四川省雷波县和云南省永善县接壤处,是金沙江下游梯级水库的第3级,回水长度204 km,水质管理目标为Ⅲ类。溪洛渡水电站形成的水库具有水位变幅大、河道形态明显、水

收稿日期:2025-08-12,**修回日期**:2025-09-23,**接受日期**:2025-09-28

基金项目:中国长江三峡集团有限公司技术服务项目(0711571);长江水利委员会水文局科创基金(SWJ-25CJX05)

作者简介:赵明亮(1980-),男,硕士、高级工程师,研究方向为流域枢纽运行管理,E-mail:zhao_mingliang1@ctg.com.cn

通讯作者:彭辉(1982-),女,硕士、高级工程师,研究方向为水环境监测,E-mail:375148257@qq.com

中国知网 https://www.cnki.net

流惯性作用强等典型特征,是极具代表性的河道型水库。河道型水库的修建显著改变了河流的自然水文节律,导致库区出现水流滞缓、污染物累积等一系列生态环境问题,且带有明显的纵向梯度分异特征[1]。然而现有的评价办法[2]和研究方法在针对河流评价时,通常聚焦于单一水质指标或静态的生物群落结构,难以系统解析水动力、水质、底泥污染与水生生物群落间的耦合响应关系,也缺乏对空间异质性和底泥污染活性等关键驱动因子的动态诊断能力[3];针对一般湖库评价时,则默认水体均质分布,未能有效体现河道型水库特有的库尾—过渡区—坝前等敏感区域的梯度演化规律[4]。为此,本文基于季调节、具备明确库容的河道型水库的生态水文特性,以溪洛渡水库为例,利用长时间序列和多空间点位的综合监测数据,建立了一套融合水环境、藻类群落、底泥状况和水动力条件的健康评价方法,旨在清晰表征空间梯度差异,为同类型河道型水库生态调度和科学管理提供一定的理论支撑。

2　研究方法

2.1　监测数据

根据点位设置原则及方法,综合考虑沿途支流汇入、乡镇分布、回水库湾等要素,沿库区纵向梯度布设 7 个监测点位(编号 X1～X7,对应坝前至库尾方向),具体位置见图 1。2023 年对研究区域中 7 个采样点位进行了水环境、浮游藻类和底泥沉积物的调查监测,其中水环境与浮游藻类监测频率为 1 次/月,底泥为 1 次/年。



图 1　监测点位分布图

Fig. 1　Distribution of sampling points

水环境监测指标主要包括 pH 值、溶解氧、电导率、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、可溶性磷、总氮、氨氮、叶绿素 a、透明度、浊度、光照强度等。底泥检测指标共 12 项,主要包括基础理化指标(pH 值)、重金属(Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn)及有机污染指标(TP、TN、TOC)。浮游藻类包含藻类定性与定量鉴定。各点位指标取年均值参与计算。

2.2　评价方法

评价指标体系按照河道型水库特点,以水环境(WQ)、生态结构功能(AE)、底泥环境(SH)与水动力(HY)等作为系统层,以水质、营养状态、浮游藻类、底泥有机污染、底泥重金属污染和水体流速等作为准则层,基本覆盖水质状况、综合营养指数,浮游藻类多样性指数(H)、优势度指数(D)、均匀度指数(J)、丰富度指数(R),底泥有机污染指数、重金属潜在生态风险指数和水体流速状况。通过构建四维健康评价体系,结合空间梯度(库尾—坝前)解析各点位分别在 WQ、AE、SH 和 HY 等维度的健康状况及交互作用,从而诊断水库从库尾至坝前的生态环境综合健康状况的关键问题。

2.2.1　水环境健康

水环境评价包含水质评价和富营养化评价[5],分别用水质等级(WQS)和综合营养状态指数(S_{TLI})表征。水质等级按照《国家地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)[6]单因子评价,综合营养指数按照《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》进行计算[7]。

2.2.2　水生态结构功能健康

水生态结构功能健康评价主要关注藻类群落作为初级生产者和生态系统状态指示者的核心作用[8]。从 Shannon-Wiener、Simpson、Pielou 及 Margalef 等指数分别评价对水库内藻类多样性、优势种、均匀度及丰富度。

2.2.3　底泥环境健康

底泥环境健康评价内容为底泥污染指数(I_{SPI})和潜在生态风险指数(I_{RI}),前者主要针对底泥中的 C、N、P 等无机污染,后者则侧重底泥中的重金属污染[9]。其中 I_{SPI} 值按照《河湖健康评估技术导则》(SL/T 793-2020)[2]计算。I_{RI} 值国内尚无相关标准,本文参照生态环境部《关于印发江河湖泊生态环境保护系列技术指南的通知》(环办〔2014〕111 号)附件 3《湖泊河流环保疏浚工程技术指南》中关于污染底泥分类及等级划分要求[10],其计算公式为:

$$E_r^i = T_r^i \otimes C_d^i / C_r^i \tag{1}$$

$$I_{RI} = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \tag{2}$$

中国知网　https://www.cnki.net

式中，E_r^i 为单一污染物潜在生态风险系数；T_r^i 为单个污染物毒性响应参数；C_d^i 为底泥中重金属的实测含量，mg/kg；C_r^i 为计算所需的参比值，mg/kg；I_{RI} 为多种金属的潜在生态风险指数。

2.2.4 水动力健康

相关研究表明[11]，0.05～0.15 m/s 是藻类生长的生态敏感区间，当流速低于 0.05 m/s 时水体溶解氧降低，形成厌氧环境，水体自净能力会严重下降甚至丧失。相反，较快的流速利于水体新陈代谢，促进水体环境健康循环[12]。

2.3 评价指标权重及得分

为便于以同一尺度开展总体评价，对各评价指标进行标准化赋值，对各参数乘以对应权重系数，得到各指标的评价结果。即：

$$S_1 = \min(S_{WQ}, S_{TLI}) \tag{3}$$

$$S_2 = 0.25(W_1 H + W_2 D + W_3 J + W_4 R) \tag{4}$$

$$S_3 = W_5 I_{SPI} + W_6 I_{RI} \tag{5}$$

$$S = W_7 S_1 + W_8 S_2 + W_9 S_3 + W_{10} S_4 \tag{6}$$

式中，S 为各点位健康指数；S_1 为水环境因子；S_{WQ} 为水质等级得分；S_2 为水生态结构功能因子；S_3 为底泥环境健康与活性因子；S_4 为水动力健康因子；W_1～W_{10} 分别为对应因子的相关系数。

考虑到研究区域的特定管理目标[13]，通过专家德尔菲法(Delphi)结合层次分析法(AHP)确定各权重系数，见表 1。

表 1 水库空间梯度综合健康评价指标权重系数

Tab. 1 Weight coefficient of reservoir spatial gradient comprehensive health evaluation index

目标层	系统层	准则层	指标	指标层内权重	系统层权重
水库空间梯度综合健康评价	水环境	水质	水质状况	取最小值	0.30
		营养状态	综合营养指数		
	水生态结构功能	浮游藻类	多样性指数	0.25	0.30
			优势度指数	0.25	
			均匀度指数	0.25	
			丰富度指数	0.25	
	底泥环境	有机污染	底泥污染指数	0.60	0.10
		重金属污染	潜在生态风险指数	0.40	
	水动力	流速	平均流速		0.30

水库健康指数及空间差异因子计算公式为：

$$A = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} S \tag{7}$$

$$S_R = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(S-A)^2} \tag{8}$$

式中，A 为水库健康指数；S_R 为水库空间差异因子；n 为监测点位个数。

2.4 评价结果标准等级

对 WQ、AE、SH、HY 等指标进行加权求和，根据 A 和 S 的数值范围，与评价等级对照确定评价结果，并划分健康等级，综合评价得分与相应等级见表 2。

表 2 水库空间梯度健康评价体系得分与等级对照表

Tab. 2 Comparison table of scores and grades of reservoir spatial gradient health evaluation system

系统层	指标层		评价分别得分				
水环境	水质评价法	水质类别	Ⅰ～Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	劣Ⅴ	
		水质状况(WQS)	良好	轻度污染	中度污染	重度污染	
		赋分	100	50	25	0	
	综合营养状态指数法	营养状态	贫营养	中营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养
		综合营养状态指数(S_{TLI})	[0，30)	[30，50]	(50，60]	(60，70]	(70，100]
		赋分	100	[75，100)	[50，75)	[25，50)	[0，25)
水生态结构功能	多样性指数	多样性	优秀	良好	中等	较差	很差
		多样性指数(H)	>3	(2，3]	(1，2]	(0，1]	0
		赋分	100	[66.7，100)	[33.3，66.7)	(0，33.3)	0
	优势度指数	优势度	优秀	较优	中等	较差	
		优势度指数(D)	>0.8	(0.5，0.8]	(0.3，0.5]	<0.3	
		赋分	100	(40，100]	(0，40]	0	
	均匀度指数	均匀度	优秀	较优	中等	较差	
		均匀度指数(J)	>0.8	(0.5，0.8]	(0.3，0.5]	<0.3	
		赋分	100	(40，100]	(0，40]	0	
	丰富度指数	丰富度	优	中等	差	极差	
		丰富度指数(R)	>3	(1，3]	(0.1，1]	<0.1	
		赋分	100	(60，100]	(0，60]	0	
底泥环境健康与活性	底泥污染指数	底泥污染状况	清洁	较清洁	尚清洁	有污染	
		底泥污染指数(I_{SPI})	<0.05	[0.05，0.2)	[0.2，0.5)	>0.5	
		赋分	100	[90，70)	[70，40)	0	
	潜在生态风险指数	风险程度	低风险	中风险	高风险	很高风险	极高风险
		潜在生态风险指数(I_{RI})	<150	[150，300)	[300，600)	[600，1 200)	≥1 200
		赋分	100	(60，100)	(40，60]	(0，40]	0
水动力	平均流速	流动状况	快速流动	流动稍缓	流动较缓	流动缓慢	死水、完全不流动
		平均流速(v)	>0.5	(0.3，0.5]	(0.1，0.3]	(0.05，0.1]	<0.05
		赋分	100	[100，80)	[80，60)	[60，0)	0
综合健康等级		等级	优秀	良好	中等	较差	很差
		分值(S、A)	[100，90)	[90，75)	[75，60)	[60，45)	[0，45)

中国知网 https://www.cnki.net

3　结果分析

研究区域空间梯度综合健康评价综合得分为80.9,表明水库目前处于良好状态,与水库实际情况相符。如表 3、图 2 所示,各点位间空间差异较为明显(S_R=7.08),其中 X7 得分高于 90,为优秀水平,其余 6 个点位处于 75～90 区间,为良好水平。从空间分布上看,X7～X2 评价得分呈递减趋势,到 X1(坝前)呈小幅回升。下游点位水动力较弱,水体交换能力变差,浮游藻类容易聚集繁殖生长,从而导致水华爆发,降低水环境质量,如X1～X5 点位,涉及到水库蓄水区域的中下段,为健康风险程度较高的区域,需重点防控。

表 3　综合评价结果

Tab. 3　Comprehensive evaluation results

系统层	指标	X7	X6	X5	X4	X3	X2	X1	系统层得分	A
S_1	S_{WQ}	100	100	100	100	100	100	100	99.39	80.9
	赋分	100	100	100	100	100	100	100		(S_R=7.08)
	S_{TLI}	29.75	29.24	31.36	32.03	28.93	28.95	28.63		
	赋分	100	100	98.30	97.46	100	100	100		
S_2	H	2.2	2.08	1.81	1.95	1.52	1.39	1.85	63.97	
	赋分	73.36	69.36	60.37	65.04	50.72	46.39	61.71		
	D	0.69	0.66	0.59	0.6	0.48	0.5	0.63		
	赋分	78.00	72.00	58.00	60.00	36.00	40.00	66.00		
	J	0.69	0.7	0.61	0.64	0.62	0.68	0.74		
	赋分	78.00	80.00	62.00	68.00	64.00	76.00	88.00		
	R	1.36	1.31	1.26	1.25	1.02	0.87	1.14		
	赋分	67.20	66.20	65.20	65.00	60.40	51.33	62.80		
S_3	I_{SPI}	0.021	0.093	0.026	0.055	0.113	0.129	0.086	93.13	
	赋分	100	84.27	100	89.33	81.60	79.47	85.20		
	I_{RI}	85	101.7	60	68	71.8	76.6	71.4		
	赋分	100	100	100	100	100	100	100		
S_4	v	0.526	0.451	0.228	0.172	0.149	0.142	0.132	75.34	
	赋分	100	95.10	72.80	67.20	64.90	64.20	63.20		
S		92.2	89.2	79.7	78.1	74.2	74.1	79.0		

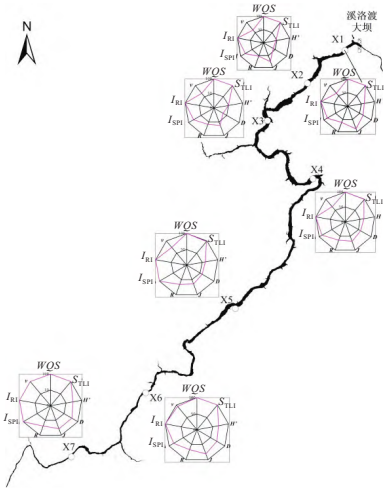


图 2　溪洛渡水库各点位健康评价图

Fig. 2　Health evaluation of each point in Xiluodu Reservoir

由表 3、图 2 可知:①水环境方面。水质各点位均达到Ⅰ～Ⅱ类水平,S_{TLI} 范围为 28.62～32.03(赋分 97.46～100),整体呈贫营养—中营养状态,峰值点位 X4 位于库区中段,低值点位 X1 位于坝前。水库水环境系统层综合得分为99.39,等级为优秀,表明水体水质较好,处于较低的营养状态。②藻类多样性方面。5 个点位 H 值主要集中在 1～2 之间,处于中等水平;6 个点位 D 值位于 0.5～0.8 之间,处于较优水平;7 个点位 J 值均位于 0.5～0.8 之间,处于较优水平,6 个点位 R 值在 1～3 之间,处于中等水平。水库总体浮游藻类分布处于中等偏好水平,受贫营养水体影响,水中浮游藻类生物量及物种数偏低。水库水生态结构功能系统层综合得分为 63.97,等级为中等,表明水中营养物质偏少,对浮游藻类生长产生限制。③底泥有机污染方面。$I_{SPI}\in[0.05,0.2)$之间的点位有 5 个,其余 2 个点位为清洁状态。重金属污染方面,全部点位 I_{RI} 均<150,属低风险等级。水库底泥环境系统层综合得分为 93.13,等级为优秀,表明底泥受污染程度较轻,未出现重金属富集。④水动力方面。流速沿库区纵向梯度显著递减,流速在 X7～X6 区间从急流过渡至临界流,从 X5 点位开始流速降至 0.3 m/s 以内,进入流动较缓状态,水力多样性变小,富营养化风险逐渐增高。水库水动力系统层综合得分为 75.34,等级为良好,表明其流动状态优于非河道型水库但弱于天然河流。

4　结论

a. 本文基于季调节、具备明确库容的河道型水库特性,提出了一套针对性的健康评价体系,该体系对现有评价体系中对空间梯度特征量化不足、底泥污染活性不全面及水动力调控机制影响等问题有所改进,较为全面地表征了季调节河道型水库从库尾到坝前水体健康空间格局与驱动机制,同时识别了关键问题区域及其核心驱动因子。

b. 将该体系应用于溪洛渡水库的综合健康评价,结果显示 2023 年综合得分为 80.9 分,表明整个水库处于良好状态。最上游点位达到优秀水平,其余点位均为良好,水库蓄水中下段为健康风险相对较高的区域,建议管理单位予以重点关注。

c. 该评价结果与溪洛渡水库实际状况较为吻合,验证了所构建体系的科学性与适用性。该体系主要适用于与溪洛渡水库相似的、具备明确库容且具有一定调节性能(如季调节、周调节)的河道型水库健康评价,为同类水库的生态健康诊断提供了可借鉴的技术框架。

中国知网　https://www.cnki.net

参考文献：

[1] JING P F, YANG Z H, YIN W, et al. Release estimation of pollutants in river by the variational analysis approach[J]. Journal of contaminant hydrology, 2022, 248: 103999.

[2] 中华人民共和国水利部. 河湖健康评估技术导则：SL/T 793-2020[S]. 北京：中国水利水电出版社，2020.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical guidelines for river and lake health assessment: SL/T 793-2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.(in Chinese))

[3] RAVEN P J,HOLMES N T H, NAURA M, et al. Using river habitat survey for environmental assessment and catchment planning in the U. K[C]//Assessing the Ecological Integrity of Running Waters. Dordrecht: Springer, 2000: 359-367.

[4] WANG X Y, CHENG Y N. Urban lake health assessment based on the synergistic perspective of water environment and social service functions[J]. Global challenges, 2024, 8(10): 2400144.

[5] HARTIG J H, FRANCOEUR S N, CIBOROWSKI J J H, et al. An ecosystem health assessment of the Detroit River and western Lake Erie[J]. Journal of great lakes research, 2021, 47(4): 1241-1256.

[6] 国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局. 国家地表水环境质量标准:GB3838-2002[S]. 北京：中国标准出版社,2002.(State Environmental Protection Administration, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. Environmental Quality Standard for Surface Water: GB3838-2002[S]. Beijing: China Standard Press, 2002.(in Chinese))

[7] 吴卫菊，周大量，胡红娟，等. 湖北省 4 个重点湖泊近年来水质变化及水生态环境质量评价[J]. 长江流域资源与环境，2025，34(4)：862-870.(WU W J, ZHOU D L, HU H J, et al. Assessment of water quality variation and current status of aquatic ecological environment quality of four key lakes in Hubei Province[J]. Resources and environment in the Yangtze Basin, 2025, 34(4): 862-870.(in Chinese))

[8] LI Y R, YU Z D, JI S P, et al. Diverse drivers of phytoplankton dynamics in different phyla across the annual cycle in a freshwater lake[J]. Journal of freshwater ecology, 2021, 36(1): 13-29.

[9] 王佩，卢少勇，王殿武，等. 太湖湖滨带底泥氮、磷、有机质分布与污染评价[J]. 中国环境科学，2012，32(4)：703-709.(WANG P, LU S Y, WANG D W, et al. Nitrogen, phosphorous and organic matter spatial distribution characteristics and their pollution status evaluation of sediments nutrients in lakeside zones of Taihu Lake[J]. China environmental science, 2012, 32(4): 703-709.(in Chinese))

[10] 邱阳，任晓鸣，王菲，等. 骆马湖流域表层沉积物重金属分布特征及风险评价[J]. 环境科技，2024，37(4)：58-64.(QIU Y, REN X M, WANG F, et al. Distribution characteristics and risk evaluation of heavy metal in surface sediments of Luomahu Lake Basin[J]. Environmental science and technology, 2024, 37(4): 58-64.(in Chinese))

[11] 李哲，陈永柏，李翀，等. 河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展[J]. 地球科学进展，2018，33(7)：675-686.(LI Z, CHEN Y B, LI C, et al. Advances of eco-environmental effects and adaptive management in river cascading development[J]. Advances in earth science, 2018, 33(7): 675-686.(in Chinese))

[12] 高学平，胡泽，闫晨丹，等. 考虑水力连通性的水系连通评价指标体系构建与应用[J]. 水资源保护，2022，38(2)：41-47.(GAO X P, HU Z, YAN C D, et al. Construction and application of water system connectivity evaluation index system considering hydraulic connectivity[J]. Water resources protection, 2022, 38(2): 41-47.(in Chinese))

[13] 朱俊，张勇，毕明亮，等. 大型水电工程与区域生态因子变化的关联性研究——以向家坝、溪洛渡电站为例[J]. 环境保护科学，2024，50(2)：85-93.(ZHU J, ZHANG Y, BI M L, et al. The relationship between large hydropower projects and regional ecological factors—Taking Xiangjiaba and Xiluodu power stations as examples[J]. Environmental protection science, 2024, 50(2): 85-93.(in Chinese))

(上接第 28 页)

[8] 李佩茹，张保祥，姜欣. 基于可变模糊集理论的山东省旱灾风险动态评价与区划[J]. 水电能源科学，2022,40(3)：22-25，144.(LI P R, ZHANG B X, JIANG X. Drought risk dynamic assessment and zoning in Shandong Province based on variable fuzzy sets theory[J]. Water resources and power, 2022, 40(3): 22-25, 144.(in Chinese))

[9] 闫正龙，高凡，何兵，等. 1990—2020 年渭河流域生境质量的时空变化及影响因素分析[J]. 环境科学，2025，46(9)：5850-5860.(YAN Z L, GAO F, HE B, et al. Spatiotemporal changes and influencing factors of habitat quality in the Weihe River Basin from 1990 to 2020[J]. Environmental science, 2025, 46(9): 5850-5860.(in Chinese))

中国知网 https://www.cnki.net