



水库高含沙排沙 对下游河流鱼类的影响研究

白音包力皋 许凤冉 陈兴茹 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



水库高含沙排沙 对下游河流鱼类的 影响研究

白音包力皋 许凤冉 陈兴茹 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

高含沙排沙是减轻水库淤积、延长水库寿命和提高工程效率的重要手段。然而,水库排沙对生态环境的负面影响不可小觑。本书在分析国内外研究现状及存在问题的基础上,探讨了水库建设运行与生态环境之间的关系,对我国黄河小浪底水库调水调沙进行了实地监测调查,并通过实验研究了不同含沙量水体对鱼类生存的影响,以日本水库泥沙管理经验为例,探讨了基于流域的水库泥沙管理模式,为我国今后开展基于生态环境保护的调水调沙调度管理提供参考。

本书可供水资源管理、生态环境保护、水利水电工程、泥沙科学、水利工程施工及相关领域的研究者及院校师生参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

水库高含沙排沙对下游河流鱼类的影响研究 / 白音包力皋, 许凤冉, 陈兴茹著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2015. 8

ISBN 978-7-5170-3806-1

I. ①水… II. ①白… ②许… ③陈… III. ①水库泥沙—泥沙输移—影响—下游—鱼类—生存—研究—洛阳市
IV. ①Q959.4②TV145③TV632.613

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第264825号

书 名	水库高含沙排沙对下游河流鱼类的影响研究
作 者	白音包力皋 许凤冉 陈兴茹 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	170mm×240mm 16开本 10.25印张 195千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
定 价	39.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



前言

Preface

水库作为人类开发利用水资源的重要工程，对人类经济社会发展起到了防洪、供水、发电、航运、旅游、渔业等综合作用。截至2010年，中国已建水库9.8万座，位居世界首位。影响水库寿命的主要因素有水库的老化和泥沙淤积问题。世界各国尤其是拥有多泥沙河流的国家都在积极采取各种措施清除水库内的泥沙，延长水库寿命，提高水资源开发利用效率。我国大多数水库面临着较为严重的泥沙淤积问题，尤其是在黄河流域，库容大于100万 m^3 的已建水库达700多个，总库容近900亿 m^3 ，已经淤积的库容近120亿 m^3 ，占总库容的13%。其中小型水库的淤积问题更为严重，淤积量占总库容的90%。

水库泥沙管理是水库运行管理的重要环节。年内流入的大部分泥沙主要集中在洪水期，在洪水期一般采取低水位运用方式，通过降低水位可以增加库区水流流速，入库的大部分泥沙可以随洪水排出。然而伴随着水库排沙工作的深入，人们逐渐认识到高含沙水流下泄对下游河流生态环境会造成一定程度的影响，如高含沙水流对以鱼类为代表的生物生存造成影响、冲刷下游河床、改变生境条件等。较早关注高含沙水流下泄对下游生态环境影响的国家有瑞士、法国和日本等。瑞士颁布的《绿色水电认证标准》明确将下泄水体含沙量作为重要指标之一。日本则通过实验和原型观测相结合的研究方法，建立了以香鱼为代表的鱼类与泥沙颗粒大小、含沙量的关系曲线，提出了以DO、COD参数为代表的水质控制指标，减轻水库排沙对鱼类的影响。可见，发达国家较早注意到水库高含沙排沙对下游河流生态环境的影响问题，相继提出了保护下游水生生物的

排沙控制性指标体系，并通过法律法规等形式规范水库排沙运行方式，减轻了水库建设运行对生态环境的负面影响。

我国在该领域认知较晚，今后需要在水库排沙运行方式中考虑对生态环境的影响问题。作者于2003—2006年在日本留学攻读博士学位期间，开始接触该领域的相关研究，并开展了相应研究工作。为推动我国该领域研究的深入开展，作者申请了国家自然科学基金项目“水库高含沙排沙对下游河流鱼类影响研究”，并获得了资助（资助号：50879092），取得了有益的研究成果。本书是作者近10年来在该领域研究成果的总结提炼，期待为我国考虑生态环境保护的水库排沙运行管理提供科学依据，为水库生态调度提供技术支持。

作者

2015年6月



目 录 Contents

前言

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 相关研究进展	2
1.2.1 国内外水库排沙概况	2
1.2.2 水库排沙对下游河流生态环境的影响及评价指标	4
1.2.3 水库排沙对鱼类的影响	6
1.2.4 含沙量对鱼类影响的评价方法	10
1.3 本书研究的主要内容	11
1.3.1 研究目标	11
1.3.2 研究方案和技术路线	12
1.3.3 主要内容	13
参考文献	15
第2章 水库建设运行对生态环境的影响及生态调度	18
2.1 水库建设对下游河流生态环境的综合影响	18
2.1.1 对水文过程的影响	18
2.1.2 对水质的影响	20
2.1.3 富营养化与缺氧化	21
2.1.4 冷水与温水现象	21
2.1.5 浑水水库与气体过饱和现象	22
2.1.6 对泥沙过程的影响	22
2.1.7 对水生生物的影响	23
2.2 水库淤积及水库排沙	25
2.2.1 水库淤积情况	25
2.2.2 水库泥沙运动方式	29
2.2.3 水库排沙方式	30

2.3 基于生态的水库调度..... 33

2.3.1 生态环境基流调度 34

2.3.2 改善河流水质的调度 34

2.3.3 改善水生生物生境的调度 35

2.3.4 恢复河流泥沙连续性的调度 36

参考文献 36

第3章 黄河小浪底水库调水调沙运行情况 38

3.1 黄河流域治理开发与保护的主要任务..... 38

3.1.1 黄河流域概况 38

3.1.2 黄河流域泥沙问题 39

3.1.3 黄河流域治理开发与保护的主要任务 39

3.2 黄河调水调沙背景及目的..... 41

3.2.1 黄河流域水库淤积情况 41

3.2.2 黄河调水调沙目的 42

3.3 小浪底水库调水调沙运行情况..... 42

3.3.1 水库条件 43

3.3.2 水文条件 47

3.3.3 下游河道情况 48

3.3.4 调水调沙运行情况 48

3.3.5 调水调沙运行效果 52

参考文献 54

第4章 调水调沙期间小浪底水库下游河道水质变化调查分析 56

4.1 调水调沙期间各断面主要水质指标的变化..... 56

4.1.1 黄河干流水质监测断面 56

4.1.2 各断面 DO、COD_{Mn}变化 56

4.1.3 各断面 pH 值、NH₃-N 变化 60

4.1.4 各断面水质变化的相关性分析 65

4.2 调水调沙期间小浪底水库下游河道水质调查..... 68

4.2.1 调水调沙期间下游河道含沙量变化 68

4.2.2 调水调沙期间下游河道水体溶解氧变化 69

4.2.3 调水调沙期间其他水质指标变化情况 71

4.2.4 含沙量与下泄水水质指标的相关性分析 74

4.3 调水调沙期间小浪底水库下游河道水质变化原因分析..... 75

4.3.1 泥沙对水体 DO 的影响 75

4.3.2	泥沙对水体高锰酸盐指数 (COD _{Mn}) 的影响	76
4.3.3	泥沙与营养性污染物的相互作用	76
4.3.4	泥沙对重金属的吸附作用	77
4.4	小结	78
	参考文献	78
第5章	水库高含沙排沙对鱼类影响调查研究	80
5.1	排沙过程中受影响的鱼类情况	80
5.1.1	清水下泄阶段的影响	80
5.1.2	排沙阶段的影响	81
5.2	小浪底水库排沙期间含沙量变化对鱼类影响	82
5.2.1	国外含沙量对鱼类影响评价标准	82
5.2.2	小浪底水库排沙期间含沙量变化对鱼类影响	84
5.3	溶解氧变化对鱼类影响	85
5.3.1	鱼类呼吸系统	85
5.3.2	鱼类对缺氧和运动的生理反应	87
5.3.3	排沙过程中溶解氧变化对鱼类的影响	88
5.4	排沙对鲤鱼生理功能的影响	89
5.4.1	采样过程及分析方法	89
5.4.2	排沙对黄河鲤鱼消化道内容物及食性的影响	90
5.4.3	排沙对黄河鲤鱼生理功能的影响	92
5.5	小结	97
	参考文献	98
第6章	不同含沙量对黄河鲤鱼影响的实验研究	101
6.1	鱼类游泳耐久力的生物学基础	101
6.2	不同含沙量对黄河鲤鱼影响的实验研究	102
6.2.1	材料与方法	102
6.2.2	实验结果	104
6.2.3	讨论	105
6.3	小结	107
	参考文献	107
第7章	多泥沙水库排沙效应综合评价及对策建议	109
7.1	水库排沙效应综合评价的内容	109
7.2	水库排沙效应综合评价指标体系的建立	110
7.2.1	评价指标体系建立的原则	110

7.2.2 评价指标体系的建立	111
7.2.3 各指标权重的确定方法	111
7.3 黄河小浪底水库调水调沙效应综合评价	113
7.4 小结	115
参考文献	115
第8章 日本水库泥沙综合管理对我国的启示	117
8.1 概况	117
8.1.1 日本流域泥沙综合管理	117
8.1.2 日本水库泥沙淤积概况	119
8.1.3 日本水库泥沙管理措施	120
8.2 黑部川水库联合排沙	128
8.2.1 黑部川概况	128
8.2.2 黑部川联合排沙的目的	130
8.2.3 黑部川联合排沙过程	130
8.2.4 含沙量与水库下泄水质指标的相关性分析	135
8.2.5 水库排沙对鱼类影响的 SI 评价	137
8.2.6 鱼类避难水路设置情况	139
8.3 天龙河流域综合泥沙管理	140
8.3.1 天龙河流域概况	140
8.3.2 天龙河流域泥沙问题	143
8.3.3 天龙河流域泥沙综合管理技术措施	144
8.3.4 美和水库永久性泥沙措施	146
参考文献	152
第9章 结语与展望	154
9.1 结语	154
9.2 展望	155

第1章 | 绪论

1.1 引言

水库作为以防洪、水资源开发利用等为目的修建的重要基础设施，在防洪、供水、能源等支持经济社会发展方面发挥着重要作用。然而，过去主要注重工程、资源、能源等因素而建设的水库大坝，如今正在对生态环境造成不同程度的负面影响，主要表现在下游河流生态环境恶化、生物物种减少或灭绝、地下水水位下降、湖泊湿地萎缩、海岸侵蚀等。因此，如何在充分发挥水库防洪、发电和供水等经济社会效益的同时，协调大坝建设与生态环境保护之间的关系，减轻水库对河流生态环境的负面影响，成为河流水资源可持续利用与管理面临的新课题。其中，采取适当的水库泥沙管理是保证水库拥有长期、有效库容，修复河流泥沙的连续性，减轻水库建设对河流生态环境的影响，实现水资源可持续管理的关键之一。因此，水库泥沙管理是发达国家和发展中国家共同面临的重大课题，很多国家都在开展探讨和研究工作。

水库排沙在减轻水库淤积、延长水库寿命、恢复河流泥沙连续性、改善水库下游河流生态环境等方面具有重要意义。水库排沙大致可分为水力排沙和机械排沙两种，其中水力排沙是经济、高效的排沙方法，又可分为水库排空排沙、异重流排沙和浑水排沙等。但是，水库在进行水力排沙时，短时间的流量和水质变化可能会对水库下游的河流生态环境造成负面影响，这些影响主要包括含沙量的增加影响鱼类摄取氧气的的能力；水库底泥还原性物质的排出导致水中溶解氧浓度下降，严重时出现鱼类昏迷或死亡现象；水库下游的河床发生大幅度改变对底栖无脊椎动物以及水生植物产生影响，需引起注意和防范。

我国黄河多座水库联合调水调沙时出现的“流鱼”现象是水库排沙对下游河流生态环境造成影响的一个典型案例。黄河每年入汛时，位于黄河中游的三门峡水库开闸放水排沙，随着下游河流含沙量的增大和排沙时间的持续，会出现很多处于昏迷或半昏迷状态的鱼类在水面漂流，这种现象被称为黄河“流



鱼”，此种现象也在小浪底水库调水调沙期间出现。根据相关资料和媒体报道可知，黄河“流鱼”现象已经持续了半个多世纪，但还没有引起国内有关部门和学者的重视。水库排沙除对鱼类产生不利影响外，还会造成下游河床在短时间内发生大幅度改变，导致大多数底栖动物和河床植物被冲走或埋没。鱼类在河流生态系统中处于最高层次，而底栖动物在河流生态系统中可以链接基础生产者和高层消费者，对河流物质和能量循环具有重大贡献。因此，目前黄河河流生态恶化和物种锐减的原因，除了水量减少和水质恶化等因素外，还必须考虑水库排沙对河流生态环境造成的负面影响。

另外，我国水资源短缺促使水库排沙注重排沙效率，导致大多数水库排沙时都会出现高含沙水流过程，加之我国很多河流和水库污染均较严重，水库泄流或排沙时，淤积在水库和河床的污染物与泥沙会发生复杂的生物化学反应，这也可能加重水库排沙对下游河流水质、水生植物、底栖无脊椎动物、鱼类及其产卵和栖息场所等水环境和水生态的影响程度。

因此，研究高含沙水库排沙对下游河流生态环境的影响，查明发生黄河“流鱼”现象的原因，建立包括排沙比、生态环境影响程度等多指标在内的综合评价体系，并采取有效的工程措施和管理措施，减轻水库运行管理对河流生态环境的影响，对于保护河流生态环境，实现水资源可持续利用和国家生物多样性保护战略具有重要的理论意义和应用价值。

1.2 相关研究进展

1.2.1 国内外水库排沙概况

国内外许多水库相继开展了水库排沙，对维持有效库容、延长水库寿命起到了重要的作用，见表 1.1。其中，比较系统连续排沙的案例包括位于日本黑部川的出平水库和宇奈月水库的联合排沙，位于法国 Isère 河流的 Saint Egrève、Beauvoir、Saint Hilaire、Pizanon、La Vanelle 和 Beaumont 等六座水库的联合排沙，以及中国黄河小浪底—三门峡—万家寨—陆浑—固县水库群的调水调沙试验和运行。其中，黑部川出平水库和宇奈月水库的联合排沙是每年第一场洪峰过后开始降低库水位进行排空排沙，自 2001 年以来，已实施了 10 余次联合排沙，有效减轻了水库淤积、实现了水库上下游河流泥沙的连续性，改善了下游河床颗粒级配和河口泥沙环境。在我国，黄河小浪底水库建成后，自 2002 年至 2015 年，联合上游万家寨、三门峡、陆浑和固县等水库共实施了 14 次调水调沙试验和运行，下游河道主槽最小过流能力由 2002 年汛前的 $1800\text{m}^3/\text{s}$ 提高到目前的 $4200\text{m}^3/\text{s}$ ，有效改善了下游河道的泥沙淤积状况。其中，2010 年通过实施调水调沙，河口刁口河流路断流 34 年后全线过流，湿地



生态系统淡水资源得到有效补给。因此，自小浪底水库建设运行以来，在保障黄河中下游人民生命财产安全、促进经济社会发展和防止黄河下游断流等方面发挥了重要作用。

表 1.1 水 库 排 沙 案 例

水库名称	所属国家	坝高/m	初始库容/ 10^6 m^3	年平均入库泥沙量/ 10^6 m^3	水库水体交换周期/(次/a)	水库寿命/a	平均排沙流量/ (m^3/s)	排沙时间/h	排沙频率/(次/a)
出平	日本	76.7	9.01	0.62	148	14.5	200	36	1
宇奈月	日本	97	24.7	0.96	71	25.7	300	48	1
Baira	印度	51	9.6	0.3	204	32	44	31	—
Ichari	印度	36.8	11.6	5.7	459	2.0	2.16	24	—
三门峡	中国	45	9640	1600	4	6.0	2000	2900	—
小浪底	中国	154	12650	1351	334	9.36	3000	480	1
Sefid-Rud	伊朗	82	1760	50	3	35.2	100	2900	—
Gmund	澳大利亚	37	0.93	0.07	215	13.3	6	168	—
Santo Domingo	委内瑞拉	47	3	0.08	150	37.5	5	72	—
Guernsey	美国	28.6	91	1.7	23	53.5	125	120	—
Quchi-Kurgan	苏联	35	56	13	266	4.3	1000	2400	—
Gebidem	瑞士	113	9	0.5	48	18	10	45	1
Verbois	瑞士	32	15	0.33	694	45.5	600	36	3
Barenburg	瑞士	64	1.7	0.02	2128	85	90	20	5
Ferrera	瑞士	28	0.23	0.008	5556	28.8	80	12	5
Genissiat	法国	104	53	0.73	214	72.6	600	36	3

注 1. 水库寿命表示水库库容与年平均入库泥沙量之比。

2. “—”表示无资料。

小浪底工程是黄河中游继三门峡工程之后第二座大型水利枢纽，坝址控制面积为 69.42 万 km^2 ，占黄河流域面积的 92.3%，总库容 126.5 亿 m^3 ，承担着黄河下游防洪、减淤以及供水、灌溉、发电等除害兴利和综合利用的任务。工程于 1999 年 10 月 25 日下闸蓄水，至今已有十余年。1999 年 10 月至 2009 年 10 月，水库拦截泥沙 25.94 亿 m^3 ，占总来沙量的 84%，下游河道共冲刷 17.6 亿 t 泥沙。小浪底水库的重大贡献是通过十多年的运用（包括水库调水调沙），使黄河下游河道长期处于持续冲刷状态，从而扭转了 20 世纪末期发生的连年萎缩局面，河道得到复苏，防洪能力逐年提升。

10 多年来,小浪底水库的运用以蓄水拦沙为主,其任务是防洪、调水调沙、减淤,满足生产生活用水及发电供水。每年一般6月中旬至7月上旬,因黄河防汛的需要,腾空汛期限制水位以上的库容并与三门峡、万家寨等干支流水库联合调度,适时进行调水调沙;7—10月为黄河主汛期,水库维持在汛期限制水位以下运行。2005年起,调水调沙已列入小浪底水库生产调度运行。

异重流排沙是小浪底水库主要的排沙方式。按其形成原因,有天然和人工异重流。天然异重流由上游来的洪水形成。当挟带较多泥沙的洪水进入小浪底水库以后,悬沙强烈分选,较粗的泥沙首先在回水末端沉下,细泥沙则继续下行,在一定距离后潜入原有清水底部,沿库底向坝前推进,形成异重流。其泥沙中径颗粒(d_{50})为 $0.005\sim 0.012\text{mm}$, d_{90} 则小于 0.03mm 。

人工异重流一般发生在小浪底水库与其上游的三门峡、万家寨水库联合调度的调水调沙运用期间。在第一阶段,用三门峡水库拦蓄的清水冲刷小浪底水库库尾的河床,冲刷产生的细颗粒泥沙潜入小浪底水库库底形成异重流。在第二阶段,万家寨水库下泄清水,冲刷万家寨以下黄河干流和三门峡及小浪底水库的库尾河床,冲刷产生的细颗粒泥沙也在小浪底水库内形成异重流。这两种异重流组成了调水调沙运用过程中人工异重流的全过程。

2001—2009年,小浪底水库共发生10次天然异重流及9次人工异重流。如以出库沙量和进库沙量的比值作为异重流的排沙比,则天然异重流进行的排沙比为 $0\sim 86\%$,人工异重流进行的排沙比为 $4.4\%\sim 61.8\%$ 。影响异重流排沙比的因素有水库水位、上游水库来水来沙大小、潜入点位置、潜入点以上淤积物粒径和潜入点以下淤积体坡降等。

1.2.2 水库排沙对下游河流生态环境的影响及评价指标

水库进行水力排沙时,库区泥沙流入下游河道,流量和水质的短时间变化将引起下游河道物理、化学和生物环境的变化,可能对河流生态系统产生不利影响。瑞士、法国和日本等国家在水库排沙对下游河流生态环境的影响方面已积累了丰富的经验。其中,法国电力公司(FED)按空间和时间尺度分析水库排沙对河流生态要素的影响程度。以其系统调查的水流含沙量及其持续时间对鱼类的影响关系,作为水库排沙控制含沙量标准被法国和瑞士等国家应用。G. Merle从影响类型、影响的时空分布特点分析了水库排沙对下游河流河床地貌、水质、水生植物、底栖动物、鱼类等生态环境的影响。其中,河流流速的大幅提高和大量泥沙进入下游河道,下游河床发生较大的冲淤变化,改变坝下游河流水生生物的栖息地条件;对水质的影响主要是溶解氧下降,堵塞取水口等;对底栖动物的主要影响是个体丰度和物种组成的变

化；对于鱼类影响主要包括淤堵鱼类产卵场、幼鱼被冲走、将鱼类向下游推移和水质变化影响鱼类呼吸系统等，影响范围主要靠近水库下游，持续时间较长，见表 1.2。

表 1.2 水库排沙对下游河流生态环境的主要影响

生态系统要素		影响种类	影响范围	影响时间
河床地形		基础变化	紧靠下游	中长到长（依据是天然洪水还是人工洪水而不同）
水质		对动物群有毒性（持续高浓度泥沙排沙，水体溶解氧下降）	紧靠下游	短
		漂浮物堵塞取水口	紧靠下游，有时长距离影响	短
		对灌溉或饮用水产生影响	紧靠下游，有时长距离影响	短
水生植物		藻类等微生物：因摩擦产生脱落	紧靠下游	短
		固定的水生植物：堆积物的沉淀	远离水库下游	中长
底栖动物		被冲走，直接的，物理性影响	紧靠下游	短
		营养盐的堆积或生息场所的变化导致的间接影响	紧靠下游	中长到长
鱼类	产卵	淤堵产卵场地	紧靠下游	中长
	幼鱼	被冲走		
	栖息地	幼鱼或成鱼向下游移动		

另外，Erich Staub 指出，水库排沙对鱼类等生物影响的最大因素是缺氧问题。因为：①水库泥沙附着物中的还原性物质消耗了水流中的氧气，是鱼类缺氧的直接原因；②高含沙水流的泥沙堵塞鱼鳃，影响鱼鳃的黏液分泌，降低鱼类从水中摄取氧气的能力从而产生间接影响。

在评价指标方面，为了评价出平水库和宇奈月水库的联合排沙对下游河流及海洋生态环境的不利影响，在排沙前、排沙中和排沙后都需进行环境调查，具体调查内容见表 1.3。从表 1.3 可以看出，环境调查内容除了 SS（含沙量）外，还有水温、pH 值、BOD₅、COD、DO 等水质项目，鱼类、底栖生物、附着藻类等水生动植物项目以及底泥的物理化学特性。调查位置不仅包括水库下游河流，也包括河口以及海岸。



表 1.3 黑部川出平水库和宇奈月水库联合排沙对下游河流生态环境的影响调查项目

地点	调 查 内 容	
水库库区	水质	水温、pH 值、BOD ₅ 、COD、DO、SS
	底泥	外观、臭气、颗粒级配、pH 值、COD、TN、TP、ORP、硫化物、强热减量、TOC、二价铁
	测量	断面测量
下游河流	水质	水温、pH 值、BOD ₅ 、COD、DO、SS、浊度、TN、TP、SS 级配
	底泥	外观、臭气、颗粒级配、pH 值、COD、TN、TP、ORP、硫化物、强热减量、TOC、二价铁
	水生动植物	鱼类、底栖生物、附着藻类、叶绿素、附着细颗粒泥沙、河床材料级配、捕捉调查香鱼
	测量	断面测量
海岸	水质	水温、盐分、pH 值、COD、DO、SS、浊度
	底泥	外观、臭气、颗粒级配、pH 值、COD、TN、TP、ORP、硫化物、强热减量、TOC、二价铁
	水生植物	底栖生物、浮游动植物、叶绿素

1.2.3 水库排沙对鱼类的影响

瑞士、法国、加拿大和日本等国家从 20 世纪 90 年代开始，通过实测和实验等方法开展了排沙时期下游河流含沙量升高、溶解氧下降和有毒物质释放对鱼类产生的直接或间接影响方面的研究，取得了定性或定量的研究成果，部分成果已应用到工程实际运行中。

(1) 含沙量变化对鱼类的影响。

水库排沙期间最显著的特点是下游河流含沙量大幅度升高，含沙量峰值及变化过程、泥沙性质等呈现与自然河流洪水过程的泥沙输送完全不同的特点。悬移质泥沙会对鱼类的鱼鳃、进食和生理指标产生影响，进而影响其生存、生长和繁殖。Erich Staub 认为，高含沙水流会引起鱼类避难运动量的增加，从而增加呼吸频率和需氧量，同时容易淤堵鱼鳃，影响摄氧功能。村冈等人进行了实验研究后认为，同样的含沙量对不同鱼种的影响程度是不同的，如白斑红点鲑（*Salvelinus leucomaenis*）和日本樱鲱（*Oncorhynchus masou*）等鱼种对短时间含沙量增高的适应能力较强，但香鱼等鱼种较弱。

Petz - Glechner 进行的室内实验表明，对鱼类影响而言，含沙量没有一个明确的阈值，因为这种影响是含沙量和持续时间等多种因素综合作用的结果。如含沙量 50g/L、持续时间 2h 以内的影响小于含沙量 10g/L、持续时间 24h 的影响，见图 1.1。

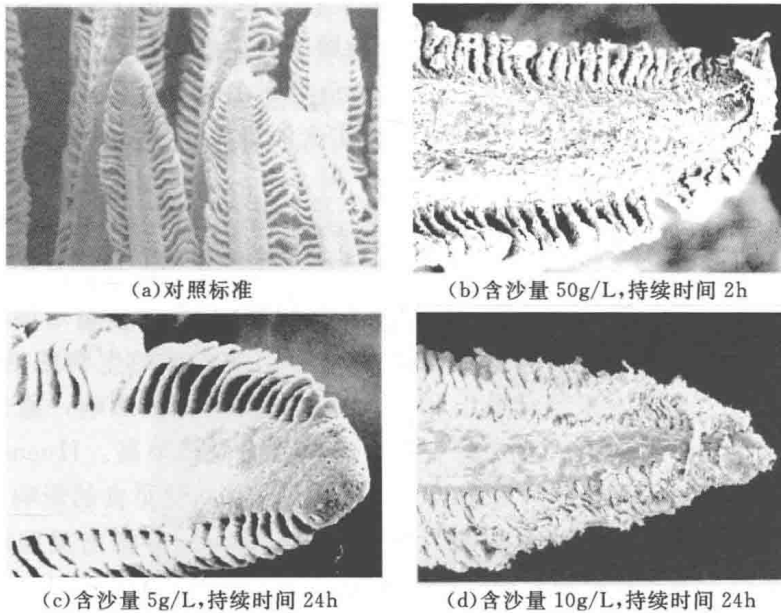


图 1.1 电子显微镜下的虹鳟鳃淤堵 (Petz-Glechner, 1999)

木下研究淤堵白斑红点鲑鱼鳃的泥沙颗粒级配, 指出粒径在 $150\mu\text{m}$ 以下的细颗粒泥沙容易堵塞鱼鳃, 且泥沙颗粒越细, 越容易堵塞鱼鳃, 见图 1.2。Erich Staub 认为, 小于 $75\mu\text{m}$ 的颗粒能够穿过鱼鳃进入鳃组织的层间空隙, 淤堵鱼鳃, 而 $75\sim 250\mu\text{m}$ 的粗颗粒大到足够引起鳃的机械磨损。Crosa 等研究了阿尔卑斯山河流上水库排沙对鱼类和大型无脊椎动物的影响, 排沙过程中最大含沙量达 $70\sim 80\text{kg}/\text{m}^3$, 平均含沙量为 $4\sim 5\text{kg}/\text{m}^3$, 导致鱼类密度下降了 73%, 生物量减少了 66%, 尤其是幼鱼的损失比较多, 会造成鱼类长期的年龄结构断层。同时底栖生物量也大幅减少, 一般需要 3 个月的时间才能基本恢复。建议通过多次调沙降低单次含沙量浓度, 类似环境下应使最高含沙量小于 $10\text{kg}/\text{m}^3$, 平均含沙量小于 $5\text{kg}/\text{m}^3$ 。

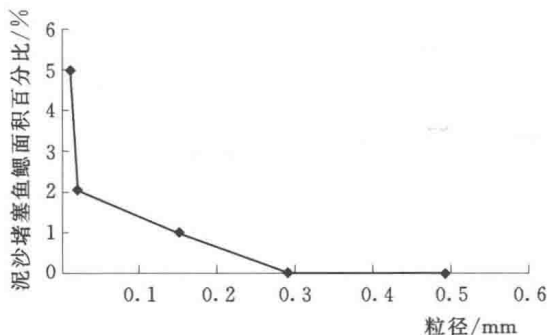


图 1.2 泥沙粒径与淤堵鱼鳃面积百分比 (木下, 2004)



Bilotta 等归纳了以往的研究,认为需要注意悬移质泥沙的含沙量和粒径对水质和水生生物的负面影响。Kemp 等回顾了以往细颗粒泥沙对不同鱼种的影响。Rowe 等研究了引起新西兰淡水珍稀鱼类死亡的含沙量,选取 3 种易受泥沙影响的鱼类进行研究,其中两种鱼类在含沙量大于 43kg/m^3 时 24h 后出现死亡;另一种鱼类在含沙量大于 1kg/m^3 时 24h 后出现了死亡,在含沙量达到 3kg/m^3 时 24h 后死亡率达到 50%。Lazar 等利用 INCA-Sed 模型模拟了英国威尔士某条河流的水文、泥沙日变化过程,指出在含沙量较高的时候会对鱼鳃造成损坏。Shrimpton 等通过实验研究了温度变化和含沙量增加对奇努克鲑鱼幼鱼的影响,发现在含沙量较高的实验中幼鱼鱼鳃的生物酶活性较低。Awata 等研究了悬移质泥沙对野生和饲养香鱼的皮质醇的影响,通过比较试验发现暴露在含沙水体中的香鱼比清水中的香鱼皮质醇要高。Huenemann 等通过实验研究了不同浑浊度的水体对大嘴黑鲈鱼在养鱼池觅食的影响,结果表明含沙量降低大嘴黑鲈鱼捕食的能力和效率。Schwartz 等指出美国河流中高含沙量是造成生态完整性缺失的一个主要原因,并利用基于生态功能属性的方法将鱼类育肥、索食和产卵等 17 项属性与悬移质泥沙的输移指标联系起来,研究了不同含沙量造成生态损失的情况。Schwartz 等提出了用于评价生态损失的含沙量、历时和频率曲线,并根据监测数据进行了拟合。Yi 等利用基于栖息地适宜性原理的水文、泥沙、底质和生态学指标的模型评价葛洲坝和三峡工程对长江中华鲟产卵场的影响,指出葛洲坝下泄流量在 $10000\sim 30000\text{m}^3/\text{s}$ 之间时适宜性较高。Wang 等考虑水深、流速、水质、泥沙等因素,利用模糊综合评价模型评价了长江中华鲟的栖息地适宜性。

(2) 溶解氧变化对鱼类的影响。

水库排沙时,库底长期沉积的部分有机物质或有毒物质等随泥沙重新启动和悬浮,在流动过程中发生生化反应,消耗水体中的部分溶解氧,导致溶解氧浓度下降而影响鱼类生存。国内外学者对泥沙与水生生境的关系及溶解氧对鱼类的影响开展了研究。Erich Staub 认为,在排沙过程中至少有两种因素可能引起鱼类缺氧问题:①泥沙中的还原性物质消耗水中溶解氧,导致水体缺氧;②高浓度泥沙淤堵鱼鳃,诱导鱼鳃分泌物的增多,影响摄入氧气功能。当溶解氧浓度低于 2mg/L 或者含沙量超过 $10\sim 30\text{kg/m}^3$ 时,溶解氧和泥沙成为影响鱼类生存的关键因素,由于溶解氧和含沙量相互作用和影响,因此究竟怎样确定具体值较困难。J. Garric 以褐鲟 (*Salmo trutta fario*) 幼鱼作为对象,进行了含沙量及褐鲟幼鱼生存持续时间的实验,提出了不同溶解氧浓度和含沙量条件下,褐鲟幼鱼 10% 死亡率生存持续时间等时线图 (图 1.3),得出溶解氧的亏缺 (小于 2mg/L) 比悬移质浓度 (高于 30kg/m^3) 更容易导致鱼类死亡的结论。董耀华等综述了有关泥沙与河流水生生境相互联系的研究,总结了与河