

高原湖泊低污染水 治理技术及应用

GAOYUAN HUPO DIWURANSHUI
ZHILI JISHU JI YINGYONG

杨逢乐 赵祥华 吴文卫 魏翔 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高原湖泊低污染水 治理技术的应用

杨逢乐 赵祥华 吴文卫 魏翔 著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2014

内 容 提 要

本书针对云南高原湖泊径流区 70% ~ 80% 的入湖面源污染负荷及其时空不均、冲击性强等特点,系统地阐述了以河道为纽带的过程与末端相结合的沿程减污体系,并集成河道原位与旁路、前置库塘调蓄沉淀与稳定、湿地水质改善和生态修复等技术及高原湖泊社区共管模式,提出了高原湖泊低污染水集成技术规范,并列举了相关工程实例。

本书既可供环境污染与修复、环境生态学、环境监测、环境治理等专业的师生参考使用,还可供从事相关专业的设计人员、研究人员及管理人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

高原湖泊低污染水治理技术及应用/杨逢乐等著. —北京:冶金工业出版社, 2014. 8

ISBN 978-7-5024-6307-6

I. ①高… II. ①杨… III. ①高原—湖泊污染—污染防治—
云南省 IV. ①X507.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 175267 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6307-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;北京慧美印刷有限公司印刷

2014 年 8 月第 1 版, 2014 年 8 月第 1 次印刷

169mm × 239mm; 9 印张; 174 千字; 132 页

28.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号 (100010) 电话 (010)65289081 (兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgy.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

编 委 会

杨逢乐	宁 平	杜劲松	赵祥华
郜华萍	何 峰	吴文卫	李 彬
魏 翔	李 滨	白骅华	田 军
谷唯实	段怡君	张 恺	张春敏

前 言

云南省九大高原湖泊流域是全省经济发展的重要区域,该流域产生的 GDP 约占全省的 30%,也是水污染防治和水环境保护的重点区域,流域内 70%~80% 的污染物主要是通过众多的河流进入湖泊的。以滇池为例,通过 35 条河道年均输入 COD、TN、TP 分别占滇池流域污染物负荷量的 72%、78%、80%。而其中有近 75% 的污染负荷主要在雨季入湖,污染负荷在时间和空间上存在巨大的差异。另外,近年来,随着点源的有效治理,入湖污染负荷以面源、污水厂尾水等低污染水为主,具有点多、面广、分散、量大等特点,突发性、暴发性、冲击性极强。入湖污染的这些特征使湖泊污染治理面临新的挑战。

本书针对入湖污染负荷的输移规律,以高原湖泊河-湖复合生态系统为研究对象,以入河、入湖污染负荷削减和水环境改善为目标,依托国家“863”项目、国家重大水专项滇池项目、云南省科技厅专项、云南省发改委专项、云南省九湖专项及大量的治理工程项目,针对高原湖泊提出低污染水概念,逐步积累、开发形成了高原湖泊治理——河塘库湿地集成技术,有效改善了河口及湖泊近岸水域的水质,确保了九大高原湖泊在流域社会经济快速发展的同时,还可保持水质的总体稳定,具有良好的环境效益、生态效益和社会效益。

本书高度集成了河道原位旁路净化技术、前置库塘调蓄沉淀及净化稳定技术、湿地水质改善和生态修复技术,构成了过程与末端相结合的入湖污染综合防治体系。针对污染较重的河流,强化过程削减,采用河道原位,即以河流自有“腔体”、河边林带、低洼地等作为处理空间,集成接触氧化、生物滤床、土壤渗滤、生态湿地等多项水处理技术,形成以原位、旁路相结合的河道沿程治理综合技术,有效削减

了河口及入湖污染负荷；针对源近流短、冲击负荷大的河流，于河流下段、河口及湖湾设置前置库塘系统，包括人工构建的“湖中湖”，有效调蓄沉淀拦截入湖的污染物；在入湖河水得到初步净化的基础上，以河口及湖滨滩涂等作为空间，针对低污染水的特征，人工适度干预构建河口湿地，实现了入湖污染的最后拦截，并逐步恢复河口良性生态系统。通过河库塘湿地的有效组合，能够实现不同类型、不同污染程度、不同水质水量特征河流的旱雨季及全年全天候连续长效的治理。COD、TN、TP 的去除率可达 20% ~ 50%，单位投资 100 ~ 500 元/m³，单位运行成本 0.01 ~ 0.08 元/m³。

由于作者水平所限，书中不妥之处，恳请广大读者批评指正。

作 者

2014 年 4 月

目 录

1 概论	1
1.1 湖泊、河流、湿地及其全球分布状况	1
1.1.1 湖泊与湿地的分布	1
1.1.2 淡水与咸水	2
1.2 “典型”湖泊与河流	6
1.2.1 湖泊	6
1.2.2 当务之急	7
1.3 云南省高原湖泊水环境保护形势	8
1.3.1 云南省九湖水污染治理取得的成效	9
1.3.2 云南省九湖水污染治理的重要性、紧迫性	10
1.3.3 九湖清，任重而道远	13
1.4 低污染水	15
1.4.1 入湖河流低污染水特征及来源	16
1.4.2 农业面源污染	18
1.4.3 低污染水处理方法	19
2 前置库系统	22
2.1 前置库系统概述	22
2.2 前置库的工艺原理	22
2.2.1 沉淀理论	23
2.2.2 自然降解理论	24
2.2.3 水生生物的吸收作用	24
2.2.4 微生物的降解理论	24
2.2.5 强化前置库系统	24
2.3 前置库的类型	25
2.4 前置库的组成	26
2.5 前置库系统的流程及处理效果	26
2.6 前置库技术应用	27
2.6.1 实验室小室模型	27

2.6.2	示范工程及效果强化研究	27
2.6.3	示范工程研究结论	31
3	多塘系统	33
3.1	多塘系统概述	33
3.2	多塘系统的工艺原理	33
3.3	多塘系统的类型	34
3.3.1	按供氧方式	34
3.3.2	按功能分类	35
3.4	多塘系统的组成	35
3.4.1	厌氧塘	35
3.4.2	兼性塘 I 和兼性塘 II	36
3.4.3	好氧塘	36
3.4.4	多塘系统流程图	36
3.5	多塘系统技术应用	37
4	湿地系统	39
4.1	湿地系统概述	39
4.2	人工湿地的工艺原理	40
4.2.1	悬浮固体 (SS) 的去除	40
4.2.2	有机物的去除	40
4.2.3	氮的去除	40
4.2.4	磷的去除	40
4.2.5	重金属的去除	41
4.3	人工湿地的类型	41
4.4	人工湿地的组成	43
4.4.1	基质	43
4.4.2	水生植物	43
4.4.3	微生物	44
4.5	人工湿地的基质研究	45
4.5.1	人工湿地的基质介绍	45
4.5.2	基质的作用与处理效果研究	45
4.5.3	基质的去污能力与影响因素研究	46
4.5.4	基质的选择与配置	48
4.5.5	人工湿地基质目前问题与发展展望	49

4.6 人工湿地的植物研究	51
4.6.1 人工湿地植物的选择	51
4.6.2 人工湿地植物的除污机理和作用	52
4.6.3 植物去污作用的影响因素	54
4.6.4 国内外人工湿地的植物研究进展	54
4.7 典型人工湿地的技术应用	56
4.7.1 设计规模	56
4.7.2 进出水水质标准	56
4.7.3 人工湿地面积的确定	57
4.7.4 人工湿地的设计	58
4.7.5 人工湿地防渗处理	60
4.7.6 人工湿地植物选取	60
5 河道原位旁路净化技术	62
5.1 河流的异地处理法	62
5.2 河流的原位处理法	63
5.2.1 河道曝气法	63
5.2.2 投菌法	64
5.2.3 生物膜法	65
5.2.4 引水冲污或换水稀释	66
5.2.5 底泥疏浚	66
5.2.6 渗流生物膜净化技术(生物过滤技术)	67
5.2.7 人工快滤处理(CRI)系统	70
5.2.8 快速多级土壤渗滤(MSL)系统	70
5.2.9 其他物理和化学处理法	71
5.3 河流的旁路处理法	73
5.3.1 土地处理系统	73
5.3.2 氧化塘	74
5.3.3 人工强化的生物反应器	75
6 工程示范	76
6.1 滇池新运粮河河道净化技术示范工程	76
6.1.1 工程内容	76
6.1.2 技术特色及效益	77
6.2 滇池东大河前置库示范工程	78

6.2.1	项目概要	78
6.2.2	工程内容	78
6.2.3	技术特色	81
6.2.4	项目环境效果	82
6.3	滇池大清河河口及湖湾“湖中湖”示范工程	83
6.3.1	工程内容	83
6.3.2	技术特色	86
6.3.3	项目环境效益	86
6.4	洱海罗时江河口湿地示范工程	87
6.4.1	工程内容	87
6.4.2	技术特色	88
6.4.3	项目环境效益	89
6.5	滇池白鱼河口湿地生态示范工程	89
6.5.1	工程内容	89
6.5.2	技术特色	91
6.5.3	项目环境效益	93
6.6	通海杞麓湖红旗河口湿地示范工程	94
6.6.1	工程内容	94
6.6.2	技术特色	96
6.6.3	项目效益	97
6.7	抚仙湖梁王河治理工程	98
6.7.1	工程内容	98
6.7.2	技术特色	98
6.7.3	项目环境效益	98
6.8	安宁集中式饮用水源地车木河水库河口湿地一期工程	99
6.8.1	工程内容	99
6.8.2	技术特色	102
6.8.3	项目环境效益	102
6.9	安宁集中式饮用水源地车木河水库河口湿地二期工程	103
6.9.1	工程内容	103
6.9.2	技术特色	105
6.9.3	项目环境效益	105
7	管理模式示范研究	106
7.1	我国现行水资源管理模式的内容	107

7.1.1 我国现行水资源管理的基本制度	107
7.1.2 我国现行水资源管理体制的表现	109
7.1.3 我国现行水资源管理模式评价	109
7.2 我国现行水资源管理模式存在的问题	111
7.3 水资源管理模式比较	112
7.3.1 水资源国家集权管理模式	113
7.3.2 水资源统一管理模式	113
7.3.3 水资源分权管理模式	113
7.3.4 水资源公众参与管理模式	114
7.4 高原湖泊水资源管理协商机制建设	115
7.4.1 追求和谐价值理念	115
7.4.2 树立人本的价值目标	116
7.4.3 树立可持续发展的理念	117
7.5 高原湖泊水资源管理协商机制运行	117
参考文献	119

1 概 论

1.1 湖泊、河流、湿地及其全球分布状况

1.1.1 湖泊与湿地的分布

湖泊与湿地的全球分布非常不均匀。绝大多数面积较大（大于 100km^2 ）的淡水湖泊位于南、北半球 $40^\circ \sim 50^\circ$ 的纬度带内，其次就是赤道附近（见图 1-1）；咸水湖泊在南半球主要分布在 30°S 附近，北半球主要分布在 $40^\circ \sim 50^\circ$ ，主要是受里海的影响；湿地则主要分布在赤道附近、北半球欧亚大陆及北美大陆的北部地区。

全球的 1522 个大湖（面积均大于 100km^2 ）占了湖泊面积和蓄水量的绝大部分，但与全球 900 万个湖泊和大型池塘（面积均大于 0.01km^2 ）及更多的小型水体相比，其数量是微不足道的。地球上的小型水体主要集中在 $40^\circ\text{N} \sim 70^\circ\text{N}$ （见图 1-1 和表 1-1）。如瑞典一国的水体就达 10 万个，其中 96% 为小型湖泊或池塘（面积为 $0.1 \sim 1\text{km}^2$ ）。另如原苏联地区有 2.8 万个水体，其中 98% 是小湖泊或池塘。地图分辨率越高，统计到的水体就越多，池塘或小湖泊所占的比例也就越大。通过卫星影像可以获得高分辨率图像（约 0.001km^2 ）。加拿大大西洋区域

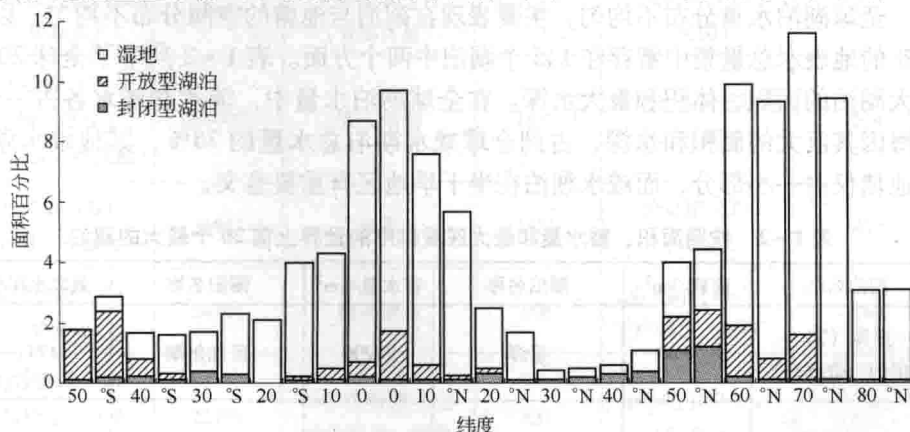


图 1-1 全球湖泊与湿地的分布状况

（其中很多小型湖泊被统计为湿地， $40^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$ 内的咸水湖泊的增加反映了里海的影响；另外要注意赤道附近、北方森林地带和亚北极圈内湿地的重要性）

的 Landsat 5 影像显示约有 2/3 的水体面积小于 0.01km^2 (1ha)。按这个比例放大至全球,则意味着现存水体中,约有 1.8×10^7 个面积小于 1ha 的小水体,而小河流在数量上占了流水水体的大部分。

表 1-1 基于面积分类的湖泊与水塘

类 型	面积/ km^2	湖泊数/个	总面积/ km^2
特大湖	> 10000	19	997000 ^①
大 湖	100 ~ 10000	1504	686000
中等湖	1 ~ 100	139000	642000
小 湖	0.1 ~ 1	约 1110000 ^②	约 288000
大水塘	0.01 ~ 0.1	约 7200000 ^②	约 190000
其他水塘	< 0.01	ND	ND

注:其中各类湖泊的数目和面积是根据全球湖泊与水塘的分布外延估计得到的,ND 指无法估算。

①仅里海就有 374000km^2 。

②精度较低,根据趋势外延获得。

全球陆地面积(去除冰川覆盖面积)的 2.1% ($2.8 \times 10^6\text{km}^2$) 为面积超过 0.01km^2 的湖泊或池塘覆盖。水体覆盖百分比从法国、中国和美国没有被冰川侵蚀的地区不到 0.1%;到斯堪的纳维亚半岛的 9%。俄罗斯北方的部分地区及亚北极区有 40% ~ 70% 的陆地被湿地覆盖,而加拿大的西北地区(未划分成两个区前)有 34% 的陆地为湖泊、湿地或河流覆盖。

1.1.2 淡水与咸水

全球湖泊水量分布不均匀,主要表现在湖泊与池塘的空间分布不均匀,以及 95% 的地表水总量集中蓄存在 145 个湖泊中两个方面。表 1-2 列举了全球 20 个最大湖泊的面积、体积和最大水深。在全球湖泊水量中,淡水和咸水各占一半。里海因其巨大的面积和水深,占到全球咸水湖泊总水量的 75%,其他咸水湖泊或池塘仅占一小部分,而咸水湖泊在半干旱地区有重要意义。

表 1-2 按照面积、蓄水量和最大深度排序的世界上前 20 个最大的湖泊

湖泊名称	面积/ km^2	湖泊名称	蓄水量/ km^3	湖泊名称	最大水深/m
里海 (T) (伊朗、俄罗斯)	374000	里海	78200	贝加尔湖	1741
苏必利尔湖 (G + T) (加拿大、美国)	82100	贝加尔湖	22995	坦噶尼葛湖	1471

续表 1-2

湖泊名称	面积/km ²	湖泊名称	蓄水量/km ³	湖泊名称	最大水深/m
咸海 (T) (哈萨克斯坦、 乌兹别克斯坦)	43000 ^①	坦噶尼葛湖	17827	里海	1025
维多利亚湖 (T) (肯尼亚、坦桑 尼亚、乌干达)	62940	苏必利尔湖	12230	马拉维	706
休伦湖 (G) (加拿大、美国)	59500	马拉维湖	6140	伊萨克湖	702
密歇根湖 (G) (美国)	57750	密歇根湖	4920	大斯拉夫湖	614
坦噶尼葛湖 (T) (布隆迪、坦桑尼 亚、赞比亚、刚果)	3000	休伦湖	3537	玛塔呐湖 (印度尼西亚)	590
贝加尔湖 (T) (俄罗斯)	31500	维多利亚湖	2518	克莱特湖 (V) (美国)	589
大熊湖 (G) (加拿大)	31326	大熊湖	2292	图巴湖 (V + T) (印度尼西亚)	529
洞里沙湖 (F) (柬埔寨)	30000 ^{②③}	大斯拉夫湖	2088	萨雷斯湖 (塔吉克斯坦)	505
大斯拉夫湖 (G) (加拿大)	28568	伊萨克湖 (T) (吉尔吉斯)	1738	塔霍湖 (T) (美国)	501
乍得湖 (T) (乍得、尼日尔、 尼日利亚、喀麦隆)	25900 ^④	安大略湖	1637	哈尼达尔斯范登湖 (G) (挪威)	514
埃尔湖 (G) (美国、加拿大)	25657	咸海	1451	恰伦湖 (T) (美国)	489
温尼伯湖 (G) (加拿大)	24387	拉多加湖	908	基夫湖 (T + V) (卢旺达、刚果)	480
马拉维湖 (T) (马拉维、莫桑 比克、坦桑尼亚)	22490	的的喀喀湖 (T) (玻利维亚、秘鲁)	827	奎斯纳尔湖 (G) (加拿大)	475
巴尔喀什湖 (T) (哈萨克斯坦)	22000	驯鹿湖 (G) (加拿大)	585	亚当斯湖 (T) (美国)	457

续表 1-2

湖泊名称	面积/km ²	湖泊名称	蓄水量/km ³	湖泊名称	最大水深/m
安大略湖 (G) (加拿大、美国)	19000	赫尔曼德湖 (阿富汗、伊朗)	510	发纳努湖 (智利、阿根廷)	449
拉多加湖 (G+T) (俄罗斯)	18130	埃尔湖	483	莫优莎湖 (挪威)	449
班韦乌卢湖 (赞比亚)	15100 ^②	乌布苏古尔湖 (蒙古)	480	萨尔斯瓦登湖 (挪威)	445
马拉开波湖 (T+G) (委内瑞拉)	13010	温尼伯湖	371	吗呐泊里湖 (新西兰)	443

注：所在国家已注明，湖泊起源在已知的情况下，分别用 G（冰川）、T（构造）、C（泻湖）、V（火山）、F（冲积）、M（风成）标明。

①至 2000 年，入湖径流的截留使得该湖面积减小到大约 24200km²，蓄水量减少 84%。

②防洪及灌溉使得该湖面积减至 11000km²。

③该湖面积较大的变化范围是季节性洪水所致。

④干旱使得该湖面积减少到 2500km²。

因为盐度过高而不能用于饮用和灌溉，咸水湖泊的经济重要性相对较小。但有时咸水湖泊中沉淀出来的盐（多数是氯化钠）可以被开发利用。此外，内陆咸水湖泊在科学研究方面 also 具有重要意义，不仅在于其拥有不一般的生物种类，还因其代表水体盐度演变的终点，这对了解生物群落的结构和功能如何随盐度的改变而变化来说是非常重要的。而且还可以以其为模式，预测半干旱地区河流逐步加剧的盐碱化，并对全球变暖引发的蒸发量增加对生态环境的影响进行演示。

苏必利尔湖（美国、加拿大）是全球面积最大的淡水湖泊（见表 1-2）。贝加尔湖（俄罗斯）是世界第二深的湖泊，其容积巨大，蓄水量占到全球淡水湖泊总水量的 20%。苏必利尔湖、贝加尔湖和坦噶尼葛湖（东非）共同蓄积的水量几乎为全球地表淡水总量的一半（44%）。

在全球众多的湖泊中，有些湖泊的地形非常特殊，如深水湖泊克来特湖（美国）和萨尔斯瓦登湖（挪威），它们的面积和深度完全不成比例（见表 1-2）。另有一些湖泊的面积发生了很大变化，如位于湄公河三角洲的洞里萨湖（也称大湖，柬埔寨）和位于西非半干旱地区的乍得湖（乍得、尼日尔、尼日利亚、喀麦隆）。乍得湖总面积 2500km²，在最近几十年中已经缩减为许多相互分割的湖泊（或湿地），危及数以百万的农场主、渔民和牧民的生计。但在 20 世纪初，连续的湿润年份曾使得该湖的面积最大达到 25900km²。而在距今 6000 年的高降水时期，乍得湖的面积甚至一度扩展至 300000 ~ 400000km²，在那个时期，撒哈拉沙漠为植被所覆盖，并且其中间隔地散布着浅水湖泊与河流。

全球河流持水量只有湖泊持有水量的 2%，但河流每年携带入海的水量却有 2700km^3 。表 1-3 列举了全球 25 条最大河流的河口流量、每年平均悬浮质泥沙含量和产量。河流及其相邻的湿地以及与它们紧密关联的地下水为许多生物的生存提供了条件，其中河流又是灌溉、工业和农业以及居民用水的主要来源。

表 1-3 全球最大的 25 条河流及其他一些著名河流

河流名称	流经国家或地区	平均流量 $/\text{km}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	集水区面积 $/\text{Mm}^2$	携带悬浮物 $/\text{Mt} \cdot \text{a}^{-1}$	泥沙侵蚀量 $/\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
亚马逊河	哥伦比亚、巴西、 秘鲁	212.5	6062	406	67
刚果/ 扎伊尔河	安哥拉、刚果、民 主刚果	39.7	3968	72	18
长江	中国	21.8	1013	561	553
布拉马 普特拉河	不丹、中国、印度	19.8	553	813	1469
恒河	不丹、印度	18.7	1047	1626	1551
叶尼塞河	瑞来斯	17.4	2471	11	4
密西西比河	美国	17.3	3185	350	109
奥利诺科河	巴西、哥伦比亚、 委内瑞拉	17.0	939	97	103
勒拿河	俄罗斯	15.5	2680	80	30
巴拉那河	阿根廷、玻利维亚	14.9	2278	91	40
圣劳伦斯河	加拿大	14.2	1274	4	3
伊洛瓦底河	中国、缅甸	13.5	362	336	927
鄂毕河	俄罗斯	12.5	2448	16	6
湄公河	柬埔寨、老挝、泰 国、越南	11.0	387	190	491
阿姆尔河	中国、俄罗斯	11.0	1822	52	28
托坎廷斯河	巴西	10.2	896	—	—
马更些河	加拿大	7.9	1784	15	8
马格达莱纳河	哥伦比亚	7.0	262	172	656
哥伦比亚河	加拿大	7.2	266	10	
赞比西河	安哥拉、博茨瓦 纳、莫桑比克、纳米 比亚、赞比亚、民主 刚果、津巴布韦	7.1	1280	100	78

续表 1-3

河流名称	流经国家或地区	平均流量 /km ³ · s ⁻¹	集水区面积 /Mm ²	携带悬浮物 /Mt · a ⁻¹	泥沙侵蚀量 /t · km ⁻² · a ⁻¹
多瑙河	奥地利、保加利亚、德国、克罗地亚、匈牙利、摩尔多瓦、罗马尼亚、斯洛伐克、乌克兰、南斯拉夫社会主义联邦共和国	6.2	806	22	27
尼日尔河	贝宁、几内亚、马里、尼日尔、尼日利亚、塞拉利昂	6.1	1100	5	5
印度河	中国、印度、巴基斯坦	5.6	1231	489	396
育空河	加拿大、美国	5.1	921	88	96
伯朝拉河	俄罗斯	4.1	322	7	22
尼罗河	埃及、埃塞俄比亚、苏丹、乌干达	2.8	2944	124	42
莱茵河	瑞士、德国、法国、荷兰	2.2	145	1	7
里昂河	瑞士、法国	1.7	94	32	340
底格里斯/幼发拉底河	伊拉克、土耳其、叙利亚	1.4	1048	863	823
波河	意大利	1.4	54	17	315
维斯杜拉河	波兰	1.1	191	2	10

注：河流按河口流量、集水面积、平均悬浮质泥沙含量与产量排序。

美国水侵蚀图可以从以下网址查阅：<http://nhq.nrcs.usda.gov/land/index/erosionmaps.html>。

资料来源：摘自 Welcome, 1985。

1.2 “典型”湖泊与河流

1.2.1 湖泊

本节的目的是为读者对小型湖泊和溪流等原始生态系统，早期湖沼学研究的温带倾向以及未来的研究展望提供一定的感性认识。一切科学实践都有一定的历史和传统，这些传统对现代科学研究的内容、方法和思路都有着深刻影响，当然