

植物治沙动力学

拾兵 曹叔尤 著



ZHIWU ZHISHA DONGLIXUE

青岛海洋大学出版社

植物治沙动力学

拾 兵 曹叔尤 著

青岛海洋大学出版社

• 青 岛 •

图书在版编目(CIP)数据

植物治沙动力学/拾兵,曹叔尤著. —青岛:青岛海洋大学出版社,2000.11

ISBN 7-81067-214-2

I. 植… II. ①拾… ②曹… III. 固沙植物-沙漠治理-动力学
IV. P941.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 73974 号

青岛海洋大学出版社出版发行
(青岛市鱼山路 5 号 邮政编码:266003)

出版人:李学伦

日照日报社印刷厂印刷

新华书店经销

*

开本:850mm×1168mm 1/32 印张:7 字数:176 千字

2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月第 1 次印刷

印数:1~1100 定价:20.00 元

前 言

黄河是中华民族摇篮,是华夏开发最早的农牧区,历史上长期是我国政治、经济和文化的中心。她率先点燃了中华民族的文明之火,哺育了一代又一代的炎黄子孙,创造了灿烂辉煌的黄河文明。她同尼罗河、印度河和恒河、幼发拉底河和底格里斯河一起,造就了世界四大文明古国,为人类社会的进步,作出了巨大的贡献;但是,由于该地区人口急剧增加,开荒垦植,森林毁坏,不断加剧了黄河上中游地区的水土流失,致使黄河成为一条闻名于世的多沙河流和历史上频繁溃决的害河,直至今日,它仍时刻威胁着中下游地区人民的生命财产安全。

黄河的根本问题是泥沙,其中粗沙又是构成黄河下游河床淤积抬升的主要因素,开展粗沙来源区的治理,已成为当今黄土高原水土保持工作的中心。黄土高原的产沙主要是沟道的侵蚀和输移。因此,治理的重点是沟道。如大力开展的沟道淤地坝、水坠坝治沟骨干工程,就是为防止侵蚀而采取的成功措施。晋陕蒙交界处的砒砂岩地区,面积约为 $1.17 \times 10^4 \text{ km}^2$,该地区气候干燥,荒山秃岭,泥沙颗粒粗,坡陡流急,水力、风力、重力侵蚀同时存在,早有“地球上的月球”、“世界水土流失之最”的称谓,治理极为困难,筑坝的渗漏问题也很难解决。

近几年来,这一地区开展了植物治沙的尝试,进行的沙棘灌木栽种试验已获得成功,并且一般情况下沟道比坡面长势更好,沟道5~7年就可郁闭。这就为植物治理流域水土流失,创造了有利条件。1995年,黄河上中游管理局和中国水利水电科学研究院的部分专家联合立项,设立了“砒砂岩地区植物‘柔性坝’的试验研究”课题(96-dd-019),开展了该地区沟道植物坝的野外试验及其

观测工作,并取得初步成果。为配合这项工作的开展,作者将植物坝推广到足够长的植物群体,并把砒砂岩地区的沟道条件,概化为一般粗沙区的沟道条件。自1996年年底开始,进行了更具普遍性的理论分析和试验研究工作,拟从理论上寻求解决植物群体滞洪拦沙的基本规律,加快野外大面积推广应用的步伐,以求实现“利用自然、改造自然”的良性循环。河宽调整是濒临河流城市未来发展过程中所面对的河滩开发、防洪工程、内河航运、水力发电、工农业取水、城市美化等的主要问题。对其演变的基本规律、影响因子的敏感程度,如何合理、有效地加以开发利用,更好地服务于当地的经济建设,均有重大的现实意义。这一课题研究的兴起,已引起国内外众多学者的重视,几个发达国家已组织力量,正开展该领域的联合攻关。此外,滨海地区海滩的侵蚀及沙质海岸的生物防护,也涉及到上述内容。结合“砾石河宽的动力调整”这一国家自然科学基金课题(项目编号59679010)、国家自然科学基金委员会和中国水利部联合资助重大项目“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”(项目编号59890200)的部分研究内容,作者对泥沙起动输移规律及二维堤岸动力调整,进行了理论分析和试验研究,建立了相应的计算模型。1999年本书第一作者获得教育部国家重点实验室访问学者基金资助(教技司1999-153号),研究课题为“流域产沙及生物治理”。在四川大学高速水力学国家重点实验室访问工作期间,又对本书部分内容作了进一步的研究和完善。因此,本书的内容是上述研究课题的部分成果,也是本书第一作者在曹叔尤教授指导下完成的博士论文的一部分;在研究经费上得到了上述基金项目、四川大学高速水力学国家重点实验室开放基金课题(9807, 9902)、甘肃省自然科学基金课题(ZR-97-094)和青岛海洋大学科研起动基金的联合资助。在资料收集及试验过程中,得到了四川大学方铎教授、中国水利水电科学研究院李桂芬教授、黄河上中游管理局毕慈芬高工的大力支持和帮助。

本书付梓出版得到了国家自然科学基金委员会和中国水利部联合资助重大项目“江河泥沙灾害形成机理及其防治研究”(项目编号 59890200)、教育部国家重点实验室访问学者基金课题“流域产沙及生物治理”(教技司 1999—153 号)、四川大学高速水力学国家重点实验室开放基金课题“往复水流作用下的泥沙起动输移矢量式”(9902)的联合资助。在其编辑、出版过程中得到了青岛海洋大学出版社的大力支持和热情帮助,在此一并表示感谢。

由于作者水平所限,并且撰写该书以反映植物治沙动力学的原理和应用,以及每一章节内容的具体确立,都是一个探讨的问题;因此本书在材料取舍、内容阐述等诸多方面的缺点和错误一定难免,恳请读者批评指正,以推动生物治沙工程及西部环境生态建设的不断发展。

作 者

2000 年 3 月

目 录

绪 论	(1)
0.1 治水治沙方略及植物治沙措施	(1)
0.2 植物增阻拦沙的可行性及研究现状	(4)
0.3 沙棘在干旱地区沟道拦沙中的特殊作用	(7)
0.4 河宽调整研究方法及其敏感因子	(10)
0.4.1 基本控制端点(Basal endpoint control)	(10)
0.4.2 动力学方法(Kinematic approach)	(11)
0.4.3 等功率耗散理论(Equal power expenditure)	(11)
0.4.4 横向分布理论(Lateral distribution method)	(12)
0.4.5 概率统计法(Statistic method)	(12)
0.4.6 奇异摄动法(Singular perturbation technique)	(13)
0.4.7 河宽调整敏感因子	(13)
第一章 树丛水流基本方程	(19)
1.1 Dan Naot 等树丛水流模拟基本方程	(19)
1.2 树丛水流基本方程的探讨	(20)
1.2.1 连续性方程	(20)
1.2.2 运动微分方程	(23)
1.2.3 微分方程的离散形式	(25)
1.2.4 对微分方程的讨论	(27)
1.3 树丛水流基本方程的脉动形式	(28)
1.3.1 湍流的平均动量方程	(28)

1.3.2	脉动动量方程及紊动能方程.....	(30)
1.4	水流中树木的挠曲变形、耗散能及其模型律	(33)
1.4.1	动水中树木的挠曲变形及其收缩量.....	(33)
1.4.1.1	主干变形计算.....	(34)
1.4.1.2	侧枝变形计算.....	(36)
1.4.2	树木耗散能.....	(38)
1.4.3	树木水工模型律.....	(39)
第二章	植物丛内泥沙起动和输移的矢量方程	(42)
2.1	明渠切应力.....	(42)
2.1.1	一维经验关系.....	(42)
2.1.2	环流作用下的边界切应力.....	(44)
2.1.3	明渠切应力的二维分析关系.....	(48)
2.1.4	明渠切应力的三维分析关系.....	(50)
2.2	无植物作用时,泥沙起动输移的矢量方程	(50)
2.3	有植物作用时,泥沙起动输移的矢量方程	(54)
2.3.1	因树丛壅水,平均流速减小值 ΔV_1	(55)
2.3.2	树后尾流引起的平均流速减小值 ΔV_2	(56)
2.3.3	推移质输沙率.....	(56)
2.3.4	河床变形方程.....	(58)
第三章	顺直河道河宽调整计算模型	(61)
3.1	无植物作用条件下的河宽调整模型.....	(62)
3.1.1	边界切力法.....	(62)
3.1.1.1	基本关系.....	(62)
3.1.1.2	数值模拟方法.....	(63)
3.1.1.3	主方程的离散.....	(65)
3.1.2	矢量方程法.....	(72)
3.2	有植物作用时的河宽调整计算模型.....	(77)
3.3	应用实例.....	(78)

第四章 植物坝前壅水及河道纵向冲淤计算	(82)
4.1 尾流	(82)
4.1.1 层流尾流	(83)
4.1.2 紊流尾流	(84)
4.1.3 一排物体后的尾流	(87)
4.2 植物坝前壅水计算	(89)
4.2.1 植物坝前壅水计算的迭代方法	(89)
4.2.2 坝长及合理坝距	(93)
4.2.3 算例	(93)
4.3 坝内及坝前壅水区河床冲淤计算	(95)
4.4 应用实例	(99)
第五章 植物丛中的悬移质运动	(103)
5.1 扩散方程	(103)
5.2 均宽沟道植物丛中悬移质冲淤计算基本方程	(106)
5.2.1 连续方程	(106)
5.2.2 挟沙水流运动方程	(108)
5.3 讨论	(109)
5.3.1 植物对垂向流速分布的影响	(109)
5.3.2 大米草冠层对细颗粒泥沙运动的影响	(110)
第六章 植物群对沟道水沙影响的试验研究	(114)
6.1 灌木室内试验	(114)
6.1.1 试验设备	(114)
6.1.2 原型概化条件	(115)
6.1.3 模型灌木的选择	(116)
6.1.4 试验方案及组次	(116)
6.2 乔木室内试验	(117)
6.2.1 乔木平行布置试验结果	(119)
6.2.2 乔木交错布置试验结果	(120)

6.3	室内试验结果与分析	(120)
6.3.1	床面相对切应力与树木因子关系的建立	(120)
6.3.2	相对输沙率与树木因子关系的建立	(125)
6.3.3	相对糙率与树木因子的关系	(125)
6.3.4	粗沙河床边坡植物群对河道展宽的阻滞作用	(130)
6.3.5	粗沙河床主槽植物对河道向宽浅型发展的作用	(132)
6.4	植物治沙的野外试验	(133)
6.4.1	植物“柔性坝”的设计与种植过程	(133)
6.4.2	植物“柔性坝”拦沙试验成果分析	(137)
第七章	植物水土保持效益及展望.....	(148)
7.1	植物滞流拦沙效益分析	(148)
7.2	植物根系的固土效益	(153)
7.2.1	林木根系与土壤抗冲性	(153)
7.2.2	林木根系与土壤抗蚀性	(154)
7.2.3	耐旱植物林地抗冲性试验	(154)
7.3	植物水土保持措施发展展望	(155)
第八章	理论应用专题.....	(160)
8.1	尾流理论在桥渡计算中的应用	(160)
8.1.1	壅水计算的迭代方法	(160)
8.1.2	孔径设计计算	(164)
8.1.3	应用实例	(165)
8.1.4	结语	(167)
8.2	矢量力学方法在非均匀沙中的应用	(167)
8.2.1	非均匀沙的隐暴作用及研究现状	(167)
8.2.2	任意面上非均匀沙的起动矢量关系	(169)
8.2.2.1	隐蔽区泥沙起动公式	(169)

8.2.2.2	暴露区泥沙起动公式	(171)
8.2.3	对起动流速公式的讨论	(172)
8.2.3.1	对公式(8.2.10)的讨论	(172)
8.2.3.2	对公式(8.2.19)的讨论	(173)
8.2.4	试验及检验	(174)
8.2.5	结语	(175)
8.3	物体后尾流的数值模拟	(175)
8.3.1	紊流数学模型基本方程组	(175)
8.3.2	紊流模型的模化假定	(177)
8.3.3	K, ϵ 方程及代数应力表达式	(179)
8.3.3.1	K 方程	(179)
8.3.3.2	ϵ 方程	(180)
8.3.3.3	代数应力表达式	(180)
8.3.4	方程推导所作的简化及平均化处理	(181)
8.3.4.1	长波假定	(182)
8.3.4.2	垂向平均化处理	(182)
8.3.5	深度平均的代数应力模型	(183)
8.3.6	微分方程的求解	(185)
8.3.6.1	通用方程及其离散	(186)
8.3.6.2	插值格式及求解顺序	(188)
8.3.7	障碍物后流场模拟	(191)
8.3.7.1	计算工况	(191)
8.3.7.2	流场	(192)
8.3.7.3	K, ϵ 分布	(192)
8.3.7.4	雷诺应力分布	(194)
8.4	小流域汇流产沙过程及沟道植物减沙功效的数值 模拟	(195)
8.4.1	小流域单元划分及流量过程的计算	(195)

8.4.2	小流域输沙过程的计算	(198)
8.4.3	沟道植物减沙量的计算	(200)
8.4.4	验证	(201)
8.4.5	结语	(203)
符号说明		(207)

绪 论

0.1 治水治沙方略及植物治沙措施

黄河是世界上著名的多沙河流,年径流量 500 多亿立方米,年平均输沙量 16×10^8 t,每年约有 4×10^8 t 的泥沙淤积在下游, 12×10^8 t 的泥沙在利津以下的滨海地区沉积。造成如此多的泥沙输移和淤积的根本原因,是黄河流经的上中游干旱、半干旱地区,存在着严重的水土流失^[1],其中颗粒大于 0.05 mm 的泥沙是造成下游河槽淤积的主要原因。开展该地区的水沙治理,设法将粗沙拦截在千沟万壑之中,是当代治黄的根本,也是控制下游泥沙淤积的“釜底抽薪”之策^[2]。翻开黄河治水治沙的历史长卷,追溯前人曾经走过的漫漫历程,对我们科学地确立现今及未来的治理对策,是很有裨益的。

从远古开始,黄河流域的先祖们,为了生存,在与黄河水害抗争的过程中,就涉及到对洪水泥沙的控制方略问题。鲧采用“堵”的治水方略,结果因无法阻止洪水的到处泛滥而告失败;禹吸取了其父的治水经验,采用“疏导”的方式,控制住了流路,渲泻了洪水,被后人传为佳话。由于当时黄河上中游地区存在良好的植被条件,泥沙问题还不是主要矛盾;而控制洪水,使其安澜,是治黄的根本。西汉末年,大司马张戎针对黄河下游日益增多的泥沙问题,提出了以水排沙的思想。他说:“水性就下,行疾,则自刮除成空而稍深”,“河流迟,贮淤而稍浅”。主张“顺从其性,毋复灌溉,则百川流行,水道自利,无决溢之害矣”。这应是“分流必淤”论之初始。与张戎同

时代的贾让则主张尽量分流。贾让三策的上策为迁民避水，放河入海；中策为尽量分流，以杀水怒；下策是他反对的、劳费无已的修堤。这种思想，在当时地旷人稀、生产建设很差的情况下，应该是合理的。因而沿用很久并演变为“宽河固堤”论，直至近代。

1571年，万恭说：“夫河性急，借其性而役其力，则可浅可深，治在吾掌耳。”这是以水治河论的再次提出，他主张束水，反对分流，主张南北对峙修堤。“夫水专则急，分则缓。河急则通，缓则淤。治正河可使分而缓之，道之使淤哉？今治河者，第幸其合。势急如奔马，吾从顺其势，堤防之，约束之，范我驰驱，以入于海。淤安可得停？淤不得停则河深，河深则不溢，亦不舍其下而趋其高，河乃不决。故曰黄河合流，国家之福也。”这些议论在学理上是完全正确的。

16世纪中叶，潘季训进而强调万恭的观点，而有束水攻沙之名论及作为。他承袭1500年前张戎及稍后万恭的创见，提出：“水分则势缓，势缓则沙停，沙停则河饱；尺寸之水皆由沙面，止见其高。水合则势猛，势猛则沙刷，沙刷则河深；寻丈之水皆由河底，止见其卑。筑堤束水，以水攻沙；水不奔溢于两旁，则必直刷乎河底。一定之理，必然之势。此合之所以愈于分也。”他不满足于万恭的“顺其势，堤防之，约束之”，而要在“遥堤”之内，于近河再修“缕堤”，用以“拘束河流，取其冲刷也”。在他的努力之下，果然将黄河南岸的堤防全部连接起来。加上原有的北堤，达到“坚筑堤防，纳水归于一槽”。扭转了12世纪以来几百年河道多股分流的局面。他的上述议论，在学理上基本是正确的，把筑堤束水作用的缘由，归结为合愈于分，也是恰如其分的^[3]。

清朝的靳辅、董安国、陈士杰等人，由黄河中下游的水患，逐步认识到河口地区淤积抬升的危害，强调治理之重要性。

到了近代，李仪祉针对我国古代治黄偏下游，黄河得不到根治的情况，提出了治黄上中下游并重，防洪、航运、灌溉、水电等兼顾的治河方针。新中国成立后，张含英发展了李仪祉的思想，主张治

理黄河上中下游兼顾,本流和支流兼顾,以整个流域为治理对象,从而把治黄思想提到了“全河立论”的高度。进入 50 年代,王化云等人进一步深化了张含英的治黄思想,提出了“蓄水拦沙”的基本策略,拟定了宏伟的治河方案,试图把大小河流和沟壑变成相互衔接的阶梯水库和拦沙库,彻底控制河道内的泥沙输移。这项建设方案的实施,需要花费浩大的人力和财力,实现起来至今仍有困难。1960 年 9 月,黄河上第一项控导工程——三门峡水库建成蓄水,由于缺乏相应的上中游配套拦沙措施,库区淤积非常严重,治黄方略随之修订为“上拦下排,两岸分滞”的方针。也是暂时解决水库淤积的权宜之计^[4]。

钱宁教授根据他的多年潜心研究和多次的实地勘察,认为黄河下游河道淤积,主要是由粒径大于 0.05 mm 的粗颗粒沙造成的,而这些粗泥沙中的相当一部分来自黄河中游的两个地区,它们是河口镇至无定河的区间和白于山河源区,由这个地区产生的洪水,使下游河道发生了强烈的淤积,洪峰期每天淤积强度高达 3×10^7 t,并造成了近 60% 的淤积量,重点治理这个地区,将对减小黄河下游淤积取得较好的效果^[5]。这就为上中游拦沙,找到了合理位置。历史地理学家史念海教授尖锐指出:“黄河症结如此明确,可历代治河的人都着眼于下游,以修堤堵口为能事,鲜有稍一顾及中游的,这是一个治河方略的绝对错误。一直误了 1 000 多年,今后谈治河,必须接受这个经验,应该着眼于全河,大力减少中游各地入黄的泥沙,这是今后治河的重要方略。”

1985 年,水利专家钱正英结合我国目前的经济条件及中游干旱和半干旱地区的实际情况,率先提出“以开发沙棘为加速黄土高原治理的一个突破口”^[6]。从此注重并开始了生物治理水土流失的新战略。1993 年 9 月,水利部长钮茂生在“全国沙棘资源建设现场会”上宣布:“沙棘已实现了资源建设、加工利用、科学研究和国际合作的四个突破”^[7]。这就为进一步推广沙棘治理干旱地区水土流

失,创造了有利条件。1995 年黄河上中游管理局和中国水利水电科学研究院联合立项,在内蒙古准格尔旗,开展了沙棘治理沟道水土流失的示范建设,毕慈芬高工和李桂芬教授,首先提出了以沙棘柔性坝来攻克被人们称为“地球上的月球”的砒砂岩地区水土流失问题的新构想^[8]。经过近 3 年的野外试验,现已初见成效。

尹学良教授在他的《改造黄河,根治黄河》一文中也已提到,中游很多沟道、支流,河谷宽阔平坦;平时水流很小,成乱石干滩或沙荒;洪水暴涨暴落,流量大而水量小;沟内居民、田园很少。这些特点很有利于在河沟内拦沙,引洪淤地而取得成效。季节行水河段,很适用植树工程来达到目的。洪峰尖瘦,滞洪容易得到显著成效^[3]。由此可见,植物治沙措施是一项投资少,见效快,易于推广,且又具有显著的经济效益和环境效益的“绿色工程”,值得大力提倡。本书为了配合这项工作的开展,拟对沟道内植物群体增阻拦沙动力学机理进行系统研究。

0.2 植物增阻拦沙的可行性及研究现状

R·G·格里姆肖认为,水土保持生物措施是利用自然保护自然的方法,他提供了种植香根草,进行水土保持的成功范例^[9]。图 0.1 是含沙水流从草丛中过滤的情景。图中,A 表示含泥量很高的径流被草丛阻挡,流速减慢;B 表示草丛前面从径流中滤出的淤泥;C 表示很大程度地降低了泥沙含量,减速的径流继续沿坡下流;D 表示密集的海绵状根系将土壤固结在一起达 3 m 深,根系形成了阻止地下水土流失的保护埂。图 0.2 为种植香根草若干年后的情况。泥沙从径流中滤出来,草丛在淤泥中生长,形成一个自然的美丽高台——自然梯田。

李倬根据他多年来对黄土高原 10 余条沟的调查和分析,认为林木减沙效益主要决定于沟谷林木。同时他认为,对含沙量在

300 kg/m³以上的高含沙水流,含沙量如继续增加,其输移所需的水力强度指标,反而呈下降趋势,乘机可以拦截。高含沙水流的强大冲刷力,可使沟床向窄深发展,窄深断面则更利于高含沙水流的输移,这样反复发展使沟床下切,冲刷加剧;而树木形成的宽浅断面则不利于高含沙水流的输移,反而易于淤积^[10]。也就是说,河道植物,改变了河道的河相关系,使水流输沙能力降低。又据李倬的调查,杨家沟仅有林地 40%,1958~1965 年间平均减沙效益多达 92.6%,在 10 年左右时间内,河床淤积 0.5 m;天然林区王家沟,由于森林作用,120 多年间,河床抬高 5 m 多,使河床变得宽浅,灌木水草密生,从而步入良性循环的有利状态^[10,11]。

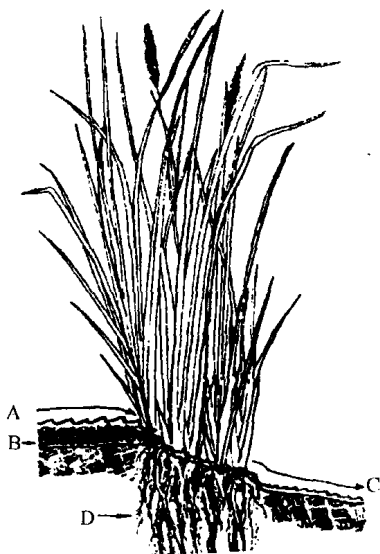


图 0.1 香根草篱剖面示意图



图 0.2 香根草篱剖面地形变化

尹学良教授在“河沟节节滞洪拦沙的图景”中讲道^[3]:“在沟谷的干河床和河滩上,自上而下地成段种植片林,段长和各段间距,视当地洪水强度而定,以片林不致被一次洪水冲毁过多为度。片林形成后,其间和上下河段将陆续生长林草;而且随淤随长,长期起