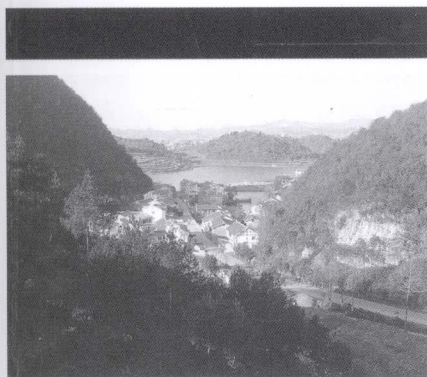


云贵高原

典型陆地

生态系统研究(二)

典型流域生态系统、
水生态过程与面源污染控制



主 编 王震洪
副主编 吴永贵 张崇玉 刘鸿雁
周运超 阴晓路 许昌敏
张梦娇



科学出版社

云贵高原典型陆地生态系统研究(二)

——典型流域生态系统、水生态过程与面源污染控制

主 编 王震洪
副主编 吴永贵 张崇玉 刘鸿雁 周运超
 阴晓路 许昌敏 张梦娇



科学出版社

北京

内 容 简 介

云贵高原典型陆地生态系统中,滇池流域、贵州两湖流域、金沙江流域、牛栏江流域、小江流域生态系统是生态破坏比较严重或环境污染问题突出的典型流域生态系统,其流域面源污染不仅造成了当地环境质量下降,而且也影响着长江、珠江中下游水环境安全。本书首先提出流域生态系统结构的新框架,并分析了流域系统结构成分特征及成分之间的相互关系;探讨了不同土地利用类型降雨径流作用下污染物产生特征,径流水、污染物和影响因子间的相互作用;利用流域出口监测资料,评价了流域面源污染物输出特征和动态规律;讨论了农村户用复合多功能污水处理、生态沟道污水处理和坡式湿地污水处理三级系统的结构、功能、施工工艺及污水的处理效果;介绍了针对农村设计的新型堆沤肥系统、玻璃钢沼气池系统、蚯蚓分解池系统处置农村固体废弃物,实现循环利用的技术模式;总结了削减农田氮磷排放的有机水稻种植模式、缓控释肥、精准化施肥、生物菌肥施用技术和控制坡耕地土壤侵蚀的植物篱种植技术模式。

本书可供生态学、环境科学、环境工程、农学、水土保持科技人员和管理者参考。

图书在版编目(CIP)数据

云贵高原典型陆地生态系统研究(二):典型流域生态系统、水生态过程与面源污染控制/王震洪主编. —北京:科学出版社,2013. 1

ISBN 978-7-03-036104-2

I. ①云… II. ①王… III. ①云贵高原-陆地-生态系统-研究 IV. ①P942. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 284547 号

责任编辑:马俊 刘晶 / 责任校对:刘小梅

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2013年1月第一次印刷 印张:21 3/4

字数:513 000

定价:98.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

Typical terrestrial ecosystems in Yun-Gui plateau in China (II)

—— typical watershed ecosystems, water ecological processes and non-point source pollution control

Editor-in-Chief: Zhenhong Wang

Vice Editors-in-Chief: Yonggui Wu, Chongyu Zhang, Hongyan Liu,

Yunchao Zhou, Xiaolu Yin, Changmin Xu, and Mengjiao Zhang

Science Press

Beijing

前 言

云贵高原区域生态系统包括许多典型陆地生态系统,如典型森林、灌丛、流域生态系统、典型山地退化生态系统、典型石漠化退化生态系统、典型城市生态系统等。这些生态系统构成了陆地生态系统的主体,为云贵高原地区、长江和珠江中下游提供着生态系统服务。然而其中的一些生态系统,由于环境污染或生态退化,在提供一定生态系统服务的同时,对周围或下游生态系统产生了负面影响,导致这些生态系统环境恶化,制约了社会经济的可持续发展。在云贵高原腹地的滇池流域生态系统、贵州两湖流域生态系统、牛栏江流域生态系统、小江流域生态系统、金沙江流域生态系统就是这种生态系统的典型。

这些流域生态系统有一个共同特征,就是流域内分布着比较多的农村人口,农业生产方式与我国东部和中部比相对落后,生产生活中的污水大部分没有经过处理而直接排放到流域沟道、河道,固体废弃物没有良好的收集和处置体系,大部分村庄对固体废弃物都是按传统方式堆肥、随意堆放倾倒等。在流域生态系统内,为了发展农业,获得更多的农产品,增加群众收入,农田施肥、用药水平都比较高。流域的山地部分,坡地耕种还比较普遍,导致了严重的水土流失。因此,在这些流域内,从村落、农田、坡耕地产生了大量的面源污染物,对流域内的湖泊、长江、珠江中下游水体构成了面源污染。例如,滇池、红枫湖、百花湖的水体在一年的大部分时间水质都在Ⅳ类到Ⅴ类之间,严重影响了昆明和贵阳两个大城市的用水安全。这些流域产生的面源污染物向中下游输送,使长江、珠江水系也被严重污染。尽管在过去的10年里,国家通过“973”计划项目、国家科技支撑计划、国家水专项等重点科技项目,对全国包括云贵高原地区的典型流域农业农村面源污染治理进行了系统研究,各级政府对所管辖地区的流域也开展了面源污染治理,但全国包括云贵高原地区的关键湖泊和流域水质并没有根本好转,且农业农村面源污染治理技术本身也存在不少的问题。

从国内外看,农业农村面源污染治理技术主要存在以下三个方面的问题。①各种科技项目已经开发了不少的农业农村面源污染治理技术,各单项技术在治理中效果常常也很好,但是这些治理技术没有按流域单元和水生态过程进行各种技术的综合集成、整体治理、形成多级控制体系。江河湖泊上游是由有限个微流域构成的多级系统,污染物通过流域的水生态过程产生、输送,并在流域出口排放,导致水体污染。如果按流域单元治理,可根据水生态过程设计污染物产生、输送、排放及污染部位的治理措施,连续多级控制,并通过出口径流和污染物监测,准确评估治理效果,调整治理技术和配置。②在农村,面源污染治理是要削减氮磷使用,而发展高效农业需要增加肥料使用。已开发的治理措施没有达到环境治理目标和农业发展目标的协调。如何在流域内建立一种减少肥料使用的高效农业,是解决这一矛盾的关键所在。③治理措施没有很好地按生态系统物质循环原理设计。生态系统物质循环表现为输入和输出平衡。如果按物质循环原理设计治理措施,可使面源污染物(当被充分利用就变成资源)在流域内充分循环,大量

削减输出流域的量。例如，可以设计能使固体废弃物在“村落—农田”循环起来的设施，发展循环农业，使固体废弃物充分利用，减少化肥使用，实现固体废弃物和农田高氮、磷排灌水污染的有效控制等。

为了解决这些问题，由王震洪教授主持，申请并获得了两湖一库专项“两湖一库汇水区域农业面源污染治理技术与新农村建设示范”（2009 筑科农合同字 3-042 号）的资助。该项目基于面源污染物在流域内通过水流作用从村落、农田、坡耕地、园地产生，通过沟渠、小型河道向湖泊排放，导致水体污染，富营养化加剧的规律，选择“两湖一库”汇水区的一个微流域为研究单元，设计了费用低、适合农村推广应用的村落生活污水多级处理技术、村落固体废弃物循环处理技术、农田氮磷削减施肥技术、植物篱治理坡耕地水土流失生态工程技术，并组合在该流域中进行试验研究和示范，评估各单项治理技术效果，在微流域出口监测评估流域尺度上面源污染负荷。本书对这些研究成果进行总结，首先根据国内外研究资料，提出一个新的流域生态系统研究体系，并对系统结构成分、生态问题和相互关系进行分析，然后对流域水生态过程和面源污染治理的各单项技术试验研究进行总结，形成理论和技术体系，为农业农村面源污染治理提供技术支撑。

全书共 7 章，第一章，典型流域生态系统，由王震洪撰写；第二章，流域内网间带不同土地利用类型地表和土壤中面源污染物输出特征，由张梦娇、许昌敏、王震洪编写；第三章，流域出口面源污染物输出动态及负荷分析，由阴晓路、王震洪编写；第四章，流域内农村生活污水多级处理技术及面源污染控制效应，由吴永贵编写；第五章，流域内农村固体废弃物循环处理技术及面源污染控制效应，由刘鸿雁编写；第六章，流域内农田氮磷削减施肥技术及面源污染控制效应，由张崇玉编写；第七章，流域内植物篱控制坡耕地土壤侵蚀模式及面源污染控制效应，由周运超编写。书稿分章节完成后，由王震洪教授统稿。

编 者

2012 年 10 月 13 日

目 录

前言

第一章 典型流域生态系统	1
1.1 流域作为生态系统研究尺度的意义	1
1.2 流域系统结构	4
1.3 流域形态	6
1.4 河网	8
1.5 网间带.....	25
1.6 湖泊.....	37
1.7 网间带水土流失对河网和湖泊系统的淤积作用.....	43
1.8 网间带系统对河网和湖泊系统污染的影响.....	48
1.9 河流和湖泊系统水体富营养化的形成机理.....	59
1.10 讨论	63
参考文献	64
第二章 流域内网间带不同土地利用类型地表和土壤中面源污染物输出特征	68
2.1 研究意义.....	68
2.2 国内外研究现状.....	69
2.3 本研究关注的科学问题.....	71
2.4 自然降雨下不同土地利用类型面源污染物产生特征.....	72
2.5 模拟降雨下不同土地利用类型地表径流和土壤渗滤水氮磷污染物产生特征	89
2.6 模拟地表径流冲刷下不同土地利用类型氮磷污染物产生特征.....	95
2.7 模拟土壤渗滤水淋溶作用下氮磷污染物输出特征	102
2.8 讨论	107
参考文献.....	113
第三章 流域出口面源污染物输出动态及负荷分析	116
3.1 研究意义	117
3.2 国内外研究现状	117
3.3 本研究关注的问题	123
3.4 流域概况及研究方法	124
3.5 监测期间小流域出口面源污染物浓度动态变化	128
3.6 小流域入湖径流量、污染物入湖负荷分析	146
3.7 讨论	151
参考文献.....	154
第四章 流域内农村污水多级处理技术及面源污染控制效应	158
4.1 研究意义	158

4.2	国内外研究现状	160
4.3	本研究关注的科学问题	166
4.4	试验研究地自然和经济概况	167
4.5	农村生活污水三级处理系统研究方案	169
4.6	户用复合多功能污水处理系统研究	176
4.7	生态沟道系统研究	185
4.8	坡式湿地系统	189
4.9	讨论	194
	参考文献	197
第五章	流域内农村固体废弃物循环处理技术及面源污染控制效应	200
5.1	研究意义	201
5.2	国内外研究现状	201
5.3	本研究关注的科学问题	206
5.4	农村固体废弃物基础数据调查与管理机制研究	207
5.5	农村新型堆沤肥技术研究	216
5.6	一池三改玻璃钢沼气池技术	223
5.7	讨论	229
	参考文献	231
第六章	流域内农田氮磷削减施肥技术及面源污染控制效应	234
6.1	研究意义	235
6.2	国内外研究现状	236
6.3	本研究关注的科学问题	245
6.4	试验地土壤重金属/土壤营养现状评价	246
6.5	有机水稻种植模式及对稻田水中氮磷削减效应	250
6.6	精准化施肥、施用微生物肥料对稻田水氮磷削减效应	267
6.7	包膜筛选及缓释氮肥对稻田氮排放削减效应研究方法	279
6.8	讨论	290
6.9	结论	296
	参考文献	301
第七章	流域内植物篱控制坡耕地土壤侵蚀模式及面源污染控制效应	306
7.1	研究意义	306
7.2	国内外研究现状	307
7.3	本研究关注的科学问题	310
7.4	研究方法	311
7.5	植物篱栽培管理技术	319
7.6	植物篱的生长状况	324
7.7	土壤侵蚀控制效应评估	325
7.8	讨论	334
	参考文献	336

第一章 典型流域生态系统

摘要 流域作为地貌学和水文学的研究单元,具有明确的物质界限和范围。在流域尺度上定义生态系统,一方面使生态系统具有客观的研究尺度,另一方面使流域单元蕴涵着丰富的生态学规律。流域的最大特点是水文和伴随的物质输送过程,因此流域生态系统的研究核心是流域系统结构与水生态过程的关系及规律。本节讨论了流域作为生态系统研究尺度的意义,定义了流域生态系统的结构和水生态过程的概念,讨论了流域生态系统的形态和量化指标,分析了流域系统各结构成分的特征及相互关系,认为流域生态系统由形态上具有显著差异的河网、网间带和湖泊构成。河网由沟道和河道构成;网间带由表面特征和生态功能具有显著差异但表面均匀的土地类型构成,包括林地、荒山荒坡、草地、坡耕地、农田、人居环境;湖泊包括人工坝塘、水库、天然湖泊和湿地。河网是连接网间带和湖泊的径流及物质输送通道,其形态结构、功能与网间带和湖泊特征有关。湖泊大小、水位和功能受网间带及河网的调控。河网的侵蚀、湖泊的沉积也调节着网间带的形态结构,三个结构成分之内和之间发生着一系列的生态作用和过程,其中水生态过程是流域最典型的生态系统过程,流域生态系统各结构成分之间相互作用必须依赖于水生态过程。流域各结构成分之内的生态过程如生物量、生产力、多样性,土壤侵蚀、面源污染物产生、输送对其他两个结构成分的影响一般要通过水生态过程。山区河道中的阶梯-深潭系统对维持河道稳定和河道生物多样性具有重要意义。河道系统组成和物质成分反映了河道上游网间带特性。河道下游的冲淤过程与上游网间带的生态过程有关,并影响着三角洲和河道的演化。从伦理学的角度,河道具有生命的意义。河道演变中,受网间带面积、气候、地质、地貌的影响,形成了不同的类型。山区河道和平原河道在形态特征、水生态过程、生态效应方面具有显著的差异。沟道作为河道的上游部分,具有与河道不同的特征。沟道侵蚀使网间带面积减小,营养物质向河道、湖泊输送,对河道、湖泊产生了淤积作用,改变着河道、湖泊生态环境和生态过程。网间带的生态格局和过程调控着河网、湖泊水体环境质量。网间带中坡耕地、人居环境系统和农田是面源污染的主要来源。网间带的个体、种群、群落、生态系统的格局和过程都会在形态、结构、功能上影响沟道、河道和湖泊,沟道、河道和湖泊在形态、结构、功能的变化也会反作用于网间带的个体、种群、群落、生态系统的格局和过程,因此,河网、网间带和湖泊是一个有机的整体,构成有固定界限的流域生态系统。

关键词 流域生态系统;网间带;河网;沟道;河道;湖泊;面源污染;水生态过程;阶梯-深潭系统

1.1 流域作为生态系统研究尺度的意义

流域(watershed)是指地球陆地上一个闭合的汇水区域。流域在空间上可由形态

及结构具有差异的河网、网间带和湖泊构成（图 1-1）。河网是连接上游网间带与下游湖泊的物质输送通道，由沟道、河道构成；网间带是流域内沟道和河道之间的部分，包括不同的土地利用类型，如林地、坡耕地、农田、荒山荒坡、人居环境；湖泊是流域中储存径流的水体，包括坝塘、水库、湖泊和湿地。河网、网间带和湖泊内部及相互之间发生着一系列的生态过程，其中水生态过程是流域最典型的生态系统过程。水生态过程是指由于水在循环过程中与环境的作用而导致流域中的河网、网间带和湖泊发生的一系列变化过程。这些过程主要是在流域尺度上水的下落、流动、渗透过程中导致河网、网间带和湖泊发生的形态、结构和功能的变化。

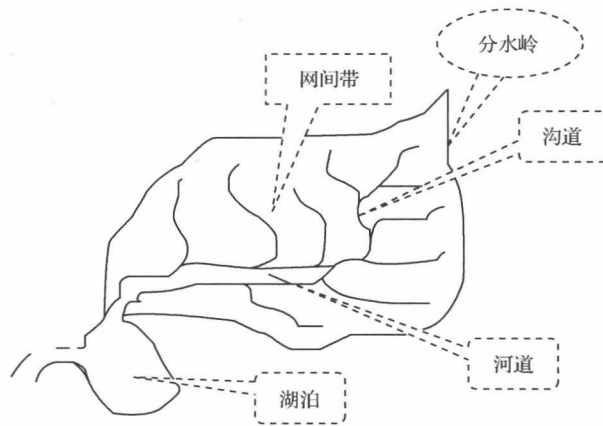


图 1-1 流域生态系统结构

在构造运动形成的原始地形上，降水和径流的塑造作用形成了流域。流域是水生态过程的产物和发生水生态过程的场所。不同地区流域的河网、网间带、湖泊特征是不同的，这些不同导致了流域水生态过程的差异。例如，长江中下游河网地区流域，河道较密、坡降小、河道形态受人类影响较大，网间带平缓、地下水位高、土地利用类型主要是农田，河道水位高、流速慢、营养盐丰富。而在长江上游的云贵高原地区，流域的这些特征刚好相反，即河道较稀疏、坡降大、河道形态受人类影响小，网间带起伏大、地下水位低、土地利用类型主要是林地和灌丛，河道中水位低，很多是季节性河流，水流速度快。

在流域中，水既是一个塑造流域的媒介，也是连接河网、网间带、湖泊的媒介。液体水还是生态系统中生命元素得以无限循环的介质，是人类赖以生存和社会经济发展的重要资源。水资源的开发、利用和管理已成为各国普遍重视的课题。水资源的形成、时空变化、容量、人口承载力等问题的研究，以及正确制定水资源发展战略，协调各国水资源利用，都常常在流域尺度上开展。水在流域中的流动将网间带的污染物输送到河道、湖泊中，从流域上游输送到下游，导致流域一系列水污染问题。流域中污染物的积累、迁移、转化，不论在生物个体水平，还是在流域水平都与水有关。流域内河网和湖泊富营养化问题、网间带水土流失问题、河网和湖泊冲淤问题都与水在流域中的流动有关。因此，流域尺度上水生态过程的知识对保护和合理利用水资源、解决流域污染问题

具有重要意义。

现代生态学发展表明,生态学不断向宏观和微观两个方向拓展。宏观的最大尺度是从全球研究环境变化的生态学问题,是各种生态学过程的整合,即全球生态学;微观方面是利用分子生物学技术探讨生态学过程的分子机制,即分子生态学。在宏观和微观的两极之间,存在着一系列中间地带的生态学,如个体生态学、种群生态学、群落生态学、生态系统生态学、景观生态学等。生态系统生态学是以具有非生物成分、生产者、消费者、分解者及相互关系为研究对象的生态学,生态系统生态学的发展使生态学领域达到了一个新的高度。生态学家在生态系统生态学这一中尺度上改革生态系统成分论(非生物成分、生产者、消费者、分解者成分),发展了景观生态学的斑块论(斑块、廊道、基底),将生态系统成分作为斑块中的元素,研究生态问题。但是,不论是生态系统生态学还是景观生态学,在研究格局和过程时,尺度问题一直困扰着生态学家。生态系统生态学和景观生态学在尺度上弹性比较大,特别是生态系统,尺度可从局域尺度到区域尺度,而且常常没有一个自然的分界线,一般都是根据研究的便利主观上进行确定。如果把流域作为生态系统的研究尺度,那么生态系统就有了客观的自然分界线和尺度,即地球陆地一个闭合的汇水区域。以这一尺度为单元的生态系统生态学研究被生态学家确定为流域生态学,并把流域系统确定为高地、滨岸带和水体构成的系统(吴刚和蔡庆华,1998;邓红兵等,1998;尚宗波和高琼,2001)。笔者将流域系统确定为河网、网间带和湖泊构成的系统,这样确定的理由主要是:①尽管湖泊和河网的主体都是水体,但湖泊和河网的环境条件、动力学过程具有很大差异,它们具有显著差异的生态特征;②在流域中,很容易区分主要起物质输送作用的河网、起物质储存作用的湖泊和起物质输出作用的网间带,使流域结构和功能的研究具有客观明确的界限;③用河网、网间带和湖泊作为流域的要素,能使流域生态学的概念和地貌学、水文学上的概念通用,并为流域尺度上的生态学带来丰富的信息和方法论基础。

以流域为尺度,关注水生态过程为核心的河网、网间带和湖泊之间关系及调控的流域生态系统研究(可称为水生态过程论,有别于生态系统成分论、景观生态斑块论),具有以下三个方面的生态学意义。①流域具有客观自然的研究尺度(非人为划定),使研究具有很好的可操作性。因为生态系统生态学理论认为,只要是由非生物成分、生产者、消费者、分解者构成的相互作用体系,如小到一个池塘、大到整个地球范围都可以是生态系统,使生态系统的研究工作在许多问题上由于尺度问题被困扰,用流域限定生态系统范围使生态系统具有客观物质界限,并清晰化。②水资源、水环境和面源污染问题是目前备受关注的生态环境问题,这些问题都与流域尺度上河网、网间带和湖泊之间的水生态过程相关,通过流域尺度上的水生态过程研究,可以优化生态系统过程,实现流域水资源保护和水环境改善。③生态学家普遍认为,生态学缺乏普适原理,在一个等级尺度上研究获得的生态学规律,常常不能被利用来建立其他等级生态学的理论体系。由于流域在形态和结构上具有自相似性,把不同等级生态学中的格局和过程布置在不同尺度流域上进行研究,并与水生态过程联系,有可能使小流域尺度上的研究结果和规律外推到大流域尺度上,提高生态学理论的普适性。

1.2 流域系统结构

1.2.1 一般系统结构

在一定的时空范围内，存在着同种或异质性的结构成分，这些成分之间相互影响、相互作用、相互制约，使这个时空范围形成一个有机的整体，这个有机整体就称为系统。自然界和人类社会任何事物都是以系统的形式存在的。当我们研究一个事物的内在本质联系，并从整体角度进行综合研究时，这个事物就是一个系统。系统是系统论的研究对象。系统论把研究对象看成整体和系统，全面研究系统中各成分之间的相互关系、相互作用，以及系统和周围环境之间的物质和能量交换过程，从而确定系统的整体运动规律。

系统论的思想由美籍奥地利生物学家贝塔郎非于 20 世纪 20 年代首先提出 (Bertalanffy, 1950)。19 世纪到 20 世纪，科学技术的发展带来了工业发展、经济繁荣和社会进步。由于生产规模急剧扩大，生产过程越来越复杂，科学合理地组织和管理生产、避免浪费成为社会生产的关键问题。科学技术在世界范围内高度分化，衍生出许多分支学科；学科间的交叉，又产生新的边缘学科。科学技术越分越细的发展模式也使它面临着许多分支学科所不能单独解决的科学问题。因此，自然科学和社会科学中出现了把设计内容广泛、因素复杂的研究对象作为一个整体，进行全面、系统、大规模综合研究的趋势。在工业生产领域，需要解决的生产性问题涉及众多技术，规模又十分庞大，或者研究的对象极为复杂，其变化过程受控于许多条件和因素，原有各分支学科的理论、思想、方法都无法圆满解决这些问题，于是“系统论”应运而生 (陆中臣等, 1991)。

系统论包括系统思想、系统科学和系统哲学。它既有认识客观实体的总体结构的哲学思想，又有科学精确的数学方法，能定量地描述系统及其变化过程。它跨越自然科学和社会科学两大领域，可以广泛地应用于社会系统、经济系统、管理系统、生物系统以及决策和预测研究中。在系统论中，任何一般系统都具有三个基本特征：①系统中至少存在两个以上的结构成分（或要素、组分）；②系统中结构成分与结构成分、结构成分与整体，以及整体与环境之间存在相互联系、相互制约的关系；③系统具有不同于各个结构成分的整体新功能。

结构成分是指构成系统的各个组成成分，系统是整体，结构成分是部分，两者互相依存。没有系统就没有结构成分，没有结构成分也无系统可言。系统对结构成分起着支配和主导作用，它决定和控制了结构成分的性质与功能。结构成分是构成系统的基础，结构成分的变化会引起系统性质的变化。

一个系统对更高一级系统来说，它是一个结构成分。任何一个系统的结构成分，又往往是次一级结构成分的系统。同一个事物在一定范围内是系统的结构成分，在另外的范围可确定为系统。系统和结构成分具有相对性，一个系统在大系统中是一个结构成分，同时它又是一个小系统，其中，次一级成分的结构决定了它的性质和功能。如此推演，在系统中可发现无限层次系统系列，其中每个环节的结构成分都具有双重的地位和作用 (陆中臣等, 1991)。

任何系统都有特定的结构和功能。结构是不同成分在系统中所占的比例、空间配置

方式和因果关系。系统功能是系统整体或局部为维持系统存在、系统结构成分和系统间的相互联系，对自身和系统外环境产生的各种效应的集合。同种结构成分组成的系统，由于它们组织结构的不同，可使系统表现出完全不同的性质和功能。稳定性和有序性是系统结构的基本性质。系统与环境之间总是进行物质、能量和信息交换，所以系统的结构总是处在不断变化过程中。系统以外的周围事物称为环境，在一个大系统中，当我们把其中一个结构成分看成子系统时，其他结构成分就是这个子系统的环境。

对系统进行研究时，由于研究目的、角度和范围不同，可把系统分为各种类型。根据系统的构成，可分为物质系统和概念系统。物质系统是客观物质或事物组成的系统，如原子、分子、生物、人体、环境、企业、社会等。概念系统是由主观概念和逻辑关系等非物质组成的关系，如计划、决策、制度、法律等。按组成系统结构成分的性质，可分为自然系统、人工系统和复合系统。自然系统指自然界不依赖于人力而独立存在的各种系统，如天体系统、大气系统、生态系统等。人工系统是由人类活动而建立起来的各种系统，如文化系统、经济系统、城市系统。复合系统是由自然系统和人工系统相结合而构成的系统，其中包括自然结构成分和人工结构成分，如农业系统、环境系统、牧业系统。从系统环境之间的关系看，可分为封闭系统和开放系统。封闭系统是系统与周围没有物质和能量交换的系统。开放系统是指与环境存在物质、能量和信息交换的系统。开放系统由于不断和外界发生物质和能量的交换，该系统从无序向有序发展和演化。系统开始演化时与外界物质和能量的交换较少，系统处于平衡状态，系统为相对无序结构。随着时间的推移，物质和能量的交换增加，系统达到非平衡状态。系统本身产生熵，同时又向外界输出熵，输出大于产生，系统保留的熵减少，所以走向有序。这时系统只有耗散能量才能保持结构，因此称为耗散结构（陆中臣等，1991）。

1.2.2 流域系统结构

因为流域呈现一定的时空范围，流域内有河网、网间带、湖泊三个基本结构成分，每一个结构成分可进一步细分为更小的成分，这些结构成分之间存在相互影响、相互作用、相互制约的关系，因此流域是一个典型的系统。但是流域系统是一个巨体系统。流域系统具有三个基本特征：①河网、网间带和湖泊三个系统结构成分中，至少必须有两个结构成分才能称为流域系统；②流域系统的这三个结构成分是相互联系、相互作用和相互制约的；③流域系统的功能不同于流域系统中每个单独结构成分的功能。

从流域系统的类型来看，流域系统是一个物质系统，因为流域系统每个结构成分都存在物质形态和结构。流域又是一个复合系统，因为流域在人类社会诞生之前就独立存在，不依赖于人力。在人类社会诞生之后，人类在流域中建立了各种人工系统，如城市、水利工程、人工绿地等人造自然物。所以，流域是自然和人类相互作用的综合体。流域还是开放系统，因为流域与流域外不断进行着物质、能量和信息的交换，使流域维持有序状态。例如，在流域内进行农业生产活动中，农民为了获得高产，使用来自流域外的化肥和农药；流域内的居民日常生活利用流域外的生活必需品，利用流域外输入的电能、煤炭、石油能源等。

对于由网间带、河网和湖泊构成的某一个流域系统来说，一般隶属于更大的流域系统，如对于金沙江流域系统来说，更大的流域系统是长江流域；而且金沙江流域可分出

许多次级的流域系统，如小江、牛栏江、龙川江、雅龙江、通天河等流域系统。不论是大的流域系统还是小的流域系统，其系统构成的基本成分都为网间带、河网和湖泊。在这三个流域基本的构成成分下，还可分为不同的亚成分，如网间带由林地、农田、坡耕地、荒山荒坡、人居环境系统等成分构成，湖泊由人工水库、坝塘、天然湖泊湿地等构成，河网由河道和沟道构成等，这些亚成分根据系统结构还可再进一步划分成更小的成分，如一条河道可由深塘、急流、沙滩组成的若干段构成。

不同的流域，流域生态系统结构成分在系统中所占面积比例、空间配置方式和相互作用关系是不同的，相应的流域功能也具有差异。例如，有的流域中网间带这个基本成分中林地多一些，有的则农田、人居环境系统面积大一些，相应地，流域系统的功能就具有差异。但一定地理区域的流域具有比较相似的结构，如云贵高原的流域的网间带、河网、湖泊结构特征方面具有很高的相似性，但它与黄土高原地区的流域在这些方面差异性就很大。流域系统结构成分之间相互联系、相互作用，维持着流域整体或局部的存在，发挥着一定的流域功能，如网间带对湖泊的水源补给功能、水资源净化功能、初级生产功能、河网的物质输送功能等。

流域系统具有稳定性和有序性。稳定性表现在一定范围内，人类对流域干扰或自然干扰，流域生态系统结构和功能保持相对稳定、有序。在一定强度的人类干扰或自然干扰后，流域可恢复到原来状态。但保持稳定和有序具有一定的阈值，当干扰超出流域抵御干扰的阈值时，流域系统将变得不稳定和有序化。我国许多淡水湖泊如滇池、太湖就是因为网间带输送入湖的污染物超出了湖泊净化的阈值而出现系统自然恢复困难，需要通过人工措施进行湖泊生态系统恢复。流域系统与环境之间总是进行物质、能量和信息交换，所以系统的结构总是处在不断演变过程中。这种演变包括河网、网间带和湖泊中植被、地形、地貌、土壤等的演变。

1.3 流域形态

流域形态是流域在水平面上的几何形状。对流域形态的描述一般有定性描述和定量描述。一般定性描述把流域描述成长条形、椭圆形、扇形、圆形、不规则形等。不同的形态对流域的生态过程有着显著影响。例如，相同面积和相似高差的圆形流域和长条形流域，在流域生物地球化学循环上就有显著的不同。圆形流域地表径流的汇集和消退要比长条形流域快。降雨产生径流时，径流很快汇集到沟道中，使流域中下部的土壤侵蚀强烈，物质损失多，结果导致土壤环境恶化，影响植被初级生产力。长条形流域地表径流的汇集和消退速度较慢。降雨产生径流时，接近流域出口部分产生的径流先汇集到沟道优先流出流域，之后是流域中部和尾部的径流流出。由于径流汇集不集中，径流对流域中下部的土壤侵蚀相对较弱，物质损失相对较少，土壤环境有利于植被初级生产力的形成。

流域形态定性描述只对流域进行概括性的描述。要准确描述流域形态特征的不同，需要通过定量指标来描述（承继成和江美球，1986）。

1.3.1 形态要素

流域形态的定量描述, 在 1932 年 Horton 就已经开始研究。他用流域面积 A_d 与流域最大长度 L_m^2 的平方之比表示形态要素 R_t :

$$R_t = \frac{A_d}{L_m^2} \quad (1-1)$$

流域形态要素 R_t 随着流域长度增加而减小。若流域为正方形, 则形态要素为 1; 若流域为圆形, 形态要素为 $\pi/4$ 。但完全为方形和圆形的流域是不存在的, 其形态要素的常数值仅作为理论上与其他形态流域进行对比。

1.3.2 紧度系数

紧度系数 (m) 表示流域实际周长 P 与等面积的圆的周长 P' 之比。

$$m = P/P' \quad (1-2)$$

$$\text{或 } m = \frac{0.282P}{\sqrt{A}} \quad (1-3)$$

式中, A 为等面积圆的面积。对于圆形流域, 紧度系数 $m=1$; 方形 $m=1.128$; 最长的流域 m 值可超过 3。

1.3.3 流域圆度

流域圆度 R_c 表示流域面积 A_a 与等周长圆的面积 A_c 之比:

$$R_c = \frac{A_a}{A_c} \quad (1-4)$$

若流域是圆形的, 则 R_c 为 1; 若流域是方形的, 则 R_c 为 0.785。流域不断加长, 则 R_c 值不断减小。

1.3.4 流域狭长度

流域狭长度表示具有等面积圆的直径 D_c 与流域主轴线平行的最大轴线长度 L_b (近似于流域长度) 之比。

$$R_e = D_c/L_b \quad (1-5)$$

由于 $A=\pi D_c^2/4$, 则 $D_c=2(A/\pi)^{1/2}$, 式 (1-5) 可变成容易计算的式 (1-6)。

$$R_e = \frac{2\sqrt{A}}{L_b\sqrt{\pi}} \text{ 或 } R_e = \frac{1.129\sqrt{A}}{L_b} \quad (1-6)$$

若流域形态是介于圆形到方形之间的类型, 则流域狭长度为 1.275~1.128, 其值的减小与流域长度成正比, 最小值约为 0.20。在计算此值时, 若选平均流域长度代替 L_b , 则圆度和狭长度有较好的相关关系。

1.3.5 曲度

Chorley 等 (1957) 选用曲率极坐标方程来表示流域形态变化, 即

$$\rho = L_b \cos \bar{\omega} \theta \quad (1-7)$$

式中, ρ 为出口到进口的轴径; θ 为半径与基线的夹角。当 θ 等于 0 时, $L_b = \rho$ 。 $\bar{\omega}$ 表示流域接近于圆形的程度, 由式 (1-8) 确定。

$$\bar{\omega} = L_b^2 \frac{\pi}{4A} \quad (1-8)$$

当 $\bar{\omega} = 1$ 时, 流域为圆形; $\bar{\omega} = 1.27$ 时, 流域为方形; 当 $\bar{\omega}$ 增大到 10~15 时, 流域为长形。

1.3.6 流域不对称系数

一个流域的干流不会正好将其面积分为相等的两半, 干流的位置也就不会正好在分水线的中间。因此, 通常干流两边的面积是不相等和不对称的, 这种不对称性, 一般用不对称系数表示, 即流域干流左右两岸面积之比。阿波洛夫用下式计算流域不对称系数:

$$a = (f_\lambda - f_{np}) / \frac{(f_\lambda + f_{np})}{2} \quad (1-9)$$

式中, f_λ 和 f_{np} 分别代表左、右岸流域面积。

1.4 河网

在流域中, 河网是连接湖泊和网间带的径流通道。没有湖泊的流域, 河网是通向流域出口的径流通道。河网由沟道系统和河道系统构成。

1.4.1 沟道系统

1.4.1.1 沟道的概念

沟道是连接网间带和河道系统之间的部分, 是两个系统的纽带, 也可以说是二者间的过渡带。沟道的横断面一般为“V”形, 沟底没有完整的阶地、河漫滩等地貌单元。河道的横断面则应清楚地划分出河床、河漫滩、阶地等地貌单元。一般沟道没有流水, 但在干旱地区, 许多河道大部分时间也无流水, 只有暴雨季节才出现暂时性流水。所以不能用有无常年流水划分沟道与河道。

1.4.1.2 沟道发育规律

石质山地上, 溯源侵蚀不明显, 沟道侵蚀量小, 发育速度相当缓慢, 发育时间常常要以地质时间来计算, 而且发育过程中受构造因素如地震导致的断裂、沉陷等影响, 沟道发育会被中断。因此, 石质山地沟道发育规律比较复杂。在黄土地区, 由于土质疏松、黄土沟道发育迅速, 较短的时间内可以形成典型的沟道系统。在此期间, 新构造运动的影响不明显, 可以把沟道发育看成完全的外动力过程。

黄土地区, 无论是风成的原生黄土, 或者经流水作用改造后再沉积的次生黄土, 它们在外观上很难区别, 给分析沟道发育历史的工作带来困难。自 20 世纪 70 年代以后, 黄土研究工作日益深入, 通过对黄土古土壤序列的详细年代学研究, 基本确定了各层黄土和古土壤的地质年龄, 从而为探索沟道发育历史提供了新的线索。黄土梁峁地区, 地

形起伏较大，冲沟剖面比较复杂，难于恢复其发育过程。黄土塬区地形比较平缓，黄土层和古土壤层呈水平延伸，沟道侵蚀比较微弱，保留了清晰的沟道发育过程的地质记录。因此，可以首先在黄土塬区查明沟道发育历史，然后进一步与黄土梁峁区进行对比，全面了解黄土区沟道发育规律（陆中臣等，1991）。

1.4.1.3 沟道系统分类

沟道系统分类是研究沟道结构和发育的基础。对于沟道分类，黄土高原地区的研究比较详细。罗来兴等（1955）在研究陕北无定河黄土区域的侵蚀时，将沟道分为纹沟、细沟、切沟、浅沟、冲沟、干沟和河沟等类型。纹沟是坡面径流最初轻微的沟状侵蚀，沟形远望如梳状花纹。细沟宽度与深度由几厘米到几十厘米，沟与沟的间距由几十厘米到大约 1m，在坡耕地上，犁作过程可消除。细沟为坡面径流在片状侵蚀基础上，发生最初沟状侵蚀，它的分布是在分水线下一定距离的坡面上。分水线下出现细沟的临界距离为 4~12m 的约占总数的 90%。影响细沟出现的临界距离的因素很多，主要有坡度、暴雨强度、植被、坡向、岩性等。一般坡度越陡、暴雨强度越大、植被覆盖越低、坡向为北坡、土壤为较容易侵蚀的类型，细沟出现的临界距离越短。细沟出现的频率与临界距离间也存在一定的规律。在 0~80m 的临界距离内，随着距离增加，细沟出现的频率增大，但临界距离达到 30~50m 之后，则频率开始减小，表现出明显的抛物线特征（图 1-2）。细沟与坡度也表现出一定的规律性。一般细沟出现的临界距离与坡度呈局部直线相关（图 1-3）（陈永宗，1976）。

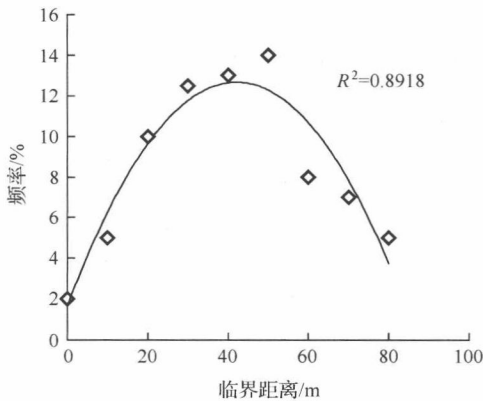


图 1-2 细沟出现临界距离与频率的关系

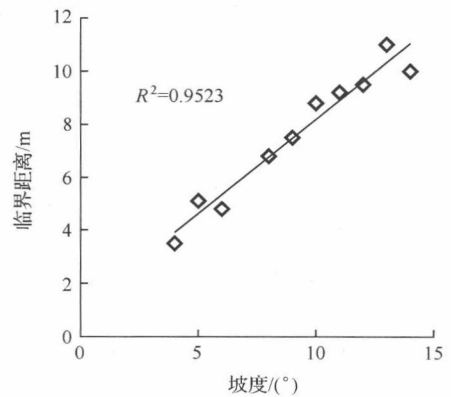


图 1-3 坡度与细沟出现临界距离间的关系

切沟是下切比细沟深的侵蚀沟，深度达 1m 甚至 2m，沟与沟间往往相隔数十米，犁作过程无法消除切沟的存在。浅沟呈展开的“V”形，无明显的沟缘，常常表现为狭长的浅洼地。切沟与浅沟属于同一性质不同发育阶段的沟道。切沟是处于强烈切割阶段的沟道，而浅沟则是接近均衡状态的沟道；一个是属于早期的沟道，另一个是属于晚期的沟道。切沟和浅沟的出现与坡度存在一定的关系，一般出现在 25°~30°的坡度上，约占这类型沟道总数的 60%。纹沟、细沟、切沟的排列随坡形而变化，在凸形坡面呈扇形分开，凹形坡面呈扇形集合，直线形坡面则平行分布。冲沟多为流水下切浅沟的结果，有明显的沟缘。浅沟与冲沟一般发生在凹形斜坡上，凸形与直线形的坡面则很少