



流域几何学

王光谦 李铁键 张 丽 黄跃飞 柏 睿 著



科学出版社

流域几何学

王光谦 李铁键 张 丽 黄跃飞 柏 睿 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

流域河网水系是一种树状结构。水利、地理和数学领域对河网的拓扑和几何结构进行了大量研究,形成了分级统计律、自相似理论、随机游走模型等理论成果,但还不具有系统性。本书一方面基于数学推导证明了河网分级统计律和自相似理论的等价性,提出了统一的河网拓扑结构模型,另一方面通过提出高效高精度河网提取技术,并进行全球主要流域的河网提取,统计了大量真实河网的结构和几何特征,给出了真实流域的几何规律,初步提出较为完整和独立的流域几何学理论、方法与参数体系。

本书首先介绍河网分级统计律、河网自相似律以及两者间的等价性;随后介绍河网提取和分层技术,并进行全球河网的提取;最后采用实测数据对河网拓扑结构和几何参数的统计规律进行验证与讨论。

本书对从事水利、地理、数学等专业工作的研究人员具有参考价值,也可作为相关专业研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

流域几何学/王光谦等著. —北京:科学出版社,2016
ISBN 978-7-03-050317-6

I. ①流… II. ①王… III. ①河流-水文计算 IV. ①TV131.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 258091 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:铭轩堂

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 1 月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:252 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

从沟谷源头到各级别河流构成的流域河网水系是气候和地质条件长期作用下形成的地表水流汇集运动的通道,是一种树状的几何结构。地理、水利和数学领域对河网的拓扑和几何结构的描述方法、特征变量、基本规律进行了大量研究,形成了分级统计律、自相似理论、随机游走模型等理论成果。但是这些基于不同方法和假定的理论还不具有系统性,对河网的拓扑和几何规律、河段和坡面/子流域的地形规律也没有进行系统定量的研究。最新的研究进展,特别是 2000 年以来在国际期刊中出现的相关学术论文和美国的两本博士学位论文,提示流域几何学理论正在逐渐成熟和完善,即将成为相关学科交叉下的一个新的独立的子学科。

国内还没有系统介绍河流或流域几何学的专著,这部分知识在河流地貌学中有简要介绍。1991 年出版的《流域地貌系统》、1998 年出版的《河流动力地貌学》对河网的分级统计律和随机模型进行了简要介绍。国内还没有书籍涉及对河网自相似理论的介绍。

国外关于流域几何学的理论著作主要有 Rodriguez-Iturbe 和 Rinaldo 著,剑桥大学出版社 1997 年出版的 *Fractal River Basins*。该书对流域的分形(即自相似)和多重分形特征进行了分析,对河流的最小能量理论和河流与流域的自组织理论进行了介绍,并简单介绍了地貌水文响应方法。该书以分形和自组织理论为基础,对河网和流域的形态及其发展过程进行了研究,理论方法先进,涉及面广,但并没有集中、完善地对流域几何学进行讨论,也不能反映近 15 年来流域几何学的最新进展。

国外另一本流域几何学著作是 2000 年麻省理工大学 Dodds 的博士学位论文 *Geometry of River Networks*。该论文以河网几何学为研究目标,提出了统一的河网分级统计律,并详细分析了实际河网中河网结构和统计参数的波动和偏差。但是,该论文篇幅有限,仍然没有明确提出河网分级统计律与自相似性间的等价关系,也不能反映十几年来流域几何学的最新进展。相关的博士论文还有 2010 年伊利诺伊大学厄巴纳—尚佩恩分校 Poore 的博士学位论文 *River Network Scaling: Optimality and Anisotropy*。

本书作者通过回顾相关研究成果、开展新的数学推导、提取并处理真实数据,力图提出较为完整和独立的流域几何学理论、方法和参数体系。本书一方面基于

数学推导证明了河网分级统计律和自相似理论的等价性,提出了统一的河网拓扑结构模型,另一方面通过提出高效高精度河网提取技术,并进行全球主要流域的河网提取,统计了大量真实河网的结构和几何特征,给出了真实流域的几何规律。作者希望通过这些努力,在地理、水利和数学的交叉方向上,促进对流域地貌的认识,并间接推动流域模拟和管理技术的发展。

本书主要分两大部分,第一部分介绍原理和规律,第二部分介绍方法和数据。在原理和规律部分依次介绍河网分级统计律、河网自相似律、分级律和自相似律间的等价性。在方法和数据部分,首先介绍河网及其参数的提取、河网分层技术,并进行全球河网的提取,最后采用实测数据对河网几何参数和拓扑结构的统计规律进行验证和讨论。参与本书撰写和相关工作的研究生还有:张昂、李家叶、傅汪、谢帅、邬涛、彭肖等。

由于作者水平所限,书中难免出现疏漏,敬请读者批评指正。

作 者

2016年8月于清华园

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究对象	2
1.2 河网特性	3
1.2.1 随机性	3
1.2.2 自相似性	4
1.2.3 平面填充性	4
1.3 河网参数	5
1.3.1 河网拓扑参数	5
1.3.2 河网几何参数	6
1.4 研究进展	10
第 2 章 河网中的分级及统计律	12
2.1 河网中的分级与编码	12
2.2 Horton-Strahler 分级法	14
2.2.1 分级规则	14
2.2.2 Horton-Strahler 规律	15
2.2.3 加权分支比	16
2.3 Shreve-Smart 分级法	17
2.3.1 分级规则	17
2.3.2 Shreve-Smart 水系形态参数	18
2.4 Tokunaga 分级法	21
2.4.1 分级规则	21
2.4.2 Tokunaga 统计律	23
第 3 章 河网自相似律	24
3.1 自相似的定义	25
3.2 河网的迭代器	25
3.3 河网的迭代规则	28
3.4 河网的迭代自相似	29
3.4.1 自相似河网的链数律	29
3.4.2 自相似河网的河流级别律	31
3.4.3 Tokunaga 自相似河网	33

3.5	平面填充约束	34
3.6	本章小结	36
第4章	河网结构规律的等价性	38
4.1	Tokunaga 规律与自相似的等价性	38
4.2	Tokunaga 规律与 Horton 规律的等价性	45
4.3	本章小结	46
第5章	河网提取	47
5.1	河网提取技术综述	47
5.2	河网提取的基本步骤	51
5.2.1	基于节点大小平衡二叉树的填洼预处理方法	51
5.2.2	基于最优汇流路径的栅格流向判断方法	54
5.2.3	基于栅格序列编号的上游集水面积累计方法	55
5.2.4	基于阈值和参数检测的河道识别以及河网建立方法	56
5.2.5	基于图形搜索算法的河道与边界要素矢量化方法	58
5.2.6	基于坡面栅格划分的地形参数统计方法	59
5.3	河流源头的识别方法	62
5.3.1	研究现状	62
5.3.2	基于地形统计的沟头识别方法	65
5.3.3	算法实例	74
5.3.4	分析与结论	78
5.4	河网提取中其他的技术细节	82
第6章	河网分层与编码	84
6.1	河网分层方法	84
6.1.1	基本概念与定义	84
6.1.2	分层过程中的四类河段合并操作	87
6.1.3	分层过程中的河段入汇情景分析	90
6.1.4	分层方法的实现过程	91
6.1.5	河段合并操作中的矢量要素更新与地形参数计算	93
6.2	河网金字塔	101
6.2.1	河段入汇的四种基本形式	101
6.2.2	河流结构的基本单元	102
6.2.3	河网结构的层次分解	105
6.2.4	河网结构的单元金字塔	107
6.3	河网分层实例	110
6.3.1	黄河皇甫川上游小流域的分层示例	111
6.3.2	长江全流域的分层示例	112

6.3.3 基于地图数据服务的分层方法对比测试	116
6.4 全球河网的编码体系	117
6.4.1 河网二叉树编码方法	118
6.4.2 河网金字塔编码方法	121
6.4.3 全球河网分区编码方法	123
6.5 本章小结	125
第7章 全球河网提取	127
7.1 数据与流程	127
7.2 DEM 数据准备与预处理	127
7.3 流域河网提取	129
7.4 全球河网数据后处理	130
第8章 基于 Horton-Strahler 级别的河网规律统计	132
8.1 代表性参数与样本集	132
8.2 Horton-Strahler 河流分支比	133
8.3 河流长度	138
8.4 流域面积	143
8.5 河道密度	147
8.6 河流落差	149
8.7 河流坡度	154
8.8 本章小结	158
第9章 基于自相似的河网结构规律统计	159
9.1 代表性参数	159
9.2 河段入汇形式的比例分布	160
9.3 基本单元的比例分布	161
9.4 基本单元几何结构参数的分布	171
9.5 本章小结	176
第10章 结论与展望	178
10.1 主要结论	178
10.2 研究展望	179
参考文献	180
附录 符号说明	190

第1章 绪 论

气候变化、社会经济发展以及人类活动的加剧,导致近些年来不同国家和地区的水资源短缺、洪水灾害以及生态退化等问题频繁发生。为了应对变化的环境,保护和改善退化的生态系统,缓解日趋严重的水资源短缺矛盾,需要气象—水文—生态系统的内在循环规律等诸多科学的支持,从水文和生态系统对全球变化和人类活动的响应规律等方面,揭示流域的气候变化、水文循环以及生态响应过程,应对流域的水资源短缺、洪水风险、环境污染等问题,为管理部门的应对决策提供科学依据。而随着水文和生态环境变化的加剧以及产生问题的根源与驱动因子逐渐复杂化,目前许多研究者逐渐从小流域、微观机理研究层面,转向对大尺度气象—水文—生态系统的一般性规律研究(Yalew et al., 2013; Wu et al., 2013; Wu et al., 2013a; Wang et al., 2013b; Wang et al., 2012; Grimaldi et al., 2012; Vivoni et al., 2011; Di et al., 2009)。流域内的河流系统是能量与物质的输移通道与载体,水文、水资源和生态系统的变化与河流水系的变化密不可分,而水文过程研究与模拟更是需要河流的基本属性的有效支撑(Moretti et al., 2008; Li et al., 2011)。因此,流域河流系统的基本信息一直都是气象—水文—生态系统研究的重要基础,使得流域河网的有效获取一直受到广大研究者的关注(Pelletier et al., 2013; Matsuura et al., 2012; Julian et al., 2012; Poggio et al., 2011; Hou et al., 2011; Passalacqua et al., 2010)。

分布于世界各地的众多河流,在陆地上伸展蜿蜒,最后进入大海,犹如“大地的血管”,不仅承载着全球的陆地水文循环过程,更带动着环境变化和生态演变过程。河流的基本形态、河网的结构特征以及相应的几何参数等直接影响流域的水文和生态过程(Wu et al., 2013; Grimaldi et al., 2013; Millares et al., 2012; Di et al., 2011; Gironás et al., 2009; Bhadra et al., 2008),同时河流的结构形态也受到地形地貌等诸多因素的影响。因此,探索河流结构特征与几何规律,建立河网结构的描述体系,认识其内在规律以及相应的外部驱动因素,长期以来受到研究人员的关注(Zanardo et al., 2013; Mantilla et al., 2010, 2012; Cudennec et al., 2007; Troutman, 2005)。目前对单个河网结构的研究已经取得诸多成果,但由于数据获取途径以及河网提取方法等诸多约束,河流结构一般性规律仍需要进行深入研究(Mantilla et al., 2010, 2012; Zhang et al., 2013; Stankiewicz et al., 2005; Schuller et al., 2001; Veitzer et al., 2000; Peckham et al., 1999; Peckham, 1995a, 1995b)。近些年来,空间信息技术和计算机技术的迅猛发展,为河流结构等基本规律的研究

提供了新的机遇。

数字河网可以提供流域地形参数和河流属性参数信息,不仅是流域分布式降雨径流模拟和非点源污染模拟的基本下垫面条件(Hung et al., 2007; Åkesson et al., 2012),同时也是河流结构规律研究和流域地貌分析必不可少的基础数据(Millares et al., 2012; Li et al., 2009)。数字河网一般从数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据中获得(Bai et al., 2015),其精度受到DEM数据分辨率的限制。最近几十年,随着遥感、全球定位、地理信息系统等3S技术的发展,现有DEM数据的精确度和分辨率不断增长(Wilson et al., 2012)。因此,从高分辨率DEM中获取高精度的完整河网,为支撑更深入的河流结构规律研究提供了先决条件。

利用更高分辨率的DEM数据,建立高效的河网提取方法,获取更高精度的全球范围内的大型流域河网,开展河流结构规律的研究,从拓扑结构和几何结构两方面描述河流的结构形态,辨识不同的结构特征,挖掘统一的结构规律,揭示自然界河流结构的内在本质,为流域地形地貌演变研究提供基础,具有重要的科学意义。

高精度河网以及具有拓扑结构一致性的不同级别和精度的河网,能够为流域水文过程模拟研究,特别是水文过程模拟的尺度效应研究提供大量的基础数据。完整的河网与基础属性数据也能为流域水资源管理、河道整治及生态修复提供重要的数据支持。另外,随着大数据时代的来临,以数字河网为平台载体,综合大量的气象、水文、水资源、生态、社会经济等数据,为管理部门、研究者以及公众提供具有拓扑结构相关的海量数据信息,具有重要的作用。因此,开展河网提取算法以及河流结构规律的研究也具有重要的实用价值。

1.1 研究对象

流域几何学的研究对象是作为流域基本骨架的河网。流域的河网不仅是流域形成过程的动态刻画,也是流域水沙物质平衡的链接和通道。流域河网的发育形成过程、现有河网呈现出的特性和将要演变的趋势,是大自然的鬼斧神工在水和沙之间的一种具体表现形式,和河网所在区域的地质、地貌、气候、降雨以及人为影响密不可分,相互影响,外界条件驱使和制约着河网,而河网通过对水沙的自适应调整来牵制外界条件。

流域几何学的研究任务有两方面。在理论研究上,对流域河网在拓扑和几何特性上的已有工作进行分门别类和归纳总结,并在其基础上进行完善、推进和创新,建立一套完善且先进的河网理论体系;在现象揭示方面,在现有相关技术支持下对流域河网的提取技术做出相应的提高和革新,并将应用范围扩大至全球流域。通过对全球河网结构变量进行统计分析,逐一揭示和显现全球河网的统计性质以

及在统计特性下隐藏的自然界本质规律,建立一套全球的、数字化的自然界真实河网数据体系。

1.2 河网特性

河网是自然界最大的树状分支系统,分布在全球各地的河网从几何形状上来说形状迥异,千姿百态,从拓扑结构方面来看,不管几何形状如何,河网都基本具有二叉树状拓扑结构。根据大量的统计结果,研究者把河网按照其几何形状分为不同的类别,主要类型为树枝状、平行状、格子状、矩形状、放射状、环状和羽毛状。而对于河网拓扑结构的研究,主要是以河网中河段的数目作为指标来衡量和研究的。在对河网的现象观测剖析、数据统计分析和理论研究过程中,发现河网所具有的普遍性质包括:随机性、自相似性和平面填充性。

1.2.1 随机性

河网的随机性是指河网在发育的过程中河道的生成以及它们之间的交汇所具有的随机性。但从总体上来看,以数量巨大的河网作为统计对象,其应该服从一定的统计规律,存在一种统计意义上的平均状态,这种平均状态便是河网在自然界最有可能和最常出现的结构组织状态。

根据河网的随机性,可对水系组成建立随机游走模式和有限布局随机水系模式(Shreve, 1966)。

在统计数学中,随机游走(random walks)是常用的提供“最可能状态”研究的数学模型之一。对在结构和岩性上都是均一的地区,通过随机游走方法模拟得到的假想水系,从统计意义上来说,其许多性质均是和天然水系十分接近的。针对各地的具体地质地理条件,适当地调整游走规则,能够使得最后得到的模拟结果更好地反映实际情况。例如,Shreve(1967)针对阿尔卑斯山坡度很陡的特点,让每个方格中地表水向前(下坡方向)流动的机遇为 0.5,而向左、右流动的机遇为 0.25,按照这个规则模拟得到的水系分布与 Rhone 河河谷的实际分布十分相似。

Shreve(1966)对河流数目规律所进行的工作,开辟了水系组成随机模式的道路。Shreve 认为在地质条件控制不很强的条件下,河网将随机分布。Shreve 提出的有限布局随机水系模式指出,当源点数目一定时,随机得到的布局上截然不同的河网组合的总数目是一定的,而其中出现机会最多的河网组合和实际河流的分支情况是一致的。Shreve 对源点数目小于或等于 100 的水系进行了有限布局随机水系模式的计算,其计算结果表明,在随机水系组合群中,分支比接近 4 的水系组合出现的次数最多。

水系组成的随机模式从理论上指出了流域与水系中的一些重要规律,为水系

形态规律的研究提供了一定的理论基础,极大地促进了水系从定性研究到定量研究的进程。但是,随机水系模式得到的结论与实测结果还存在着一定的偏差,需要进一步由自然界中真实水系的结果所证实。

1.2.2 自相似性

分形几何的概念是数学家 Mandelbrot 在 1975 年首先提出的,是针对“不规则的、分数的、支离破碎的”物体的一门学科。最早的工作可追溯到 1875 年,德国数学家 Weierstrass 构造了处处连续但处处不可微的病态函数,这个函数在任一点放大,得到的局部图形都和整体图形相似。集合论创始人德国数学家 Cantor 构造了具有自相似性质的三分康托集。1890 年,意大利数学家 Peano 构造了能够填充二维空间且连续但处处不可导的曲线。1904 年,瑞典数学家 von Koch 设计出类似雪花和岛屿边缘的一类曲线。1915 年,波兰数学家 Sierpinski 设计了像地毯和海绵一样的几何图形。这些都是与传统数学和欧几里得空间不相适应的奇异集合,但它们正是分形几何思想的源泉。1910 年,德国数学家 Hausdorff 开始了关于奇异集合性质与量的研究,并提出了分数维概念。1932 年, Pontryagin 等引入盒维数。

流域水系是典型的分形结构,即当尺度改变时水系河网结构具有不变的嵌套自相似结构。河流的自相似性直观表现为,根据分形规则从河流的主干开始迭代,可逐步生成包含细小分支的复杂河网,不同分形迭代规则将生成不同形态的河网,其统计表现为,不论处在什么样的气候、地质和地貌条件下,水系的特征参数在统计规律上大多呈现出显著的幂函数关系。

1.2.3 平面填充性

在欧几里得空间中,直线是一维的,平面是二维的,空间是三维的。在分形几何学中,分形物体的维数是表征分形物体占据空间的量度,可以是整数也可以是分数。Koch 曲线以其无限的长度围在有限的面积内,它所占的空间要大于一维而小于二维,所以它的维数应该是介于 1 和 2 之间。分形几何中最常采用的分形维数是 Hausdorff 维数、盒维数、信息维数、关联维数和相似维数等(张济忠,1995)。

河流是典型的分形结构,依据河流的自相似性,分形学方法可以非常有效地应用于河网。河网分形将水系作为整体,利用分维的基本定义求得分形维数,描述河流水系分形特征。水系的分形维数反映了水系所处流域的地貌发育情况,可对水系随时间演化过程进行评价和预测。维数越大,表明流域地貌发展阶段越高,流域内河网的发育程度越好。还可以基于 Horton 水系的几何规律,探讨河网参数之间或者水系参数的分形特征。河流的河长等形态特征具有明显的分形特征,分形维数可以作为表征流域形态特征的定量指标,反映流域形态的复杂性。雷会珠

(2001)依据黄土高原的小流域纸坊沟的自相似性,通过 Horton 定律推导河网分形维数,得到分形维数的值为 1.9,表明该流域接近平面填充,河网强烈发育。王秀春(2004)计算了泾河各个子流域的分形维数。伊利诺伊大学厄巴纳-尚佩恩分校 Poore 的博士学位论文 *River Network Scaling: Optimality and Anisotropy* (2010)中指出,当考虑河网的盒维数时,对于单条河流,在不考虑河宽时,其分形维数为 1;水系河网是平面填充的,分形维数为 2。

1.3 河网参数

通常所说的河网是指具有树状结构的平面二维几何图形。但是真正的河网应该不仅仅描述河流之间的汇流拓扑关系,其平面和垂向的几何特征也是影响流域水沙过程的重要参数。同时,平面的、垂向的、拓扑的特征之间,也存在相互影响制约的关系。

对于刻画河网的特征参数,分为河网拓扑参数和几何参数两类,分别具有拓扑学意义和河流或流域的物理意义。

1.3.1 河网拓扑参数

河网的拓扑结构是从拓扑学角度考虑的河网性质,主要是对河流的入汇流关系的表征。对于自然界的河网,其拓扑结构一般为二叉树结构,即每一个内部结点最多有两个子结点,对本书讨论的河网而言,所有的河流都被认为是两两相交入汇。

对河网按照其入汇流关系进行分级归类,这种做法是最基础的河网拓扑结构的研究方法。根据从源头的上游河流开始不断汇入下游主干河流的河流发展规则,Gravelius(1914)、Horton(1945)以及 Strahler(1952)分别明确地给出了且不断改进河流级别数的定义和河网分级方法的规则,奠定了河网拓扑结构研究的框架和基础。

在河网分级方法的基础上统计可以得到不同级别的河流的数目,这种不同级别的入汇流的河流数目是河网拓扑结构的基本参数。Horton 最早经过数据统计指出河流数目统计上满足指数分布规律,除此之外,对不同级别河流的平均长度以及不同级别流域的平均流域面积都给出了统计意义上的指数分布规律,这种指数分布规律是尺度不变性的一种体现。此后的研究都是在河流数目、长度和流域面积的统计指数分布规律基础上进行的。

Tokunaga(1966)在 Horton 和 Strahler 分级原则的基础上给出了二元的河流入汇流拓扑关系描述,并且给出了不同汇入级别的河段数目之间的定量关系,但是并未将这种定量关系和河网的自相似性联系起来。直到 Mandelbrot(1975)提出自然界的分形特性理论,对河网拓扑结构的研究逐渐转化到以分形为研究手段,

Peckhama(1995)将自相似和 Tokunaga 的二元定量关系结合起来,将河流数目作为考核自相似特征的一个量化标准。很多学者依据河网的自相似性对河网进行模拟和生成,并将生成的河网应用于河网演化和流域水文模拟。

Shreve 和 Smart(1966)将河段定义为“链”。链有内链和外链之分,最小级别的河流即源头(即一级河流)被定义为外链。Shreve(1966)提出的有限布局随机水系模式开辟了对水系组成用随机模式研究的道路。他认为在不考虑地质条件的影响下,河网在布局上是随机的,且当源点的数目一定时,可能出现的布局截然不同的河网的数目也是有限的。

Rodriguez-Iturbe 和 Rinaldo(1997)依据河网的分形理论提出了最优河网(optimal channel networks, OCN),揭示了河网的自相似拓扑性质与河流动力学之间的相互关系,从河网的自组织结构和最小能量消耗等限制条件出发研究流域河网的适应性演化和发展,将数值模拟和基本数学运算相结合来揭示大自然中这一最普遍现象的内在机制和秘密。但是对于河流最优性的必要性和是否存在物理机制是有争议的,所以用能量消耗这一单一因子作为标准的最优化理论,仍有待深入研究和验证。

Dodds(2005)详细分析了在一定尺度下河网结构统计参数的特性,揭示了自然界中真实河流的结构参数的偏差,讨论了其符合理论规律的尺度问题。Poore(2010)提出了一个新的河网模型,针对河网的最优性和动力学特性做了新的评价和认识。

对于具有二叉树结构的河网来说,因为其与坡面对应,所以其必然是接近平面填充的。而对满足拓扑结构特性的网络,如果只简单地给定长度和面积关系,就会导致生成的河网只满足拓扑性质而不具有任何物理意义。Kirchner(1993)认为,对于具有二叉树拓扑结构的网络, Horton 规律是不可避免的统计规则,因此 Horton 规律无法体现河网的结构和根源。

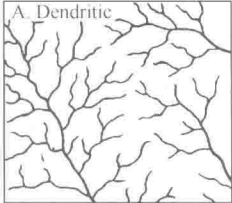
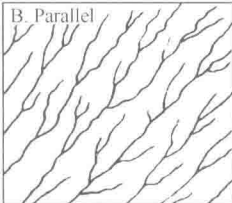
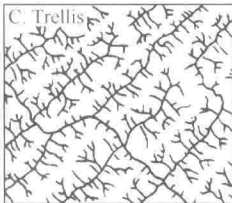
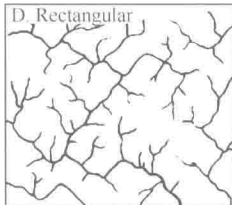
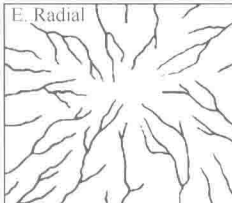
Paik 和 Kumar(2007)指出,结构确定的、结构随机的二叉树以及部分确定部分随机的二叉树全部都是自相似的,其描述拓扑规模的河流数目均满足指数分布规律。指数分布对于自然河流的拓扑结构是不可避免的分布规律,只是分布的标度指数值表征了不同河流具有不同的随机性。虽然拓扑量服从指数分布,但是仍然不能解释物理量河流长度和流域面积为什么服从指数分布。

1.3.2 河网几何参数

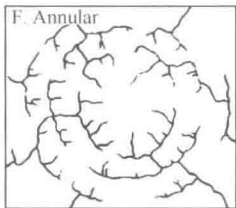
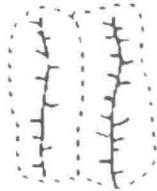
水系河网的平面形态(drainage pattern, 即平面几何形状),按照传统意义和直观视觉上的定性主要可以分为:树枝状(dendritic)、平行状(parallel)、格子状(trellis)、矩形状(rectangular)、放射状(radial)、环形状(annular)、羽毛状(feather-like/pinnate)(Howard, 1967; 钱宁等, 1987; Poore et al., 2010; Zhang et al., 2013)等 7

种类型(表 1-1)。

表 1-1 水系形态分类

水系形态	示意图	描述
树枝状		树枝状是一种最常见的水系形态,支流与干流以锐角相交,多出现在坡度较缓的、岩性较一致的地区。平原地区的河系常属于此种类型
平行状		多出现在具有较大坡度的平行狭长的黄土或者沙质地貌处,是介于树枝状和格子状之间的一种形态。在平行褶皱或断层地区河流多呈平行排列,如中国横断山区的河流和淮河左岸支流
格子状		支流和主流直角相交成格子,多发育在断层地带,常见于褶皱山区、单斜山区或两组节理直交的结晶岩区,如主流发育在向斜轴部,支流顺向斜两翼发育的水系。福建省受丘陵地形影响,属于格子状水系
矩形状		支流和主流以直角相交成格子,河流和分水岭缺乏区域连续性,不像格子状水系那样具有有序和密布,较稀疏
放射状		河流由中央高地向四周低地流出,多分布于火山口周围。中国海南岛地形中间高周围低,属于放射状水系

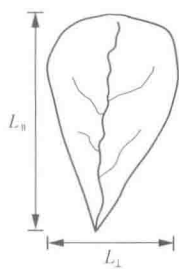
续表

水系形态	示意图	描述
环形状		往往分布在盆地中,河流由四周山岭或高地向中心低洼地汇集,如中国新疆的塔里木水系
羽毛状		干流两侧支流分布较均匀,近似羽毛状排列的水系。汇流时间长,暴雨过后洪水过程缓慢。如中国西南纵谷地区,干流粗壮,支流短小且对称分布于两侧,是羽状水系的典型代表

注: 左列图引用自文献(Poore et al., 2010), 右列图引用自文献(Ritter, 2006)

对于水系几何形态的定量刻画,在传统意义上有如表 1-2 所示的几何参数(钱宁等,1987;倪晋仁,1998;Singh,2000)。

表 1-2 水系几何参数

流域形态几何参数			
参数	符号	计算方法	单位/描述
流域面积 catchment area	A	流域分水岭所包围的面积	m^2
流域特征长度 longitudinal length of a basin	$L_{\parallel}$		m
流域特征宽度 transverse width of a basin	$L_{\perp}$		m $L_{\parallel} \cdot L_{\perp} \neq A$
流域周长	L_p	在水平投影图上沿流域边界或给定级别流域分水岭量得的长度	m

续表

流域形态几何参数			
参数	符号	计算方法	单位/描述
流域高差	ΔH	流域内最高点高程与流域出口高程之差	m
流域形状	形状系数 (Horton, 1932)	$R_f = L_{\perp} / L_{\parallel}$	
	圆度比 (Miller, 1953)	$R_c = A / A_{L_p}$, A_{L_p} 是指周长等于该流域周长 L_p 的圆的面积	$R_c \rightarrow 1$, 流域接近圆
	伸长比 (Schumm, 1956)	$R_e = D_A / L_{\parallel}$, D_A 是指与流域面积 A 相等的圆的直径	
	双纽线比 (Chorley, 1957)	用双纽线比来对比流域形状与双纽线形状	
	形状因数 (Wu, 1964)	$R_s = L_{\parallel} / D_A$	
	单位形状因数 (Smart 和 Surkan, 1967)	$R_u = L_{\parallel} / \sqrt{A}$	
河流几何参数			
河流级别 (Horton, 1932)	ω	Horton-Strahler 级别数 (Horton, 1945; Strahler, 1966)	
干流长度	l	主干河流由源头至流域出口的长度	m
河道比降	J	河道落差与其长度之比	以千分率表示
河网密度 drainage density	$D_{L/A}$	$D_{L/A} = \sum L / A$ $\sum L$ 是流域内所有河流的长度的总和	m^{-1} 河网密度即单位面积上河流总长度
河流频度	F	$F = N / A$, N 为流域内干支流河流的总数	m^{-2}
宽度函数 width function (Kirkby, 1979)	$W(x)$	到流域出口距离为 x 个河段的河段个数	

如图 1-1 所示,与河网的尺度变化(scaling)密切相关的几何参数:流域面积 A ,干流长度 l ,流域特征长度 $L_{\parallel}$,流域特征宽度 $L_{\perp}$,随尺度变化满足

$$L_{\perp} \propto L_{\parallel}^H, \quad 0 \leq H \leq 1$$