

# 基于流域信息树 的数字地形分析与应用

©陈永刚 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

# 基于流域信息树的数字 地形分析与应用

陈永刚 著

 ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS  
浙江大学出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

基于流域信息树的数字地形分析与应用 / 陈永刚著.

— 杭州 : 浙江大学出版社, 2015. 10

ISBN 978-7-308-14901-3

I. ①基… II. ①陈… III. ①数字地形模型—形态分析 IV. ①P287

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第165227号

图审字 (2015) 第2664号

## 基于流域信息树的数字地形分析与应用

陈永刚 著

---

责任编辑 伍秀芳 (wxftw@zju.edu.cn)

责任校对 陈慧慧 丁佳雯

封面设计 林智广告

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路148号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州林智广告有限公司

印 刷 杭州日报报业集团盛元印务有限公司

开 本 710mm×1000mm 1/16

彩 插 4

印 张 11

字 数 206千

版 印 次 2015年10月第1版 2015年10月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-14901-3

定 价 48.00元

---

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: 0571-88925591; <http://zjdxcs.tmall.com>

# 前 言

数字高程模型(Digital Elevation Model,简称DEM)被首次提出以来,受到科学界与工程界的广泛关注。特别是近年来,随着数字地球、数字城市等概念和技术的兴起,DEM作为国家空间数据的基础产品之一,已经在不同领域完全取代了传统等高线对地形的描述。高质量、高精度、多种类的DEM产品在国民经济发展中发挥着越来越重要的作用。

DEM作为对地表高低起伏形态的数字化表达,蕴含着丰富的地形结构和特征信息,它是定量描述地形地貌结构的基础数据。由于DEM数据是对地表高程的离散化表达,前人忽视了地理信息的整体性和对象性,因此,在利用DEM进行地形分析时,需要提出一种新的基于数字高程信息的分析方法。本书以数字地形分析理论和方法为基础,提出了基于流域信息树的分析模型,对流域地貌展开研究。

流域地貌是陆地上普遍存在的地貌类型,除了极地和雪线以上地区,陆地上所有地区几乎都存在流水作用,地表流水侵蚀作用又是以不同形式及不同级别的流域为单元进行的,因此,以嵌套的流域为切入点进行分析研究具有重要的意义。虽然前人已对流域地貌系统展开过大量的研究,但是现有的研究方法忽略了流域系统的嵌套结构特征与不同尺度流域对象间的纵向关联信息。传统单一信息层面的研究方法,难以整体、宏观地把握流域的层次结构和揭示流域地貌系统的本质特征,未能实现流域地貌系统整体与局部分析的有效结合。本书以数字地形分析理论和方法为基础,首次提出并构建了流域信息树模型以及流域信息树量化指标体系,并以黄土高原小流域为研究对象,深入研究了流域地貌系统层次结构的自相似性、多尺度特征、黄土地貌类型分区、流域信息树形态结构演化趋势、地形简化和地形特征线等级划分等方面的内容。

本书共分为8章。第1章为绪论,介绍了流域信息树的研究意义、目标、内容、方法和技术路线;第2章总结前人研究成果,并指出已有研究中的不足;第3章介绍了研究样区与实验数据状况,以及数据的预处理;第4章为流域信息树的构建和量化表达;第5~7章是流域信息树理论在流域地貌中的实际应用;第8章为全

书的总结和展望。

本书的创新点主要包括：首次明确提出了流域信息树的概念、模型和指标体系；在分析方法上，提出流域信息树的形态结构量化指标，为流域的定量化分析奠定基础，并深入研究了流域结构自相似、多尺度流域形状和黄土地貌类型划分等内容；在地形简化应用上，提出了一种新的树剪枝八方向射线剖面简化等法(W8D法)；在地形特征线提取上，提出了一种基于流域信息树的多属性组合方法，进行了山脊线的等级划分。

本书在写作过程中力求内容精练，全面系统，方法实用，并注重地貌学的定量研究以及理论与实践的密切结合，同时反映流域信息树的最新研究成果，适合广大专业学者阅读，为地学研究人员提供理论依据和技术参考。

在书稿即将完成之际，笔者感触颇深：本书的研究虽然只是一个开始，但笔者相信可以为今后的研究奠定一个较好的基础。希望通过本书的出版，使更多的专家、同行和学者关注该领域的研究，进一步推动中国基础地理信息的研究和应用。此外，笔者在撰写过程中发现该领域中尚存在诸多理论问题值得进一步深入地探讨和研究。例如，流域信息树对特殊地貌形态的表达还未实现；在基于DEM的流域信息树的构建和信息结点流域的提取中，如何有效消除来自高程数据采样精度、地形描述精度以及DEM分辨率等多重不确定因素的影响还需要更深入的探讨；在流域嵌套分形自相似研究等方面的诸多问题还需要继续研究。这些问题的解决不但能够拓宽流域信息树在数字地形分析中的应用领域，还将为其他相关学科的研究提供可以借鉴的理论和方法。最后，当今科技的发展突飞猛进，日新月异，本书虽尽可能力求全面，紧跟时代步伐，但深知该领域理论深奥、应用广泛，笔者才疏学浅，难免有遗漏及不足之处，恳请读者见谅并不吝赐教。

陈永刚

2015年5月

# 致 谢

在书稿完成之际,我要向所有支持、关心、帮助过我的人们表示最诚挚的谢意!

本书的研究工作和出版得到了以下基金的资助:

①国家自然科学基金重点资助项目(40930531):基于DEM的黄土高原地貌形态空间格局研究。

②国家自然科学基金青年基金(41201408):基于DEM的流域信息树研究——以黄土高原小流域为例。

③浙江省公益技术应用研究项目(2014C32119):面向“智慧林业”的浙江省生态公益林移动互联网信息共享关键技术研究。

衷心感谢汤国安教授对我的谆谆教导。本文稿是在汤老师的悉心指导和殷切关怀下完成的,尤其是在文稿的撰写过程中,他倾注了大量的心血,给予了我许多珍贵的教诲和指导。汤老师严谨细致、求真探索的治学态度,认真勤奋、不断创新的工作作风,以及对科研事业永远的热情与执着追求都将使我终生难忘。

感谢GIS重点实验室提供了优越的科研设备和良好的学习氛围;在文稿开题期间得到闫老师高屋建瓴般的指点,使我深受裨益。重点实验室的盛业华教授、韦玉春教授、刘学军教授、朱长青教授、龙毅教授等为本文稿提出了宝贵建议并给予了无私帮助,在此向他们致以最诚挚的感谢!

感谢课题组各位老师和师兄弟在学习和生活上的无私帮助和热心关照,杨昕老师、李发源老师、朱红春老师、罗明良老师、晏实江博士、祝士杰博士、田剑博士、江岭博士、胡最博士等的支持和帮助,消除了我很多的困惑,指出了文稿中很多谬误的地方,让我少走了很多弯路。

感谢浙江农林大学环境与资源学院为我完成学业所提供的经费支持和工作便利,同时感谢浙江农林大学杨春菊、孙燕飞、马天午、陈孝银、陈振德、林晨鹭、单立刚等同学在数据处理、资料整理以及算法具体实现上作出的辛勤劳动!

还要特别感谢我的父母、岳父母对我的学习和生活的关怀和鼓励,感谢我的妻子胡芸和儿子陈柏衡(蒙蒙)对我默默的理解和支持,本书也凝结了你们的力量和温暖!

陈永刚

2015年5月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 问题的提出 .....	1
1.2 研究意义 .....	3
1.3 研究目标与内容 .....	4
1.4 研究方法与技术路线 .....	5
1.5 本书结构 .....	5
第 2 章 研究综述 .....	9
2.1 流域地貌与地貌类型区划分 .....	9
2.2 DEM 数字地形分析 .....	13
2.3 树形结构分析 .....	17
2.4 讨 论 .....	19
第 3 章 研究基础 .....	21
3.1 实验样区 .....	21
3.2 实验数据 .....	25
3.3 数据预处理 .....	26
第 4 章 流域信息树的构建与量化表达 .....	27
4.1 流域信息树概念 .....	27
4.2 流域信息树构建 .....	30
4.3 流域信息树量化指标体系 .....	37
4.4 小 结 .....	54



<b>第 5 章 基于流域信息树的黄土流域地貌形态特征研究</b> .....	55
5.1 流域结构自相似分析 .....	55
5.2 基于信息结点的流域形状研究 .....	63
5.3 基于流域信息树的黄土地貌类型分区 .....	70
5.4 流域树形态结构演化趋势分析 .....	106
5.5 小 结 .....	109
<b>第 6 章 基于流域信息树的地形简化研究</b> .....	111
6.1 DEM 地形简化常用方法概述 .....	111
6.2 流域信息树 W8D 算法原理 .....	113
6.3 基于流域信息树 W8D 算法的地形简化结果 .....	120
6.4 地形简化效果分析与评价 .....	123
6.5 小 结 .....	131
<b>第 7 章 基于流域信息树的地形特征线等级划分研究</b> .....	133
7.1 地形特征线理论概述 .....	133
7.2 结构线等级划分原理与方法 .....	134
7.3 结果与分析 .....	137
7.4 小 结 .....	142
<b>第 8 章 结论与展望</b> .....	143
8.1 结论与创新 .....	143
8.2 问题与展望 .....	145
<b>参考文献</b> .....	147
<b>索 引</b> .....	167

# 第1章 绪论

## 1.1 问题的提出

地表流水侵蚀是陆地表面地形地貌塑造过程中最普遍的营力作用,除了极地和雪线以上地区,陆地上所有地区几乎都存在流水侵蚀作用(承继成等,1986),其流水地貌被著名地貌学家W.M. Davis称为常态地貌(Davis, 1899)。同时,地表流水侵蚀作用又是以不同形式及不同级别的流域为单元进行的。因此,以流域地貌为切入点的研究,对流域地貌特征分析具有重要意义。

流域地貌是在现代构造运动基础上,地表物质与降雨、径流长期相互作用的结果。在流域地貌发育演化中,内营力因素受构造运动和海平面升降运动的控制(陆中臣等,1991),它通过改变流域侵蚀基准体系,决定流域总体侵蚀势能与发展趋势;外营力因素的作用及强度受制于当地的气候条件和能量流的速度。在流域地貌的演变过程中,物质流和能量流以及表征流域物质和能量流动状况的变化处于动态平衡。把流域作为一个系统,研究其中各要素相互联系和作用的关系、能量的输入及耗散、物质的输移及地貌演化的整体过程时,该系统称为流域地貌系统(陆中臣,1991)。

黄土地貌是黄土高原地区经过200余万年的黄土堆积和搬运,在风力和水力的作用下,在下伏古地貌基岩上,形成了类型复杂多样且在空间上有序分异的地貌形态组合,被称为最具地学研究价值的地理区域之一。作为最典型的流水侵蚀地貌区域,黄土高原的黄土地貌可以分解为一系列具有严格等级构成和关联组合的子流域,在结构上具有非常强烈的自组织特征,其形成、演化过程中发生着旺盛的物质与能量交换。其中,黄土小流域是黄土流域地貌研究及流域规划应用的重点。小流域作为黄土地貌发育的基本自然单元,其基本形态与空间组织特征在相当程度上映射着黄土流域地貌发育的机理与过程。鉴于黄土小流域地貌特征的典型性与独特性,从系统论的视角对其基本特征进行信息挖掘和知识发现,有望

成为黄土地貌研究新的切入点,对于揭示黄土地貌形成与发育机理和黄土地貌演化规律,指导黄土高原生态修复与区域可持续发展,都具有重要的理论意义与应用前景。

对流域地貌系统结构的深入剖析与定量刻画是研究的核心环节,以Horton(1945)和Strahler(1952)为代表的众多地貌学家开创了流域定量描述的先河。如Horton(1945)、Schumm(1956)和Shimano(1992)等对沟谷级别与沟谷分支数目、沟道长度、沟道比降等流域形态指标的关系进行了研究。承继成等(1986)对流域定量描述指标体系及其要素之间的定量关系等作了较为系统的总结和凝练。此外,基于DEM的流域量化研究亦取得了长足的发展,如完善了流域自动提取算法(刘建军,2004;宋敦江等,2011;张琳琳等,2005)、流域正负地形分析(周毅,2011)、流域边界剖面谱分析(贾旖旎,2010)、流域三线合一分析(张维,2011)、流域高程面积积分分析(祝士杰等,2013)等研究,并通过综合流域的成因和形态研究,形成了流域特征线的提取和基于DEM流域分割的一整套技术方法(郭明武等,2006;闫国年等,1998a)。同时,这些研究也显示了DEM数字地形分析方法在流域地貌研究中的优势与前景。然而,这种分析由于现实原因和尺度问题,在具体分析的时候仍然采用规则正方形栅格的窗口分析方法和单对象的分析模式。这些分析仅仅从微观规则“窗口”着手,从局部分析范围中计算地形参数或提取地貌对象,没有考虑现实的地理单元,在一个指标或者某个地貌对象展开中,少有关注流域内部各地貌对象的组合结构与特征,未能实现流域地貌系统整体与局部的有效结合;同时,对流域地貌系统的形态空间模式和结构的有效认知是流域地貌系统研究中的重要工作。现有的研究方法较少关注流域地貌系统中各个尺度流域间的空间嵌套模式所包含的结构信息以及各尺度嵌套流域间的关联信息,阻碍了研究的进一步深入和发展。

上述问题的存在,导致利用数字地形分析方法研究流域基本形态特征时遇到较大的瓶颈,同时也为我们的研究提出了一个问题,即如何用整体宏观和局部微观相结合的方法,从多种角度和尺度去深入分析流域地貌系统?这个问题的有效解决,将有可能进一步推动流域地貌及数字地形分析的理论方法的发展。

树形结构是一种在客观世界中广泛应用的抽象表达和理论模型。它是一种重要的按元素彼此间相互关系组织起来的非线性数据结构,可表示从属、层次、包含等关系,是离散数学中“图”的一种特殊情况。树形结构在社会科学和自然科学中有着广泛应用,如人类社会的族谱、社会组织机构都可用树来形象表示;生物学中,进化树用来表示物种之间的进化关系(李斌等,2006;马志杰等,2007;阎锡海等,2005);在地理研究中,等高线树用来反映等高线之间的拓扑关系以及用于

空间关系判定(乔朝飞等, 2005; 吴凡等, 2006)和地形推理(乔朝飞, 2005; 赵东保等, 2009)等; 在城市研究中, 演化树用来揭示城市群的演化规律和变异(Wang et al., 2012)。从整体上看, 流域地貌系统是一个具有自相似、自组织特征的结构体, 一个流域可以包含若干子流域, 同时它本身又是更高级别流域中的一部分。顶层流域可以看作是树的根结点, 顶层流域所包含的多个子流域可以看作是根结点下面的子结点, 而每个子流域又包含子流域, 如此反复。这种嵌套式层次特性与“树”形结构非常相似。基于以上的分析和思考, 作者提出流域信息树的概念模型及其研究思路: 在流域体系中, 按照空间包含关系, 由不同尺度的流域构建而成“树”形层次组合, 且在树的结点上融入各对应流域的多种流域信息指标, 即流域信息树。流域信息树具有明确的物理及地貌学意义, 基于流域信息树的流域地貌研究, 可望揭示流域地貌的本质与内涵特征。它既是对流域形态结构起重要控制作用的核心构架, 是流域结构的“骨骼”, 又是流域相关指标有序组织的“信息容器”。本研究重点从流域信息树概念模型的建立、形态结构参数与分析方法的确定、地貌分析和地形综合应用等几个关键问题进行探索性研究, 期望在黄土流域地貌研究及DEM数字地形分析理论与方法上取得创新性成果。

## 1.2 研究意义

基于DEM的流域信息树的研究意义在于:

(1) 针对传统流域地貌系统研究着眼点基本是以某一尺度流域的某些特征点、线、面和流域的某些关键指标进行的, 本研究将从单一尺度的流域面扩展到流域信息树, 在整体上分析流域地貌的基本特征, 在宏观框架中审视多个尺度流域内地貌的多个侧面的组合特征, 揭示不同尺度嵌套流域间的相互关系。本研究是实现嵌套流域地貌特征要素联合分析的有力工具, 是利用GIS(地理信息系统)解决地学科学问题的一次有益探索。

(2) 流域信息树具有明确的地貌学含义与物理意义, 以层次“树”状结构视角研究流域地貌系统, 对明确其组织与结构特征以及把握流域地貌系统的非线性复杂结构具有重要的理论意义与应用价值。通过流域信息树来揭示黄土高原流域地貌的嵌套结构特征, 既是流域地貌研究的一个重要切入点, 也是对数字地形分析理论与方法的丰富和完善。

## 1.3 研究目标与内容

### 1.3.1 研究目标

本研究以全新的视角提出了流域信息树的概念,分别从流域信息树的定义、性质、特征、量化指标描述、构建、地貌分析、地形综合等多种角度对流域信息树展开研究,实现流域信息树理论和分析方法在流域地貌研究中的拓展应用,丰富DEM数字地形分析的理论与方法。

### 1.3.2 研究内容

研究内容如下:

#### 1)流域信息树概念模型与量化指标体系研究

- 研究流域信息树的定义、基本属性、表现形式及其影响因素,建立流域信息树的概念模型;

- 分析流域信息树的层次结构及其地学含义,建立有效描述流域信息树的多侧面定量指标体系;

- 研究流域信息树的构建及描述其形态特征的指标的计算方法,建立基于流域信息树模型的流域地貌系统信息量化指标体系。

#### 2)基于流域信息树模型的黄土流域地貌系统分析研究

- 基于流域信息树理论,研究了黄土高原地区流域层次结构的分形自相似特征;

- 提出了流域信息树按流域面积权重“遍历”信息链的序列化分析方法,引入多种手段和分析方法,研究了不同地区、不同尺度流域形状之间的关系;

- 以流域信息树为基础理论,以流域信息树的形态结构指数为参数,对流域信息树进行黄土地貌类型区划分的相关理论和方法进行了深入的研究和分析;

- 结合流域信息树理论,通过流域信息树的形态结构指标,分析了流域的形态结构演化趋势。

#### 3)基于流域信息树的地形简化应用研究

- 研究以流域信息树为基本理论支撑的地形综合方法。通过对目前常用DEM地形综合方法分析总结的基础上,提出了基于流域信息树剪枝理论的W8D地形简化算法,并对W8D法地形简化效果进行了纵向对比和综合评价,建立了以流域信息树理论为基础的,自解释、自适应地考虑不同空间尺度的DEM地形综合

方法。

#### 4) 基于流域信息树的地形特征线等级划分研究

●以流域信息树理论为基础,提出了一种基于树形结构的地形骨架线——山脊线的等级划分方法。首先,通过树形结构模型对流域特征信息进行多属性指标分析;然后,对山脊线等级进行分类并定级;最后,对划分结果进行分析与对比,验证山脊线等级划分结果的合理性。

## 1.4 研究方法与技术路线

### 1.4.1 研究方法

以流域地貌学、水文学、数理统计等为理论基础,运用GIS空间分析、数字地形分析等技术方法,采用定性与定量分析指标相结合、宏观与微观分析相结合、理论分析与应用验证相结合的研究手段,以多种尺度和比例尺DEM数据作为基本数据源,运用流域信息树对流域地貌系统展开探索性研究。

### 1.4.2 技术路线

本研究首先根据流域的嵌套层次结构,提出流域信息树的概念模型;其次,阐述了流域信息树的构建过程与量化指标体系,深入分析了流域信息树的量化指标体系与传统指标间的相互关系;最后,以流域信息树理论为基础,从黄土流域地貌分析和地形简化两方面展开了流域信息树的应用研究。整个技术路线如图1.1所示。

## 1.5 本书结构

本书共计8章,各章主要内容与研究工作如下:

### ●第1章 绪论

本章重点阐述了开展流域信息树研究的重要性和现实意义,论证了流域信息树作为流域地貌研究切入点的可行性,明确了研究的选题背景。在此基础上提出了本研究的研究目标、内容、方法和技术路线。

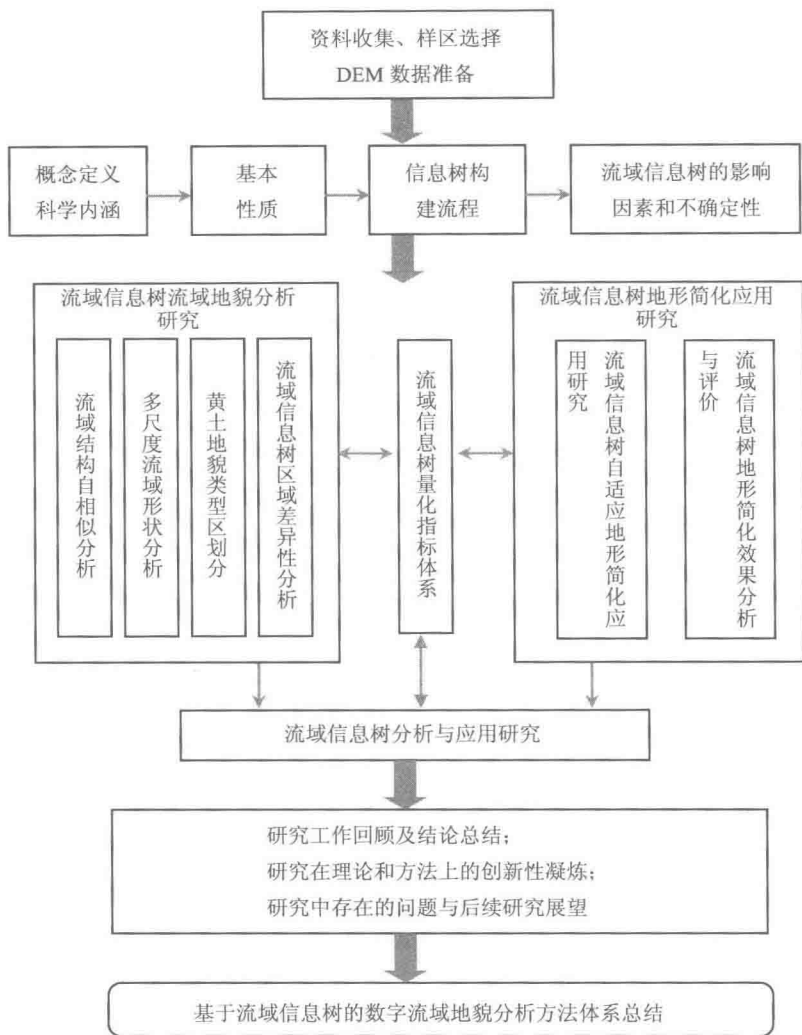


图 1.1 研究技术路线图

● 第 2 章 研究综述

回顾了前人在流域地貌、树形结构研究以及数字地形分析研究领域的相关现状及成果,总结了流域地貌研究所存在的问题以及利用流域信息树进行黄土高原地区流域地貌研究的可行性与必要性。

● 第 3 章 研究基础

介绍研究区域的基本自然地理情况、实验样区选择的依据及实验样区的分布;表述选择基础实验数据的理由,介绍实验数据的预处理方法。

#### ●第4章 流域信息树的构建与量化表达

讨论了流域、流域信息树、信息结点等内容,并在此基础上重点对流域信息树的概念模型、特征与性质、定量描述指标、构建、影响因素和数据的尺度效应等内容进行了论述和展开。

#### ●第5章 基于流域信息树的黄土流域地貌形态特征研究

首先,以流域信息树理论为基础,利用分形理论对流域结构的自相似特征进行了研究;其次,以流域信息树结点的属性信息为基础,研究了流域形状与尺度间的关系;最后,研究了利用流域信息树进行黄土地貌类型区划分的相关内容。

#### ●第6章 基于流域信息树的地形简化研究

从流域信息树DEM数据综合的具体现实应用问题展开探讨和研究。以流域信息树理论为基础,首先研究了DEM地形简化常用的算法;其次,提出了流域信息树剪枝八方向射线剖面简化算法;最后,对流域信息树自适应地形简化展开了具体的应用并进行了地形简化效果分析与评价。

#### ●第7章 基于流域信息树的地形特征线等级划分研究

以流域信息树理论为基础,提出了一种基于树形结构的地形骨架线——山脊线的等级划分方法。首先,通过树形结构模型对流域特征信息进行多属性指标分析;然后,对山脊线等级进行分类并定级;最后,对划分结果进行分析与对比,验证山脊线等级划分结果的合理性。

#### ●第8章 结论与展望

总结和评价了本书所提出的理论、方法和实验结果,并在此基础上提出本研究需要进一步完善和提高的地方,探讨流域信息树的下一步研究方向。



