

喀斯特流域 水文地貌系统

杨明德 等著



地质出版社

喀斯特流域 水文地貌系统

李 博 著



喀斯特流域水文地貌系统

杨明德 谭 明 梁 虹 著

国家自然科学基金资助项目

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

457971

内 容 简 介

本书运用系统论的思想方法及耗散结构理论,把喀斯特水文与地貌当作一个相互作用的耦合系统,并从基面-径流-形态系统过程响应原理入手,深入研究了喀斯特流域特性、类型,喀斯特流域溶蚀过程的时空尺度差异,喀斯特流域系统地貌发育规律、演化模式和系统演化数学模型,以及喀斯特流域产流、汇流机理。探索了利用地貌响应参数识别水文过程及进行水文预报的地貌学方法。

全书内容丰富,理论和方法多有创新,是一部开创喀斯特水文地貌学边缘学科的新著,可供地质、地理、岩溶、地貌、水文水利、国土整治等科技工作者和研究人员,以及大专院校有关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

喀斯特流域水文地貌系统/杨明德等著.-北京:地质出版社,1998.12
ISBN 7-116-02743-2

I. 喀… II. 杨… III. ①喀斯特地区-水文地理学②岩溶地貌
IV. P931.5

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第00400号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路29号)

责任编辑:蔡卫东

责任校对:李 玫

*

北京印刷学院实习厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:850×1168^{1/32} 印张:5 图版:1页 字数:128000

1998年12月北京第一版·1998年12月北京第一次印刷

印数:1—500册 定价:18.00元

ISBN 7-116-02743-2
P·1972

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

地貌学从 W. M. Davis 创立“地理循环”(1899)和 W. Penck 建立“地貌分析”(1924)的地貌发育理论以来,虽经 20 世纪 40 年代 R. E. Horton 发现了流水地貌基本定律和 50 至 60 年代 A. N. Strahler 及 A. E. Scheidegger 运用数理分析的方法量化地貌发育模式(1952、1957、1967)以及在 60 年代地理学“数量革命”的基础上,数理分析地貌过程的加强和 70 年代以来系统论思想及其基本原理迅速向地貌学领域的渗透和发展,出现了以 S. A. Schumm 和 R. J. Chorley 等为代表的系统地貌学思想(1971、1973、1984),从地貌发育演化的物质能量和水流与形态相互关系的观点出发,提出了与传统的地貌循环理论相悖的非演化观点的动力平衡,地貌阈和地貌熵以及地貌发育的过程—响应系统和地貌的数学模型的表达,从而极大地推动了地貌理论和数量分析的发展。

但是,喀斯特地貌学自 20 世纪初由 A. Grund 及 J. Cvijic 运用 Davis 理论建立了喀斯特地貌循环理论以来,除了在溶蚀作用过程和机理的研究上有重大进展,与溶蚀作用相联系的气候地貌学和洞穴学有明显的发展外,在喀斯特地貌发育理论,特别是定量分析描述喀斯特地貌发育的新思想新方法仍然很少,喀斯特地貌发育理论远远落后于流水地貌的研究水平,80 年代末, W. White 的《石灰岩地区的地貌学和水文学》(1988)和 D. C. Ford 及 W. P. Williams 合著的《喀斯特水文学与地貌学》(1989),总结了过去喀斯特研究的重要成果,算是给喀斯特水文与地貌画了一个完美的句号,但是仍未见到把地貌与水文有机地结合在一起进行喀斯特流域地貌的系统定量研究。

在常态流水地貌区,由于建立了 Horton 定律,水文学家于 70

年代从中推导了瞬时地貌单位线,用以解决无实测资料流域水文计算,但是这一方法,在喀斯特区由于对流域的基面—径流—形态系统过程响应,尚未作出定量描述前,其是否实用还难以肯定。鉴于常态流水作用区,流域的线状水道结构满足 Horton 定律,但在强溶蚀动力主导作用下,具有二元结构的喀斯特流域,会因地表流水作用的不断转入地下,因而原来满足 Horton 定律的线状水网不断退化,结构将变得难以运用数学识别和计算,出现的这种特殊流域,我们称之为“喀斯特流域”。在喀斯特流域中,受基面控制的形态发育和相应水流运动关系是否可量化和如何量化是一个关键问题。我们希望从流域既是一个独立的地貌单元,又是具有分水岭边界的物质、能量交换的天然开放系统的概念出发,建立流域地貌结构演化数学模型,以演绎和揭示地貌发育基本规律和水文变化的机制过程的可能性,并从地貌水文效应的映射信息上,寻求预测水文过程的地貌学方法。

基于这样的认识,我们申报了国家自然科学基金“喀斯特流域地貌水文系统数学模型研究”课题,并把研究内容主要集中在下列 4 个方面:

(1) 对喀斯特流域基本特性进行室内、野外实验相结合的实质性分析。

(2) 通过基面—径流—形态系统响应以揭示喀斯特流域地貌发育的规律、演化模式,并建立相应的数学模型。

(3) 以流域地貌结构对水文过程的规定性分析,利用地貌参数推求水文过程,进行水文预测(预报)的可能性。

(4) 从耗散结构理论,水流塑造形态、形态约束水流这种双效应反馈系统分析,阐明具有独立研究意义的“喀斯特水文地貌学”(Karst Hydrogeomorphology)这一新的交叉学科的理论方法。

在以往研究的基础上,通过典型喀斯特流域天然试验场的调查和 3 年多的观测研究,初步取得了如下的基本认识和结果。

(1) 全面系统地分析了喀斯特流域的性质和基本特点,确立了概念,深化了内涵,注入了新的观点,这就为喀斯特水文地貌

学奠定了独立研究的理论基础。

(2) 从流域系统概念出发,在强溶蚀动力作用机理的界面理论基础,揭示了溶蚀作用及强度的时空耦合特点,指出不同时空尺度的溶蚀强度数据,不能无条件地相互推广利用。

(3) 喀斯特流域地貌形态双重结构——“动力演化层”和“动力平衡层”的发现,以及在流域3种水量平衡类型(盈水流域、亏水流域和平衡流域)和水文地貌作用场(地貌势和水文势)新概念基础上创立的正向、逆向、平衡态流域地貌演化数学模型,不仅统一了涵盖地貌发育具物理意义的定性定量的结合问题,而且也在时间和空间上统一了地貌发育理论中对立的演化观点和动力平衡观点。

(4) 通过流域试验场降雨洪水状态响应曲线——下凸上三角复合叠加结构的揭示和发现,建立了从水文过程来识别流域地貌结构的途径,而具有理论和实用价值。

(5) 通过喀斯特流域地貌面状水文结构和地貌线状水文结构的产、汇流状态响应,推导出流域地貌导数积分曲线的定量方法解决水文预测问题,以及在喀斯特流域水文地貌概念和地貌数学模型基础上建立的地貌单位线法也都获得了初步的成功,为今后进一步研究打下了良好的基础。

(6) 初步奠定了喀斯特水文地貌学的基本理论框架和方法,表明运用水文地貌学从一个新的视角去观察分析问题,能够获得一些新的认识,喀斯特水文地貌学是一门能够进行独立研究,并能推进喀斯特学科发展的分支学科。当然,一门学科的形成、发展以至成熟,需要做大量的、艰苦的实际工作,需要有志于这门学科建设的大批学者的共同努力,来逐步完善,我们也只是做了这门学科的基础理论和方法的初步研究工作。

本书由三大部分组成(喀斯特流域研究、水文地貌场双效应分析及数学模型的建造、水文预测的地貌学方法探求),共分八章,由杨明德、谭明、梁虹分头执笔,最后由杨明德修改定稿,在研究期间,基金课题组的熊康宁、祝安、程星参加了野外调查和试

验工作，贵州师大地理系张英骏教授始终给予了热情的支持和指导，并得到贵州省科委普定岩溶综合试验站、桂林岩溶地质研究所、贵州水文水资源局、贵州师范大学实验中心的大力支持和帮助。特别需要提到的是，此项工作得到了贵州师范大学校长何才华教授的关怀和支持，以及华南师范大学曾昭璇教授、国土资源部岩溶地质研究所袁道先院士、朱学稳教授和中国科学院地理研究所宋林华教授的鼓励和帮助，并在地质出版社的大力支持下，本书才得以完成出版。

由于本书是以中国自然科学基金资助课题，喀斯特流域地貌水文系统数学模型研究内容为核心完成，涉及的学科基础理论较广，研究的内容难度大，时间较短，某些研究手段也不足，而作者自身的理论认识水平不高，工作地区和掌握的资料有限，书中出现错误或不当之处，恐在所难免，敬希广大读者不吝批评指正。

著 者

1998 年 10 月

目 录

前 言

第一章 喀斯特流域系统性质	1
第一节 喀斯特流域系统涵义	1
第二节 喀斯特流域基本特性的认识	2
一、不均一的可溶性双重含水介质结构	2
二、二元流场形态结构	3
三、三维空间地域结构	4
四、功能上的耗散结构	5
五、流域空间上的动态性	7
六、流域边界的开放性	8
第三节 喀斯特流域水系空间结构	10
一、双重水网结构	10
二、地下水系二维空间展布形式	11
三、喀斯特干谷系的数量结构	16
第四节 喀斯特流域水文地貌场	19
一、形态标量场与水流向量场	19
二、喀斯特流域水文地貌势的对称性	20
第二章 喀斯特流域的溶蚀作用	24
第一节 溶蚀过程机理	24
一、溶蚀机理	24
二、溶蚀中碳酸盐的平衡	28
三、混合溶蚀作用	31
四、温度混合溶蚀作用	33
第二节 喀斯特流域溶蚀速率分析	34
一、喀斯特流域溶蚀速率的计算	34
二、流域溶蚀速率与溶蚀试验对比分析	36

三、流域溶蚀速率与野外溶片的溶蚀对比分析	37
第三章 喀斯特流域系统水文特征	40
第一节 流场流态的多变性	40
第二节 喀斯特水地表、地下转换频繁	43
一、地下河是两水流转换的基本条件	43
二、转换的形式	44
三、转换产生的特殊水文过程	45
第三节 喀斯特水在空间分布上具有不均一性	47
第四节 水文动态随时间变化的复杂性和不稳定性	50
第四章 喀斯特流域系统水文过程的地貌效应	58
第一节 水道退化与鞍形谷及伏流通道的形成	58
第二节 地貌跃迁带的水流转化与坡立谷发育	64
一、安龙南部样区	64
二、安顺龙宫样区	66
三、坡立谷的水文地貌功能	70
第三节 压力流向上溶蚀与通道侧方储水舱形成	72
第五章 喀斯特流域系统地貌结构演化数学模型	75
第一节 形态参数	75
第二节 流域形态结构	76
一、分析样本的选取	76
二、形态结构统计模型	79
三、三度空间相关分析	82
第三节 流域地貌系统发育	83
一、基于动力平衡的演化过程分析	83
二、基于二维图形关系的演化过程分析	84
第六章 流域喀斯特地貌发育因素空间尺度分析	89
第一节 流域喀斯特气候地貌现象分析	89
第二节 流域喀斯特岩石地貌现象分析	91
第三节 流域喀斯特构造地貌现象分析	93
第四节 锥状喀斯特流水起源分析	94
第五节 流域喀斯特峡谷成因及演化时空因素分析	99

一、喀斯特峡谷形成机制过程独特	101
二、喀斯特峡谷的形成具有结构上从简单到复杂再到简单的 演化过程	103
三、流域喀斯特峡谷是多成因地貌形态时空耦合系统	106
第七章 喀斯特流域地貌结构的水文功能效应	109
第一节 喀斯特流域地貌面状水文结构及其水文效应	109
一、喀斯特流域地貌面状水文结构	109
二、面状水文结构的定量表征	110
三、地貌面状结构的水文效应	112
第二节 喀斯特流域地貌线状水文结构及其水文效应	114
第三节 喀斯特流域时空尺度及其造峰效应	117
一、流域时空尺度效应	117
二、流域地貌结构造峰效应	120
第八章 喀斯特流域产、汇流模型及其水文预测	125
第一节 喀斯特流域产流特性及产流模型	125
一、流域产流机制与产流模式	125
二、流域产流机制与产流面积	126
三、喀斯特流域产流特征	128
四、喀斯特峰丛洼地（谷地）产流模型	130
第二节 喀斯特流域汇流模型及其水文预测	132
一、汇流理论基本问题的回顾	132
二、通过喀斯特流域水文试验场所揭示的若干汇流特性问题 的初步认识	133
三、喀斯特流域系统汇流结构分析	136
四、喀斯特流域汇流结构模型及水文预测	140
主要参考文献	144
图版	151

第一章 喀斯特流域系统性质

第一节 喀斯特流域系统涵义

喀斯特流域是指特殊的含水介质（可溶岩双重含水介质）由特殊的流域边界（地表、地下双重分水岭）、独特的地貌-水系结构及水文动态过程耦合的地域综合体。

用系统论观点和方法来认识喀斯特流域，把这个特定的研究对象视为一个系统，那么就可以定义为：在特定的流域边界条件下，一组结构有序和功能互补的水文地貌要素集合，且会随时间的推进，而处于有序动态变化的一个三维空间地域系统。这就包含着喀斯特流域系统属于空间 X 、 Y 、 Z 和时间 t 的完全集合。它既有一定空间展布形态和边界状态，又会随时间的变化而不断演化，属于比较复杂的物质能量流开放系统（图 1-1）。

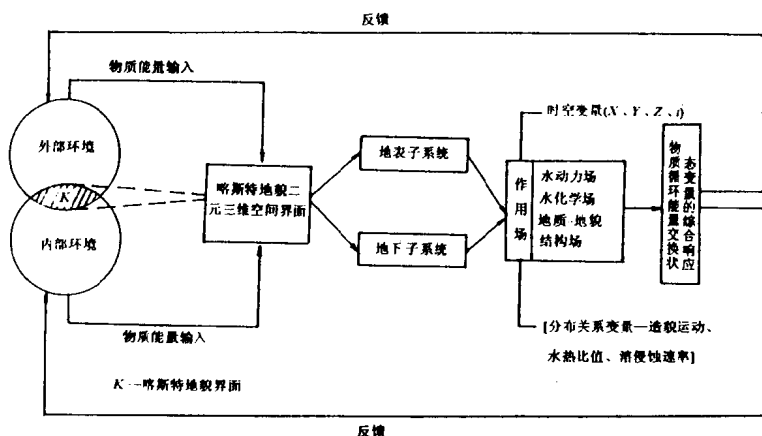


图 1-1 喀斯特流域水文地貌系统框图

用数学表达则喀斯特流域系统 K_S 为:

$$K_S = f(G_1, G_2, M, B, N, C, th, |X, Y, Z, t)$$

式中, G_1 、 G_2 分别为地表水系、地下水系; M 为含水介质及储水结构; B 为系统边界; N 为水流动能、势能; C 为化学成分及化学能; th 为水热能; X 、 Y 、 Z 为空间, t 为时间。

由于在此系统中, 形态关联到过程, 结构联系到功能, 空间涉及到时间, 所以, 是一个过程-响应系统 (Process-response System) (Choley, R. J. et al., 1971), 因为喀斯特流域是在一个可溶性不均一的双重含水介质、地表、地下两系统的二元三维空间地域系统中与外界环境不断进行物质、能量交换, 在交换过程中, 系统由物质运动状态、能量分配及各部分之间结构不断发生自我调整 (自组织过程), 使各个层次、各个部分、各个要素之间相互协调, 系统能从原来无序混沌状态转变为有序的稳定结构状态, 以使整个系统对来自外界环境的物质、能量输入逐渐适应而趋于稳定 (牛文元, 1981)。也就是说, 喀斯特流域能在内外阈值调控下, 通过负熵流, 使系统自发地从无序走向有序结构, 而流域的任何一个时段, 不是处于稳定、平衡状态, 就是处于均夷或变异状态。所以, 喀斯特流域是具有耗散结构的动态地域空间系统。

第二节 喀斯特流域基本特性的认识

喀斯特流域与正常流域特别是湿润地区的常态流域相比, 其流域空间结构、水系发育形成、地貌景观组成、水文动态规律都有鲜明的差别, 这种差异正是由于喀斯特流域系统独特的结构和产生的功能效应所致, 根据我们近年对若干典型喀斯特流域和试验场的研究表明, 一个喀斯特流域通常具有下列六大基本特性。

一、不均一的可溶性双重含水介质结构

喀斯特流域系统在物质组成上是可溶岩特别是广泛存在的碳酸盐岩的非均质含水介质体。即在岩性构造控制下, 由于含侵蚀性的 CO_2 及运动着的水的差别溶蚀和侵蚀作用, 形成了大量的次

生溶孔、溶隙和溶道(溶管和溶洞系统),从而构成了一个复杂的、有机结合的,在空间上分布不均一的贮水空间系统,并产生了不同的贮水形式,水流运动状态、水力学特性的裂隙流和管道流共存于一个含水介质系统中,而且这两种不同性质的水流,不仅在流场中水力联系密切,而且表现出有方向性的相互补给、相互调节的功能,如在枯水期或平水期,孔隙裂隙水网络沿着水力方向补给管道水或地下河,在洪水期,水流充满整个管道,并产生水头差时,这时又会按水头差方向补给周围的裂隙、孔隙水。这就导致喀斯特水在流域空间介质中运动、传输和转换不同于非喀斯特流域的物质结构特性,近年所发现的喀斯特含水介质体中存在的所谓小蓄水体,国外称为“微型水库”对流域喀斯特径流,有很强的调蓄能力,以及已经揭示出的岩溶水文动态过程,如洪峰降低,枯季径流比率增高,洪峰退水曲线延长,出现独特的“闭流区”^①和产、汇流过程,水流流态上的快速流和慢速流共存,并在一定条件下相互转化,水化学类型简单(一般均为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 或 $\text{HCO}_3\text{—CaMg}$ 型水),矿化度低(常在 $150\sim 250\text{ mg/L}$ 以下)等,都是喀斯特流域系统物质结构产生的水文功能效应。

二、二元流场形态结构

喀斯特流域在宏观流场上表现为一个二元形态结构,即喀斯特流域在整体上具有调控流域水文过程的地表、地下两套地貌结构场,并形成地表、地下两个水系,地表、地下两个分水岭,地表、地下两个流域,在流场上这两个流域又常呈复杂的边界不重合关系,但又通过水力联系构成一个密不可分的整体。当地面有一套地貌-水文结构系统出现时,其地下也会有一套地貌-水文结构系统状态与之相适应,以达到在整体上完成流域物质、能量的传输和交换的最佳功能效应。近年对喀斯特流域特性深入研究还发现,喀斯特流域水量不平衡是由于流域存在着一个水量不平衡的交换值,该值是由于喀斯特流域的二元形态结构所导致产生了

① 闭流区 一指与地表水系无直接联系,不直接参与地表水文过程而与地下水汇流过程相联系的独立汇水单元。

亏水流域和盈水流域的原因（杨明德，1982、1992）。即当喀斯特流域的年降水量和年蒸发量被确定后，年径流量的绝对值并不随地表流域面积（一般流域就只有这一个流域面积）增长而成直线相关关系，表现出河流中的实际年径流量（ $Y_{实}$ ）与流域降水所形成的年径流量（ $Y_{本}$ ）不等，而存在着一个流域交换值（ ΔU ），

即： $Y_{实}=Y_{本}\pm\Delta U$
 当： $Y_{实}=Y_{本}-\Delta U$ 时，属亏水流域；
 $Y_{实}=Y_{本}+\Delta U$ 时，属盈水流域；
 $Y_{实}=Y_{本}$ ， $\Delta U=0$ ，属平衡流域。

这个差值正是由于地表、地下两流域边界差（不闭合）所致致与相邻流域间有水量交换产生（汪德麟，1983）。

对喀斯特流域的地质、地貌调查及大量水文资料分析表明，上述前两种流域在喀斯特地区普遍存在，年降水量与径流虽表现出相互平行的增长关系，但年径流模数却相差很大（图 1-2），反映了三种流域类型水量平衡特性。

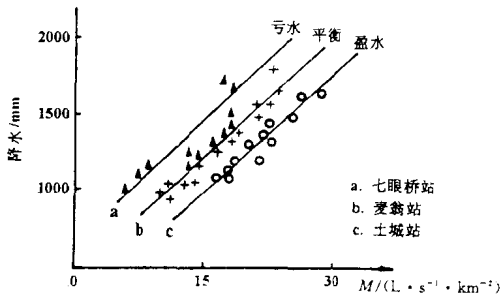


图 1-2 三种降雨-径流关系

三、三维空间地域结构

喀斯特流域在空间上又是一个三维空间地域结构体。即喀斯特流域系统的物质、能量转化和迁移，如水流传输，三水转化，溶质的侵蚀、搬运、转变、沉积是在从上游到下游，从分水岭到河谷，从地表到流域侵蚀基面以下一定深度（如喀斯特深饱水带——虹吸水文带下界）的一个三维空间界面——喀斯特结构系统中进

行的，而且由于这个界面位置上的空间组合效应，无论其结构的水文功能响应状态还是其水文动态过程，地表水、地下水的相互转化，在干、支流或游段（上、中、下游）都有地域差异，因为水系的序次等级不同，游段不同，组成其子系统的元素如地质构造、地貌形态、水文地质结构、水系形态在空间结构上造成基面—径流—形态响应有差别，从而产生不同的功能效应。

例如：在中国南方已被揭示的流域两种河流纵剖面形态——正常型和反常型（在贵州常称为反均衡剖面），由于其子系统构成及流域结构上的差异，无论其地貌景观组合和分布序列，还是水系结构形态、水文动态和流域地貌演化方向都不相同（表 1-1）。

四、功能上的耗散结构

喀斯特流域是一个非线性时变的开放系统，并在功能上表现为耗散结构的特性（杨明德，1988），亦即它是一个远离平衡态，通过与流域的外界环境不断进行物质、能量和信息交换的系统。由于负熵流使流域由一种系统状态（水文-地貌结构）转变为另一种系统状态，转化是通过系统的涨落（阈值）自发地产生自组织过程来进行的，而喀斯特流域的非线性时变表现，就是流域水文过程中，因流域水文-地貌多因素和过程的非对称性及序参量的非线性方程在分叉点附近出现多种状态而具不确定性所致。

一个由多个子系统组成的喀斯特流域，其所属低一级的流域或游段（上、中、下游），往往在地域演化上出现处于不同状态（如地貌、水系演化阶段）的镶嵌或者处于变异的混沌状态（chaos）或者处于稳定状态和平衡状态。由于流域结构的径流性质、强度、直接基准和构造变动等因素的涨落对流域各部分具有响应不同步，于是在时序上产生滞后效应的结果。如喀斯特流域河系发展上，由不同发展阶段的河流纵剖面组合而成的“反平衡剖面”（上凸抛物线型纵剖面），喀斯特水的“跨越”和“悬托”现象，地表存在按 R. Horton 河流分支规律的干谷系转向地下新发育的水网，以及基面变化地貌回春，原有地貌夷平化过程仍在进行，而地下水面却已开始深陷化，地下河天窗在洪水不大时成为

表 1-1 两种不同河流纵剖面形态流域的水文地貌特征比较

正 常 型	判 别 标 志	反 常 型
下 凹 型	河流纵剖面形态	上凸型（抛物线状）
由上游至下游是峰丛洼地→峰林谷地→峰林盆地或峰林溶原	地貌景观分布序列	由上游到下游是峰林溶原或峰林盆地→峰林谷地→峰丛洼地（峡谷）
上游大厚度渗流带，变动大的季节变动带，独立管道发育，水位埋深大，到下游渗流带变薄，季节变动带减小，潜流带发育，地下管网发育	水动力剖面	由上游到下游与正常型正好相反，在峡谷区有顺河潜流型溶洞（地下河）发育
水力坡降由大变小，常由 $>7\%$ 到 $\leq 1\%$	水力坡降	由 $<1\%$ 到 $>7\%$
地表水系由不发育到逐渐发育完整，地下水系由孤立状向水力联系密切的网状发育，水的有序性减弱，地貌熵增大	地表、地下水系形态发育	地表水系由上游向下游密度减小，地下水系向独立管道变化，水的有序性增强，地貌熵减小
流域地貌处于正向（蚀低、准平原化）演化序列	流域地貌景观演化方向	流域地貌处于逆向（上升峰丛化）演化序列
流域总出口水文动态以有滞后性的气象-水文型为主，易见亏水流域	水文动态	流域总出口水文动态以反应灵敏的快变气象-水文型为主，易见盈水流域

地表水的吸水点，而在特大洪水时，又成为地下河的出水点，这种双向过程重叠区，是有序化开始发展，但还未完全形成的过渡区，都是喀斯特流域系统中的混沌现象。而一个大厚度的碳酸盐岩渗流带存在，靠湿热多雨气候条件下产生的内源水，由四边形小洼地发育成与水文、地形坡度、汇流面积相适应的平均以近六边形为主的峰丛洼地（多边形洼地），并出现动力平衡态，虽然地