

喀斯特的定义及其发展

D. C. 福特 P. 威廉姆斯

一、喀斯特的定义 喀斯特是指由高溶解度的岩石和充分发育的次生孔隙度相结合并产生特殊的水文和地形的地区。仅仅是岩石的溶解度较高是不足以发育喀斯特的。喀斯特发育的关键是不寻常的地下水文。促进喀斯特发育自然过程的“引擎”是水文循环。原生孔隙度极高的可溶性岩石一般喀斯特发育较差。而原生孔隙度极小的可溶石后来可形成很高的次生孔隙度，促进了喀斯特极其发育。作为喀斯特标志的显著的地表和地下地形是沿构造溶蚀而成的。

与喀斯特相关的水文和化学的作用过程已从系统的观点得到了很好的认识。可以把喀斯特作为一个开放系统，它由作用于喀斯特化岩石上两个明显相关的水文和地球化学的子系统组成。喀斯特地形是这两个相关子系统共同作用的产物。

从水文学的观点来看，一些喀斯特都属于同期系统。我们称之为古喀斯特，它们往往已经历了构造沉降作用，并且不整合地覆盖于碎屑岩盖层之下。偶然地它们被挖掘出来，并再次成为活跃的系统，因此，中断了也许几百万年的喀斯特作用又得到了恢复。与古喀斯特可比的是残余喀斯特。它们出现于同期系统，但脱离了发育它们的环境，正如代表古河漫滩的河流阶段脱离发育它们的河流一样。残余喀斯特常常经历了基准面的明显变化。例如，具有残丘的高位溶蚀面而现在已大大高于现代水位。滨海的下沉喀斯特是另外一种例子。已排干的潜洞穴通道也属于残余喀斯特，虽然它们的疏干无须基准面的改变。

不是由溶蚀作用或由它引起的塌陷和崩坍作用形成的类喀斯特地形称为假喀斯特。冰川洞穴也是假喀斯特，因为它们的发育包含着一个相变的过程。热喀斯特是一个适用于地下冰层融化形成的地形洼地的术语。火山喀斯特包括岩流中的管道状洞穴和洞顶的机械崩塌物。管道是在砾石、土壤和黄土中经机械冲蚀作用形成的洞穴及有关的崩积物。另外，象在花岗岩和玄武岩露头上的溶痕等溶蚀形态也属于喀斯特形态，尽管这些岩石与典型的喀斯特岩石相比，其溶解度很小。

“喀斯特”词可追溯到印欧语系形成以前。它来自意指石头的喀拉 (Karra)，而且发现该词已存在于欧洲和中东的许多语言中。在南斯拉夫北部，原词喀尔斯 (Kars) 变成了喀拉斯 (Kras)。喀拉斯有了三种含义，石头、裸露的地面和南斯拉夫与意大利边境特里斯特附近整个地区。喀拉斯地区有时作为“典型喀斯特”的代名词，并成为首先进行广泛科学研究的自然景观特征。在罗马时代，该地区称为喀尔苏斯 (Carsus) 和喀尔索 (Carso)。当喀拉斯地区变为奥匈领土的一部分时，喀拉斯德化成喀斯特 (Karst)。维也纳地理地质学院赋予了喀斯特准确的含义，并把它变为国际科学术语，然而，它的技术性应用直到十九世纪中叶才确立。喀拉斯地区特殊的自然地形形态变成了闻名的“喀斯特现象”等等。广而言之，类似的地形也见于世界其它地方。因此，现在我们认为喀斯特是指具有消水河、洞穴、洼地、溶槽和大泉等的地区。

图1说明了喀斯特系统的主要特征，最初分为侵蚀区和沉积区。侵蚀区内，只有溶蚀作用或者由溶蚀作用派生产生的其它机械作用，并且，喀斯特岩石纯粹被搬运走；区内也可出

现一些溶蚀岩石的再沉积，但大多数为过渡型的沉积物。真正的沉积区是在飞海或（潮间或高于潮汐）滨海海滩，此区形成新的喀斯特岩石。这些岩石作为本区溶蚀作用瞬间插曲的证据。

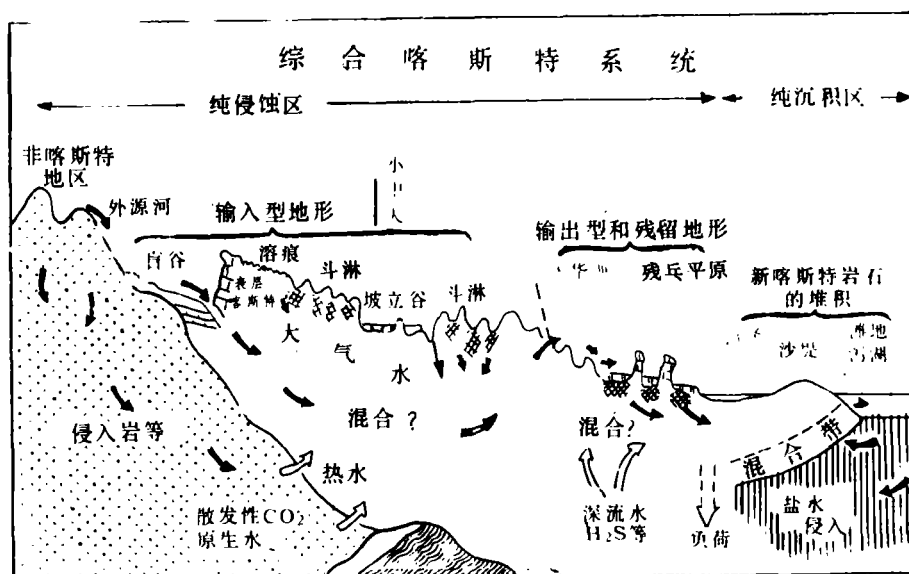


图1 综合喀斯特系统及活跃喀斯特地区内的主要喀斯特现象

在纯侵蚀区，沿地下水流程的溶蚀作用是喀斯特最显著的特征。在数目的喀斯特系统中，地下水大多来源于大气水，循环深度浅，在地下停储时间短。许多地区内，深循环的、热水或来自侵入岩和下沉沉积盆地的水往往与大气水相混合，并局部控制了喀斯特溶蚀系统。在滨海区，海水与淡水相混合是加速溶蚀作用的重要因素。

在侵蚀区，溶蚀作用大多发生在基岩面附近，并且基岩发育成地表喀斯特地形。当单位形态的特征尺度（如直径）一般小于10m时，称为小规模形态；10—1000m为中规模；大于1000m者为大规模。在普通系统范围内，地表喀斯特形态大部分归因于输入、贯流或输出作用。输入形态是主要的：它们把水排入地下，因此，它们与流水或冰川形成的形态有明显区别。一些特殊的谷地和称为坡立谷的底部平坦的洼地把水输送过地表喀斯特岩石带，起了输水的作用。在地下水以泉排泄的地方，可形成各种侵蚀峡谷、沉淀的或象灰华坝那样的建筑性形态，它们是输出型形态。有一定高度和散布的喀斯特残丘可以保留在低于后退泉线的冲积平原上。世界上最好的华南喀斯特就是最好的例子。

石膏、硬石膏和盐的溶解度太高，以致它们在地球表面的纯侵蚀区很少出露。相反，它们可以得到难溶岩或象页岩那样不溶盖层的保护。尽管如此，循环着的水仍能攻击它们，并选择性地使它们从范围内迁移出去，甚至它们深埋在1000m之下也难免。这种现象称为夹层或层内喀斯特作用，它们可由上伏岩石中的或地表的崩塌或沉陷构造形成。夹层喀斯特作用也可发生在碳酸盐岩中，但不太重要。

二、全球喀斯特的分布 图2说明了作为主要喀斯特岩石的碳酸盐岩露头在大陆上的分布。由于本图是简图，因此省略了面积较小的露头，也可能略去了一些面积较大的露头。碳酸盐岩的分布面积约占全球无水、无冰盖陆地面积的12%。发育显著喀斯特地形或者重要喀

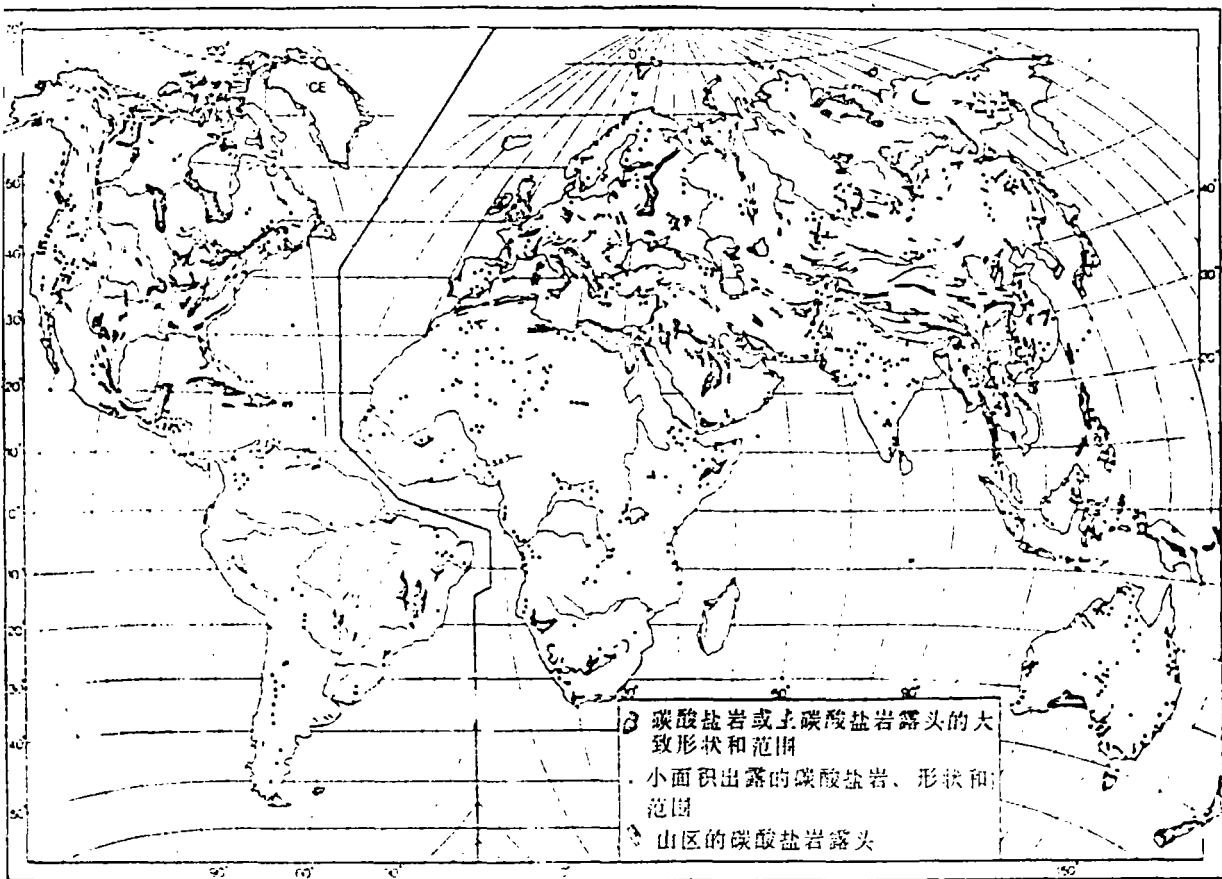


图2 全球碳酸盐岩露头分布图

斯特地下水循环的碳酸盐岩分布范围要小于12%，我们估算它们仅为上述面积的7—10%。碳酸盐岩主要分布在北半球。古老的冈瓦那大陆周围边缘区有面积较大的白垩纪或白垩纪以来的碳酸盐岩散布外，大陆上出露的碳酸盐岩面积较小。大量的人口生活在碳酸盐岩地区，据计算，占全世界总人口25%的人完全靠或大部分靠喀斯特水解决他们的供水问题。

图3表示在整个地质时期内堆积的石膏、硬石膏和盐的最大分布范围。它们大部分深埋于后期碳酸盐岩或碎屑岩之下。在许多情况下，它们局部地因受到溶蚀作用而被迁移走。象在安第斯山区一样，由于褶皱和冲断层已缩小了它们的地理分布范围。但是，无论如何，石膏及盐的分布面积不到全球大陆总面积的25%。石膏和盐喀斯特的出露面积要比碳酸盐岩喀斯特小得多，然而它们的夹层喀斯特的面积却处于相同的数量级。

三、喀斯特概念的发展 地中海流域是喀斯特研究的摇篮。众所周知，古希腊和古罗马的哲学家首先对喀斯特的科学含义作出了贡献。他们象给予生活在洞穴的人和其他人以地方名一样命名喀斯特地区名，如冥河。法伊弗(Pfeiffer)把公元前600—400年到二十世纪早期的喀斯特地下水科学概念的发展划分为五个阶段。特勒斯(Thales)(公元前624—518年?)、阿里斯杜特尔(Aristotle)(公元前385—322年)和勒克丽铁斯(Lucretius)(公元前96—45年)提出了有关水循环的概念。弗勒维斯(Flavius)(公元一世纪)描述了在约旦河流域首次喀斯

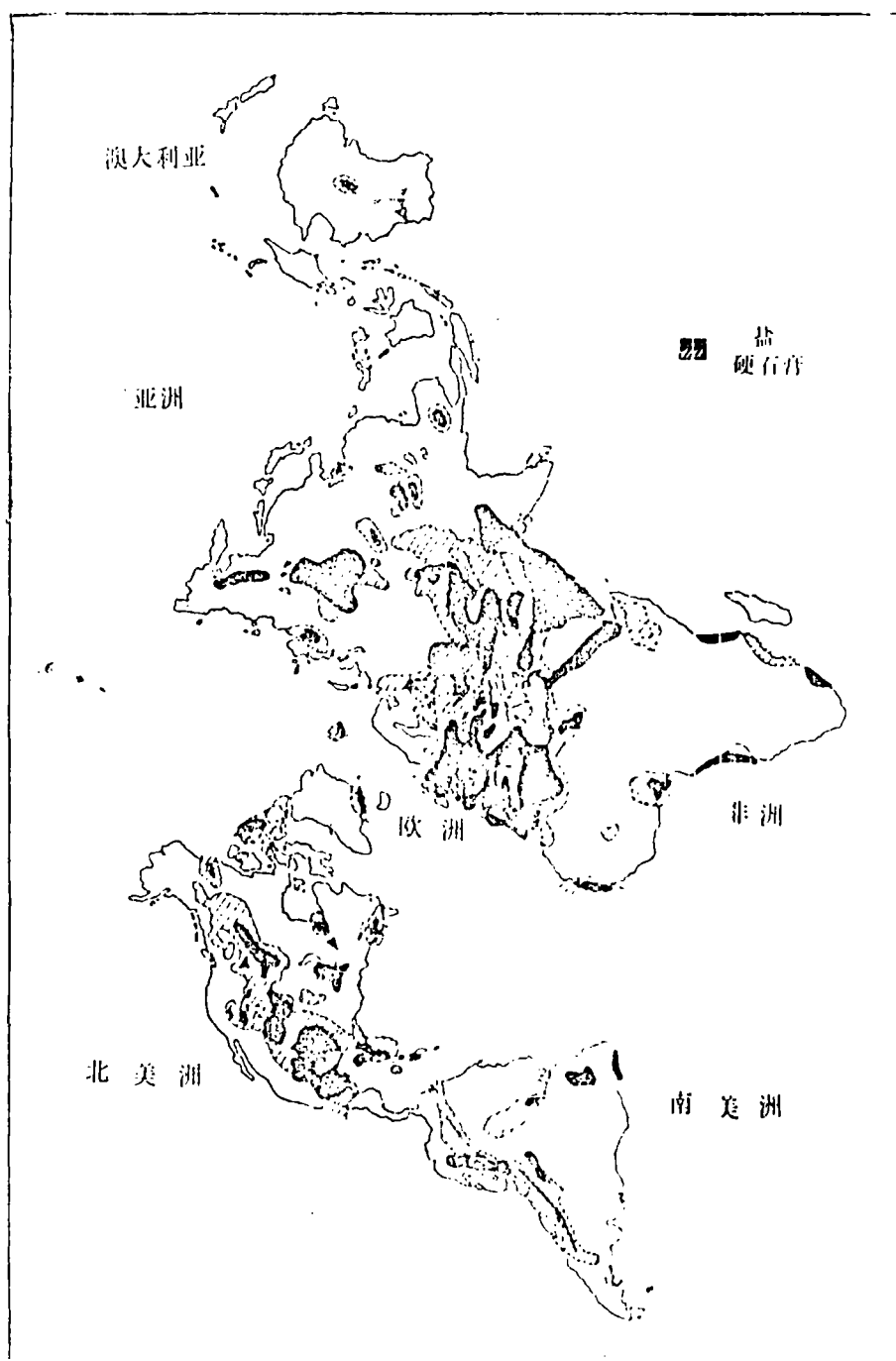


图3 全世界蒸发岩分布图。图中90%的硬石膏和石膏以及99%以上的盐没有出露，并为后期的岩石覆盖。

特水示踪试验。波萨尼斯 (Pausanias) (公元二世纪) 也报道了解样施蒂姆发利亚 (Stymfalia) 湖附近消水河和埃拉息诺斯泉之间建立联系的试验。由希腊和罗马学者建立的水文学基本学说直至十七世纪一直是喀斯特研究的基础。在十七世纪, 佩拉尔特 (Perrault, 1608—1670年)、马里奥特 (Mariotte, 1620—1684年) 和哈里 (Halley, 1656—1742年) 建议把水文学变为定

量的科学,以解释蒸发、渗透和迳流之间的关系。也就在十七世纪,中国的徐霞客和南斯拉夫的瓦尔伐索尔(Valvasor)等推进了对喀斯特洞穴的新认识。

十八世纪末,认识了碳酸在石灰岩溶解中的作用。以后的几十年中,进行了碳酸盐岩在水中的溶解试验工作。比斯科夫(Bischof)1854年计算了莱茵河中溶解碳酸钙的含量,1890年古德柴尔德(Goodchild)通过对砾岩溶蚀的观测,计算了英格兰北部石灰岩地区地表风化的速率,这些工作都提高了人们对化学剥蚀概念的认识。到1883年,斯普林(Spring)和普罗斯特(Prost)在比利士默兹河流域完成了具有现代风格的溶蚀剥蚀的研究。

十九世纪中后期是我们对石灰岩地形认识进行最重要的阶段。在英国,普雷斯特维奇(Prestwich)等研究了落水洞的成因,同时在欧洲大陆,对溶痕的研究取得了重要进展。史弗耶契(Cvijic)对喀斯特学的进步作出了杰出的贡献。他在1893年出版的“喀斯特现象”中研究了从溶痕到坡立谷不同规模的喀斯特形态,这奠定了现代喀斯特地貌学的基础。斯维廷认为他对斗淋认识作出的贡献,具有“标准化”的意义。史弗耶契是第一个对喀斯特地貌进行了研究,她对大多数斗淋是溶蚀成因的结论已经过了时间的考验。

在十九世纪中叶,对地下水流的认识已取得了明显的进步。虽然哈根(Hagen,1839年)、波伊苏因尔(Poiseuille,1846年)和达西(Darcy,1856年)的实验不是专门研究喀斯特的,但无论如何,他们为后来定量研究喀斯特地下水的运动打下了理论基础。1874年,对一个喀斯特大区域的水文地质分析作了首次尝试。拜尔(Beyer)、蒂兹(Tietze)和派拉尔(Pilar)研究了克罗地亚军事地区喀斯特缺水问题。赫拉克(Herak)和斯特林菲尔德(Stringfield)在1972年认为他们的学术观点为二十世纪早期出现更正确的理论奠定了基础,特别是他们提出:经过热烈而长期的争论,出现了一个较重要的、与互相连结的区域水流网相反的孤立管道流况。

格朗德(Grund)在1903年提出喀斯特地区的地下水在大区域内是互相关连的,而且最终受控于海平面(图1),他观察了喀斯特中的饱和带,他提出饱和带的上界面在滨海与海面一致,而在内陆,比山低。今天我们称饱和带的上界面为水位,饱水带内的水只有高于海平面才会运动,并称其为喀斯特水。海平面以下的停滞不动的水称为地下水。他认为喀斯特水不断向下运动,直至不透水岩层。从此看出,格朗德已有了喀斯特水带的动力学观点,并认为饱水带的上界面(水位)随着降水的补给而不断上升。在局部地区,由于补给量很大,使上界面上升到地面以上,造成了低洼的淹没。由此,他解释了坡立谷洪水淹没的问题。

然而,高程相同的相邻的坡立谷不会同时淹没的野外证据恰好违背了格朗德提出的坡立谷淹没机制。卡茨尔(Kafzer,1909年)发现当泉处于不同高程时,并不是高位泉先干。他认为无法预报间歇泉流对降水的反应,相反,有些泉的形成与降水无关。关于坡立谷受淹问题,他提出,当坡立谷水不断加深,甚至洪水变得较深时,仍可看到水不断跌入落水洞,因此,通过喀斯特水位上升使坡立谷淹没的理论一般是不能成立的。他不同意喀斯特水和地下水的分类法。相反,他提出喀斯特包括了浅喀斯特和深喀斯特。前者可一直向下延伸到下伏不透水岩层,而后者完全包含在大范围的碳酸盐岩层中。卡茨尔很明显受到法国洞穴学家马特耳(Martel,1894年)地下探险结果、特别是对地下洞河认识的影响,他推测喀斯特深部水的循环主要发生在水位不同和对补给有不同水文响应的独立河网中(图1)。因此,他工作的重要性就在于把地下水文学和洞穴学的相结合。

可以想象,史弗耶契同时受到了上述不同学说的挑战和格朗德1911年喀斯特中径流循环论文的启发,于是,他在1918年发表了一篇很有名的论文。论文中阐述了地下水文学的性质和与地下水文有关的地表地貌,这表述了史弗耶契日益成熟的学术思想。他没有采纳把地下

微机地理信息系统及其在城市与区域规划中的作用

D.F. 马布里 S.E. 安姆松

城市与区域规划依赖于大量空间数据的有效处理。在过去的20年中,地理信息系统(GIS)已发展成为空间数据处理的主要技术手段。计算机技术和地理数据处理知识的进展,使得GIS

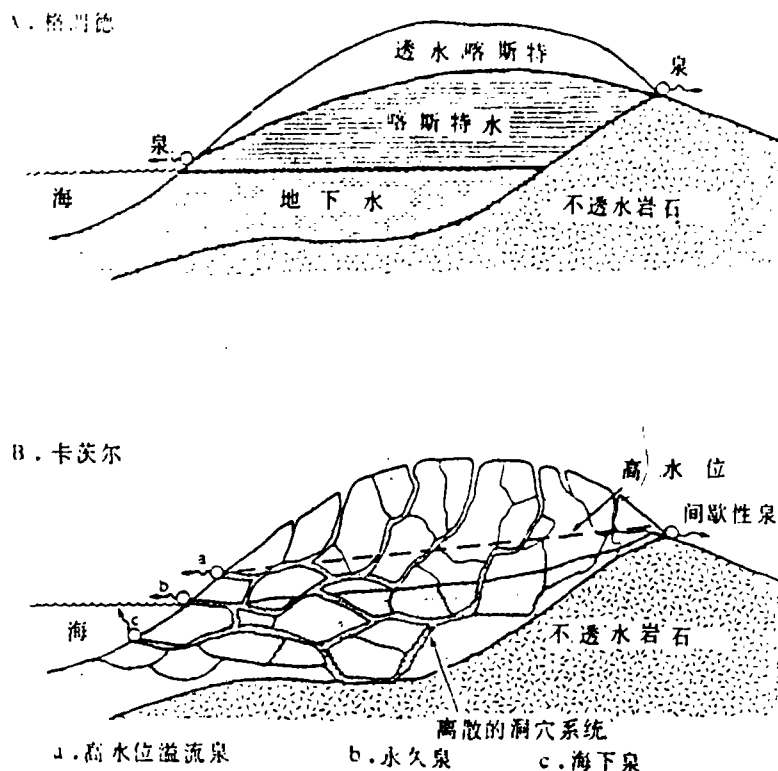


图4 A. 格朗德的喀斯特地下水系统的主要特征。虽然海平面以下为停滞水,但它仍表示了水的循环。

B. 卡茨尔的喀斯特水系统,它强调了基本独立的地下河网的运行。

水划分为喀斯特水和地下水的意见,虽则他已含蓄地接受了如我们今天所理解的地下水的分布。他相信不连续的水位是受到岩性和构造控制的结果,并提出喀斯特中存在三个水文带的概念:干带、过渡带和有永久循环水的饱水带。他坚信这三个水带的特征随时间而变化,上带的水不断向下运动并取代下带的水,以促进喀斯特的发育。因此,产生了喀斯特水文学动力演化的概念。强烈的水循环提高了岩石的透水性,并持续不断地改造地下水文系统。目前,仍把这一点作为喀斯特唯一重要的特点。在本世纪的几十年中,史耶耶契是我们许多理论的奠基人。无疑,他是现代喀斯特研究之父。

宋林华译自: D.C. Ford和P. William著《Karst Geomorphology and Hydrology》, 1989年出版