# 尼亚加拉河流及瀑布演化浅析

高钰涯

(中国地质大学地球科学学院,湖北 武汉 430074)

摘要 较全面地介绍了尼亚加拉河和尼亚加拉瀑布,并从其成因、演化、溯源侵蚀及其岩性、气候、流量、科氏力、含砂量、瀑布形态、人类活动等方面进行了探析。展望了今后的发展与演化。

关键词 :尼亚加拉河 ;尼亚加拉瀑布 ;溯源侵蚀 ;河流演化 ;科里奥利力

中图分类号 :TV148$^{+}$.3 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2008)06-0080-05

## Preliminary research on the evolution of Niagara River and Niagara Falls

**GAO Yu-ya**

(*Faculty of Earth Sciences*, *China University of Geosciences*, *Wuhan* 430074, *China*)

**Abstract**: This article provides a comprehensive presentation of the Niagara River and the Niagara Falls. Their causes of formation, evolution and recession erosion are discussed as well as the influential factors, such as rock properties, climate, water discharge, Coriolis force, content of sand in river water, the appearance of the fall, and human activity. Some discussion of the future evolvement of the river and the falls is also provided.

**Key words**: the Niagara River; the Niagara Falls; recession erosion; river evolution; Coriolis force

尼亚加拉河(Niagara River)以河道短、水量充沛、泥沙含量低、水力资源与旅游资源丰富为特征。而位于河流中部的尼亚加拉瀑布(Niagara Fall),更以其蓬勃的气势及良好的旅游环境而闻名于世(图1)。尼亚加拉河流到瀑布处发生了一个近似直角的拐弯,瀑布连线作为上游河流的横断面竟然平行于下游河流的河岸。本文在现场观察的基础上,从河流的溯源和袭夺作用,离心力、科氏力作用,冰川作用和构造活动,河床岩性及人类活动改造各个方面,结合前人研究成果[1-10],探讨尼亚加拉河及瀑布的演化特征及其影响因素。

图 1 马蹄瀑布全景(高钰涯 2005 年 7 月 28 日摄)

## 1 尼亚加拉河流及瀑布

尼亚加拉河是美国与加拿大的界河(图 2),全长 56 km,是世界上最短的河流。它源于伊利湖最南端,下接安大略湖,经圣劳伦斯河,到翁格多海峡,最后流入北大西洋。河流上游伊利湖的湖平面海拔为 174 m,下游安大略湖的湖平面海拔为 75 m,两湖高差 99 m[1-4]。尼亚加拉河的旅游资源和水力资源的有效开发,使它成为全球单位长度河流创造财富最多的河流之一。

尼亚加拉大瀑布位于 43°05′N,79°04′W,尼亚加拉河的中段(图 1,图 2),以其声势而得名。尼亚加拉河在流到大瀑布处被山羊岛分流,形成 3 个独立的瀑布组:一个是横跨于美、加边境的马蹄瀑布(Horseshoe Fall,也叫加拿大瀑布);一个是美国境内

基金项目 :国家自然科学基金(40376017)

作者简介 :高钰涯(1986—),女,浙江杭州人,学士,专业方向为地球科学。E-mail :yuyagao@2004.cug.edu.cn

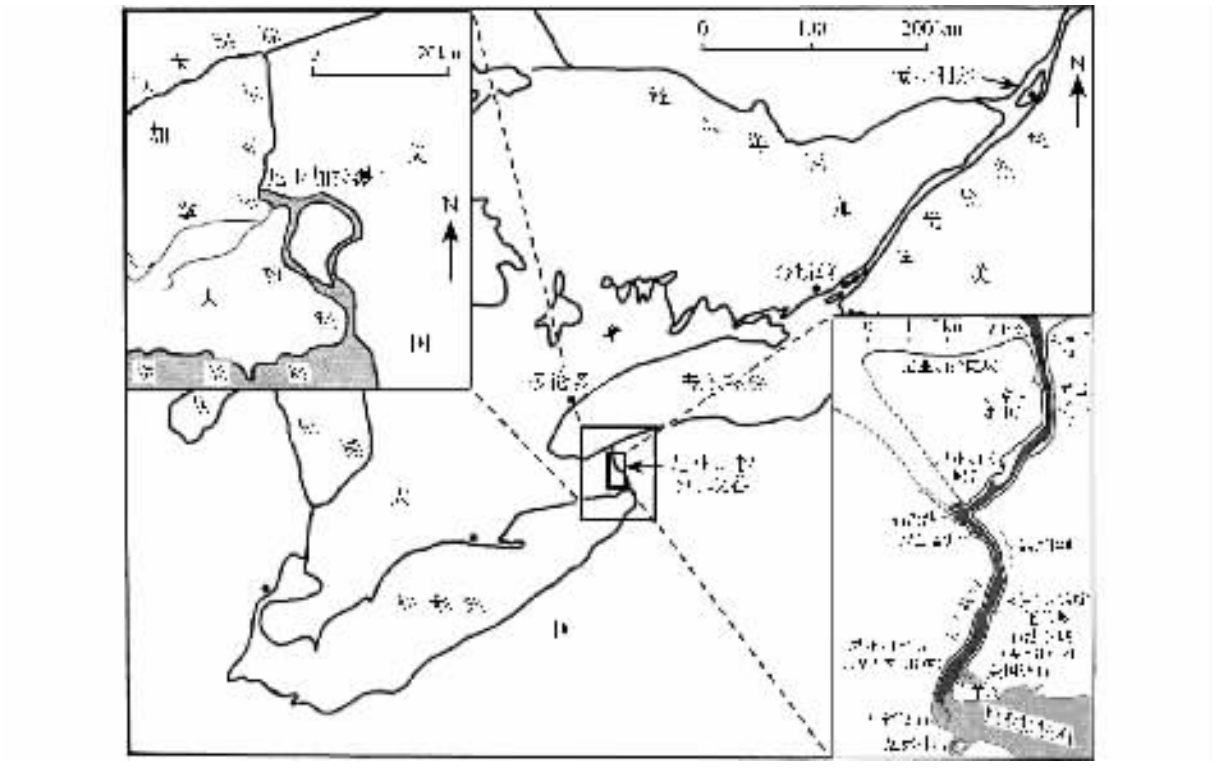

图 2　尼亚加拉河位置、形状及尼亚加拉瀑布位置

的美国瀑布(America Fall,也叫彩虹瀑);另一个是在美国瀑布附近,从山羊岛东侧缓缓流出的规模较小的瀑布,叫做新娘面纱瀑布(Veil Fall,又称月光瀑布)[8-9]。

马蹄瀑布的水线长 792 m,落差 51 m,瀑布下面的水潭深 56 m;"马蹄"两个端点之间的直线距离为 305 m。美国瀑布与新娘面纱瀑布水线总共长335 m,落差 54 m。

瀑布总流量平均为 6 000 $m^3/s$,其中马蹄瀑布的流量占总流量的 90%。尼亚加拉大瀑布以其水面宽广、水量大、流量稳定、气势壮观而著称。

尼亚加拉瀑布断面与上游岸线近于垂直,而与下游岸线近于平行。从高处俯视,可以看出瀑布口处河面宽阔,侧蚀作用较明显,河流上游为 SEE 向,下游为 NNE 向,上下游流向夹角小于 90°。

## 2　尼亚加拉河形成的地质背景

尼亚加拉半岛为连接伊利湖与安大略湖的地峡(图 2)。尼亚加拉斜坡(Escarpment)形成于 2.45 亿年前的古生代,始于纽约州的沃特敦(Watertown)向西经过加拿大安大略省的马尼图林群岛(Manitoulin islands),以及美国的威斯康星州和伊利诺斯州,长达 1 609 km,是尼亚加拉瀑布形成的主要因素。事实上尼亚加拉斜坡是剥蚀作用形成的"单斜山",其形成与 2.95 亿年前阿帕拉契亚山脉(Appalachian Mountains)隆起有关[10]。

尼亚加拉斜坡最老的岩石是 4.3 亿 ~ 4.15 亿年前的奥陶纪和志留纪岩石,分别为 4.3 亿年前的奥陶纪的昆士顿组(Queenston Group)砂岩,以及 4.25 亿年前的志留纪凯特莱克特/麦迪那组(Cataract/Medina Group)砂页岩、4.2 亿年前的克林顿组(Clington Group)岩石(克林顿组岩石由老至新砂岩、页岩、白云岩、灰岩、页岩)和 2.15 亿年前的洛克泡特组(Lockport Group)的灰岩和白云岩组成。在瀑布区下部主要为砂岩、页岩,上部为灰岩或白云岩[1,8,10]。

五大湖盆地是威斯康星冰期大陆冰盖消退后的产物。冰盖很大程度上控制了水系的变迁。在威斯康星冰期时,在北美地区形成厚达 2 ~ 3 km 的劳伦泰冰盖,巨厚冰盖的压迫导致地壳下陷。随着冰川作用的进行,基底受到剥蚀,形成众多的凹地。末次冰期结束,冰盖北撤,融冰水注入这些凹地形成湖泊,在当时的五大湖地区形成了 4 个冰湖:Algonquin 湖(包括现在的苏必利尔湖、密歇根湖、休伦湖)、Warren 湖(位于现今的伊利湖处)、Iroquois 湖(现今的安大略湖)和 Tonawanda 湖(位于美国纽约州西部地区)。随着冰川的后退,地壳的均衡回弹,上述 4 湖也逐渐变浅、分离,原来的多个出口(包括联通密西西比河与哈德逊河的出口)相继废弃,形成了当今的五大湖布局[10]。湖中大部分水是冰盖融化时留下来的融冰水,每年更新水不到 1%,为古老的"化石水"[8]。

12 000 年前尼亚加拉河成为大湖区主要的泄水河道，在注入安大略湖时，因尼亚加拉斜坡与安大略湖的地势差，形成了高度不足11 m 的瀑布。据推算，当时河水的流速为现在的 1/4，流量也仅为 1 062 $m^3/s$。冰川的北撤及地壳回弹的继续，使安大略河进入大西洋的水道进一步畅通，安大略湖的水面持续下降，使瀑布处落差加大，河流的溯源侵蚀作用进一步加强。

五大湖盆地及其沉积环境有利于泥沙沉积，使尼亚加拉河成为世界上含沙量最低的河流之一。这些特色使尼亚加拉河区别于世界上其他河流，而备受注目。

## 3 尼亚加拉河的演化与溯源侵蚀作用

尼亚加拉河发展演化史实际上就是尼亚加拉瀑布的溯源侵蚀史。

### 3.1 溯源侵蚀过程

1841 年，英国地质学家莱伊尔(Charles Lyell)对尼亚加拉瀑布及尼亚加拉河进行了考察，他指出尼亚加拉瀑布是由尼亚加拉斜坡的边缘——昆士顿溯源侵蚀到现在的位置的。美国地质学先驱霍尔(James Hall)对其进行了瀑布后退速度的测定[2,7,10]。

尼亚加拉峡谷起源于瀑布下游 11 km 的昆士顿(Queenston)陡坡处。在水流下跌的地方，水力具有巨大能量，其冲击谷底形成复杂的回转涡流，使谷底逐渐加深并且不断掏挖陡坎，形成凹槽，凹槽不断扩大导致顶部塌落，瀑布向着和水流相反的南方后退。4500 年前瀑布后退到达涡流池(Whirlpool)处，在此形成一个巨大的涡流池，继而形成 90°转弯的河道。继续南下受山羊岛的分流，逐渐形成 3 股瀑布，马蹄瀑布从平直形向马蹄形的演化。

### 3.2 溯源侵蚀速度

在过去的 12 300 年内，尼亚加拉瀑布侵蚀了 11 400 m，平均侵蚀速度为 92.7 cm/a。

近 160 年对瀑布溯源侵蚀速度测定结果表明：在 1842 ~ 1905 年的 63 年间马蹄瀑布的后退速度为 1.16 m/a，其中在 1875 ~ 1905 年的 30 年间后退速度高达 1.70 ~ 2.01 m/a 在 1905 ~ 1927 年的 22 年间马蹄瀑布以 0.7 m/a 的速度后退。这 160 年间瀑布的后退速度在 0.7 m/a ~ 2.01 m/a 之间变动，这样高的溯源侵蚀速度及变化范围在全球也是绝无仅有的。

通过人为的控制，现在马蹄瀑布的后退速度不到 0.3 m/a，将来可控制在 3 cm/a 的速率(图 3)[10]。

图 3 马蹄瀑布溯源侵蚀示意图

## 4 影响溯源侵蚀速度的因素

尼亚加拉瀑布及由它冲出来的尼亚加拉峡谷的形成与其特殊的地质条件有关，由于河床的石灰岩中夹有页岩，页岩比石灰岩更容易被流水冲刷，使河床岩层不断发生断陷，造成瀑布后撤。又因为水量巨大，瀑布的溯源侵蚀作用十分迅速。它后撤的速度是惊人的，并与下列因素有关。

### 4.1 岩性影响

影响溯源侵蚀的一个重要因素是地层，尼亚加拉瀑布在后退过程中，其流经地段的地层不同，抗侵蚀能力不同，岩性对后退速率产生了重要的影响。在 2000 年前当瀑布后退至现在的彩虹桥以北 500 m 处，遇到了抗侵蚀性较好的灰岩，其侵蚀速度就开始变慢。随着瀑布往南后退，灰岩/白云岩岩层的增厚，抗侵蚀能力的增加，瀑布后退速度逐步下降。

从马蹄瀑布处出露的地层可知，虽然形成于更新世后期的尼亚加拉河只有 1 万多年的历史，但其基底断崖相当老，是由形成于志留纪的白云岩和页岩组成[1,9,10]。由于上层为坚硬的灰岩或白云岩，下部为砂岩、页岩层的志留纪地层，由瀑布奔腾而下的河水冲刷着下部的砂岩与页岩，直到上部的白云灰岩塌落，由此维持着瀑布的直立面。瀑布的后退在某种意义上是靠喷洒而下的水流对下层砂岩或页岩进行掏空作用，进而引起上层岩石的崩塌。由于灰岩或白云岩不仅抗侵蚀能力强，而且还有较好的承载力，随着它们的增厚以及落差的增大，这一形式的侵蚀后退速率也大大降低了。

在尼亚加拉河流演化中，也曾袭夺了古河道，因古河道沉积物的抗侵蚀能力相对较差，故侵蚀速度也就快。

### 4.2 气候影响

尼亚加拉河聚水盆地面积约为 40.9 万 $km^2$，包

括苏必利尔湖、密歇根湖、休伦湖与伊利湖区。大湖区年均降水量为 914 mm，平均蒸发量为 610 mm，年净增水量为 304 mm，相当于年输入水量 1 243.4 亿 $m^3$。气候变化将影响输入尼亚加拉河聚水盆地的水量，进而影响进入尼亚加拉河的水量。

尼亚加拉河上游 4 湖中以伊利湖的湖面高度最低，为海拔 174 m，其湖面水位的变化在大尺度上与气候变化、地壳回弹状况等有关，而其年际变化主要与季节、降雨量、蒸发量和径流量有关[2-5]。最高水位出现在仲夏，最低水位见于深冬。1860 ~ 1907 年间，湖面水位变化的最大幅度为 1.2 m，在暴风天气条件下，由于风增水作用的影响，伊利湖湖面可产生高达 4.6 m 的升高[10]。

气候变化会导致海平面的升降变化，从而影响瀑布下游的水面高度、乃至瀑布的落差，对瀑布的侵蚀能力产生影响。气候对河道两侧的抗侵蚀能力也有影响。不同的季节，河道两侧岩石或土壤的抗侵蚀能力也不同，冬天的冻土层比夏天的湿润土壤更耐侵蚀。气候对尼亚加拉河演化的影响还通过流量、流速两方面表现，流速的变化实际上与流量及水位差有关。通常，河流的平均流速与河流比降的平方根成正比，与河水深度平方根成正比，并受河床粗糙度影响[11]。比降大、水深深（流量大）、河床平直的河流一般流速较大。

由伊利湖注入尼亚加拉河最大的月均径流量为 7 277 $m^3/s$，出现于 1896 年 3 月。1860 ~ 1907 年尼亚加拉河的平均径流量为 6 003 $m^3/s$，近年来流量介于 4 910 ~ 6 927 $m^3/s$ 之间，其中以 1998 年 3 ~ 8 月的流量为高，达 6 927 $m^3/s$，而 1999 年 9 月 ~ 2000 年 2 月的平均值为最低，只有 4 910 $m^3/s$。

### 4.3 科氏力影响

地球上运动的物体受与其运动方向垂直的科氏力影响，赤道地区科氏力为 0，在极点附近达到最大[11]。尼亚加拉河所处纬度较高，尼亚加拉瀑布所在地纬度为北纬 43.1 度，由于流向朝北，受到一个向东的偏向力；该处河流的流量介于 4 910 ~ 6 927 $m^3/s$，流速介于 0.2 ~ 1.0 m/s，据此推算科氏力为 98 ~ 691 N/s。经过瀑布的流量在 1 416 ~ 2 832 $m^3/s$ 之间，落差为 51 ~ 54 m，瀑布下到水潭处时的速度为 31.62 ~ 32.53 m/s，推得科氏力为 4 467 ~ 9 190 N/s[12-13]。日积月累，科氏力的影响相当大。

河流演化的初期，河水沿轴线左右摆动，受科氏力的影响，轴线弯曲[14]。从尼亚加拉河的平面分布看，可看到科氏力作用的痕迹 在瀑布—涡流池—昆士顿段可明显看到两个近 90 度的拐弯与 2 段向东弯的河段，在马蹄瀑布的侵蚀形态上也明显呈现右偏的现象（图 3、图 4），为典型的科氏力作用结果。

图 4 尼亚加拉河大弯曲（航片）

### 4.4 河流含砂量影响

含砂量大的河流具有较大的能量，同时对河流的侵蚀能力要大于含砂量小的河流。

河流含砂量与气候的干湿程度、周边植被情况、水土保持情况、湖水中泥沙的沉降时间等有关，就目前尼亚加拉河的含砂量而言，因为其含砂量较小，其对河道侵蚀的贡献相对较小。

### 4.5 瀑布形态的影响

瀑布的形态与河流的侵蚀作用关系密切，是河流侵蚀作用强弱的自然表现。从平直剖面、凹槽剖面到弧形剖面，河流侵蚀作用表现为从强到弱的演化[15-16]。目前马蹄瀑布正处于后退速度较小的弧形剖面时期[17]。

现代研究表明，瀑布侵蚀后退速度与瀑布的落差、跌水潭的深度成反比。在垂直方向上，现在马蹄瀑布的落差为 51 m，水潭深 56 m，垂直落差已达 107 m[8,10,17]，远远大于 12 000 年前的高度不足 11 m 的落差，后退速度变慢。

## 5 尼亚加拉河流的水资源开发及保护

### 5.1 水资源的利用

尼亚加拉河作为一条具有丰富水力资源的河流，为人类所注目。如今为加、美两国提供高达 440 万 kW 的电力。20 世纪 50 年代，为了更有效地利用尼亚加拉的水力资源进行发电，美国与加拿大两国签订了尼亚加拉河分水协议。根据加、美两国有关尼亚加拉河的分水协议，在保证旅游旺季时流过瀑布的水量为 2 832 $m^3/s$，其余时间的流量为 1 416 $m^3/s$ 的前提下，将其余水量用以发电[6,8,10]。加、美两国从瀑布上游将占尼亚加拉河总水量 1/2 ~ 2/3 的水引流到各自的水库，用于水力发电（两国水电站位置见图 2），从而使流过瀑布的水量大大减少，减轻了

河水对瀑布的侵蚀作用。

尼亚加拉瀑布作为世界自然奇观之一，引来无数旅游观光者，每年吸引游客多达 1 200 万人，是得天独厚的旅游资源。

### 5.2 水资源保护

加、美两国政府为保护瀑布，主要从保护尼亚加拉河周围环境，限制土地建筑设施，减缓瀑布的溯源侵蚀等几个方面入手。

加、美两国曾耗巨资修建了一些控制工程，使瀑布对岩石的侵蚀有所减小，从而大大降低了对河床的侵蚀作用。必须指出，上游的分流作用以及河道两侧的控制工程，使尼亚加拉瀑布的溯源侵蚀速度得到了有效控制，表明人类活动是控制瀑布后退速度的一个重要因素。

## 6 展 望

加、美两国对于尼亚加拉河的开发与保护做了大量工作，取得了显著的成绩。从目前尼亚加拉河水资源利用、控制流过瀑布的水量看，侵蚀作用已大大得到了控制。而且通过前面的分析可知 受各种自然因素与人类活动的共同作用，尼亚加拉河流的溯源侵蚀过程正在变慢。同时还可看到随着瀑布的南移，抗侵蚀的地层将进一步增厚，侵蚀面也将继续增高，加上人为控制，侵蚀速率也将更趋缓慢。

从瀑布上游河段看，从宽阔的河段到马蹄瀑布，也存在着侵蚀向右加剧的趋势（图 4），根据其目前的状态，可以预测在将来瀑布沿主河道向南侵蚀过程中，不会对两岸产生不利影响，并且仍可给人类留下较好的视角。

随着尼亚加拉瀑布溯源侵蚀速率的降低，在其缓慢上移过程中，由于美国瀑布与马蹄瀑布的流量不同，对河谷的冲刷作用也不同，估计几千年后当马蹄瀑布退到山羊岛上游时，美国瀑布将消失，山羊岛将成为名符其实的山羊岛——一个类似于山羊角的连接美国的小半岛。再过上数千年，尼亚加拉瀑布退到上游河叉处（图 2 左上），瀑布再一分为二，而后又汇合，直到消失到伊利湖中，形成更加壮观的瀑布，当然那将是数万年后的奇观了。

## 参考文献：


[1] CALKIN P E，BRETT C. Ancestral Niagara River drainage：stratigraphy paleontological setting [J]. Geol Soc Am Bull，1978，89：1140-1154.

[2] PENGELLY J W，TINKLER K J，PARKINS W G，et al. 12600 years of lake level changes，changing sills，ephemeral lakes and Niagara Gorge erosion in the Niagara Peninsula and Eastern Lake Erie basin [J]. Journal of Paleolimnology，1997，17(4)：377-402.

[3] JACKSON L J，ELLIS C，MORGAN A V，et al. Glacial lake levels and Eastern Great Lakes Palaeo-Indians：Geoarchaeology [J]. An International Journal，2000，15(5)：415-440.

[4] McFADDEN M A，MULLINS H T，PATTERSON W P，et al. Paleoproductivity of eastern Lake Ontario over the past 10 000 years [J]. Limnology and Oceanography，2004，49(5)：1570-1581.

[5] TINKLER K J，PENGELLY J W，PARKINS W G，et al. Evidence for high water levels in the Erie basin during the Younger Dryas chronozone [J]. Journal of Paleo-limnology (Historical Archive)，1992，7(3)：215-234.

[6] TINKLER K J，PENGELLY J W，PARKINS W G，et al. Postglacial recession of Niagara Falls in relation to the Great Lakes [J]. Quat Res，1994，42：20-29.

[7] Niagara Falls live. A Brief History of the Falls [Z]. http：//www.niagarafallslive.com/Facts_about_Niagara_Falls.htm，2005.

[8] Niagara Falls live. Facts about Niagara Falls [Z]. http：//www.niagarafallslive.com/Facts_about_Niagara_Falls.htm，2005.

[9] Info Niagara. The Niagara River“A National Wonder”[Z]. http：//www.infoniagara.com/attractions/river.html，2005.

[10] Niagara Falls Thunder Alley. Origins of Niagara-a Geological History [Z]. http：//www.iaw.on.ca/~falls/origins.html，2005.

[11] STRAHLER A N. 自然地质学(下) [M]. 丘元禧，译. 北京：地质出版社，1987：43-58.

[12] 刘新利，高宏山，高飞，等. 关于“验证科里奥利力对延河沿岸水土流失的影响”的调查分析 [J]. 延安大学学报，1997，16(1)：42-45.

[13] 杨学祥，陈殿友，孙春林. 均衡运动中的的科里奥利力 [J]. 地壳变形与地震，1995，15(3)：38-43.

[14] 谢宇平. 第四纪地质学及地貌学(上) [M]. 北京：地质出版社，1994：46-59.

[15] 何才华，熊康宁. 美国—加拿大尼亚加拉大瀑布的发育演化 [J]. 贵州师范大学学报：自然科学版，1996，14(2)：1-6.

[16] 殷瑞兰. 蜿蜒性河流演变机理研究 [J]. 长江科学院院报，2002，19(3)：15-18.

[17] TINKLER K J. ENTRE lACES. Niagara’s changing landscapes [M]. Ottawa：Carelton University Press，1994：368.


(收稿日期：2007-07-18 编辑：高渭文)