

夏季喀斯特洞穴小气候特征*

程寿全

(南京大学大地科学海洋系)

提 要

根据在贵州西部某些洞穴的小气候观测指出, 洞穴空气运动速度一般取决于洞口的数目及洞穴的形态; 洞穴内温度的高低一方面受制于地下水和岩石的热状况, 另一方面受洞穴空气运动的影响; 洞穴湿度的大小与洞穴风、洞穴形态及其地下水量有关。

由于喀斯特洞穴的存在, 产生了特殊的洞穴小气候。1986年7—8月, 作者在贵州省西部镇宁、关岭和普定三县考察了一些洞穴, 并用热球式电风速计和通风干湿表进行了小气候观测, 且作了初步研究, 得出了一些粗略结果。

一、洞穴空气运动

由于洞穴内、外的气压差, 地下水的流动, 洞内外及洞内各部位空气之间冷暖、干湿的差异, 引起了洞穴的空气运动。但各因素对洞穴空气运动的作用大小, 则取决于地下洞穴的结构及形态。洞穴内外气压差异, 对多洞口洞穴空气运动起作用, 使内外交换强烈, 空气流通快, 故称为“动态洞穴”; 而单洞口洞穴空气运动, 主要由洞内外及洞内各部位气温差异形成的, 气流缓慢, 故称为“静态洞穴”。

1. 气压差引起的洞穴风

地下洞穴的多个洞口所在的拔海高度、坡向及其周围的环境不同, 引起洞口之间及洞内外的气压差异, 使洞穴内外空气发生交换, 形成洞穴风。

两洞口之间拔海高度的不同可直接引起洞内外的气压差异, 形成所谓“烟囱效应”。根据Wigley和Brown^[1]提出的公式, 低洞口处内外部压力分别为

$$P_{int} = P_0 + \bar{\rho}_{int} gh$$

$$P_{ext} = P_0 + \bar{\rho}_{ext} gh$$

式中, P_0 为高洞口处气压, g 为重力加速度, h 为两洞口间高度差, $\bar{\rho}_{int}$ 和 $\bar{\rho}_{ext}$ 分别为两洞口间洞内、外空气柱的平均密度。冬季, $\bar{\rho}_{ext} > \bar{\rho}_{int}$, 洞内空气向上运动。夏季, $\bar{\rho}_{ext} < \bar{\rho}_{int}$, 洞内空气向下运动。例如, 镇宁双洞的南北两洞口拔海高差约 100m, 据我们观测, 夏季空气由较高的南洞口流向较低的北洞口。

两洞口所在坡向不同, 其间也存在气压差异。如穿山洞的一个洞口处于迎风坡, 另一个洞口位于背风坡, 他们的高度基本相同, 那么, 前者气压高于后者, 空气从迎风坡洞口流入, 从背风坡洞口流出。

两洞口所处的环境不同也能产生气压差, 形成洞穴风。如同一高度的两个洞口, 一个位于寒冷的树林内或山地的阴面, 而另一洞口位于比较温暖地段或处于向阳坡, 阴坡气压比阳坡高, 洞穴空气从阴坡洞口流向阳坡洞口。

2. 洞内外气温差异导致的洞穴风

据Bogli的研究^[2], 地下洞穴气温几乎与洞外年平均气温相接近。洞内的这种持续恒定的气温与洞外变化的气温形成了明显

* 本文属贵州省科委资助课题。

的对比。我们用当地气象站夏季考察日累年平均最高气温及1月平均最低气温与洞底温度相比，镇宁双洞两者之差分别为 11°C 和 -13.3°C ，普定黑风洞为 7.9°C 和 -17.7°C 。单洞口洞穴在夏季，洞内冷空气从洞口底部流出，洞外暖空气从洞口上部流入，进行周而复始的循环。例如，镇宁张嘴洞(单洞口)洞口处，10cm高度处气温为 17.6°C ，50cm高处为 18.5°C ，1.5m高处与外界大气温度一致为 23.2°C 。我们通过施烟试验，证实了这种气流循环的存在。在冬季，由于洞内外冷热源的倒置而形成与夏季相反的空气环流。

洞内各部位之间的温度差异也能引起洞穴风，但其作用甚小，常可形成不为人们所觉察的风速。

3. 抽吸作用引起的洞穴风

洞穴系统有几个支洞口位于不同的高度，主洞内由于气流或水流作用，使压力降低，对支洞中的空气形成抽吸作用，加强了洞穴风。如镇宁三元洞有上、中、下三层，其中高大的下层(主洞)有地下河，中、上两支洞与其连通。我们在中层和上层分别测得风速为 $0.32\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，均为从支洞口流向主洞。

4. 流水引起的空气运动

当洞穴内有流动的地下水时，由于流水的作用，可牵引其面上的空气一起运动，加强洞穴风。我们在镇宁三元洞和上洞的水面上分别观测到风速为 0.40 和 $0.12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，前者水流速度比后者大。可见流水引起的洞穴风的强弱与水流速度有关。

不同结构、不同形态的地下洞穴中上述四种因素的作用不同。一般来说，在多洞口洞穴中空气运动主要是由于洞内外之间的气压差所造成的；而单洞口洞穴风是由于洞内外及洞内各部位之间的温差所致；抽吸作用是多层次洞穴空气运动的主要原因；而流水牵引作用则是地下河洞穴风的恒定以至主导

因素。

二、洞穴气温

洞穴的气温一方面决定于地下水和岩石的热状况，另一方面决定于洞内外空气的交换程度。而洞穴风的大小受洞穴的规模及形态的影响。因此，各个洞穴的气温不尽一致，有所谓“冷洞”和“暖洞”之分。

空气的容积热容量是水的容积热容量的 $\frac{1}{3200}$ ，是石灰的 $\frac{1}{1820}$ [2]；洞内空气或进入洞内的空气会迅速适应水或石灰岩的温度，洞内某点的气温升降很小。

下面分别讨论不同规模、不同形态洞穴的气温分布情况。

1. 水平大洞穴

该类洞穴地面起伏很小，几乎是水平的，而且规模较大。夏季气温由洞口向里逐渐降低，并且趋于一个渐近值(如图1)。此值大小与洞外年平均气温相近。镇宁张嘴洞和关岭熬硝洞的渐近值分别为 14.5°C 和 18.2°C 。

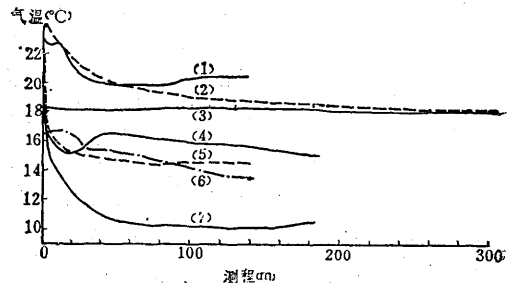


图1 洞穴气温分布

- (1) 三元洞上层(多云)；(2) 熬硝洞(晴)
 (3) 上洞(晴)；(4) 园口洞(多云)；(5)
 张嘴洞(多云)；(6) 柑子树洞(晴)；(7)
 黑风洞(雨)

而当地的气象站年平均气温分别为 15.0°C 和 16.2°C 。可见，较大洞穴内气温具有地带性特征。

2. 向下倾斜的洞穴

这类洞穴的气温由洞口向下急剧降低，到了一定的深度也趋向渐近值。此值低于洞外年平均气温，因而称为“冷洞”。这是由于

地下积水和岩石的低温所致。由图1可见,关岭柑子树洞(洞底有大量积水)的渐近值为 13.5°C ,比当地气象站年平均气温低 2.7°C ;普定黑风洞的渐近值为 10°C ,比当地气象站年平均气温低 5.1°C 。黑风洞内大厅(比洞口约低100m,有15cm深的积水)水温与气温一致。但是,据俞锦标等人观测,该洞后半部温度逐渐升高,距洞口约250m处(大厅)气温约 15.2°C [3],与当地气象站年平均气温相同。这是由于较高的岩体温度和洞穴地面升高的增温效应造成的。

3. 大水体洞穴

此类洞穴具有相当容量水体的暗河,水体的热容量足以影响整个洞穴空气,使洞内气温差异极小,均趋于水体温度。镇宁上洞可垂直分为3层,下层为现今的地下河廊道,考察时为汛期,水深平均1m多。已测河道长度为1194m*。由于受横亘廊道巨大岩块之阻,未能深入其中探测,仅在测程200m处登岸。中、上两层为旱洞。该洞溶空总高度为63m。据我们观测,上洞的上、中、下三层气温无差异,与水温(18.2°C)一致(见图1)。

4. 地面起伏较大的洞穴

此类洞穴洞内风速较小,深处受外界环境的影响微弱,气温随地面升降而增减。例如镇宁双洞的北洞口比南洞口高100m,洞内起伏不平,气温差异较大(图2),且随地面

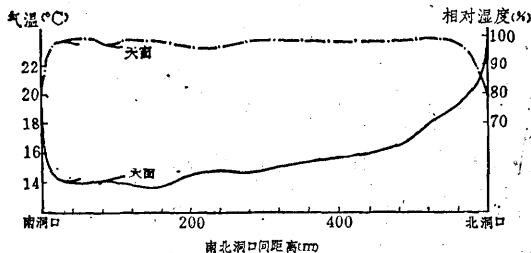


图2 双洞气温及相对湿度分布
(1986年8月6日,晴)
实线为气温,点划线为相对湿度

升降而增减。这主要是由于暖空气密度小而上升,冷空气密度大下沉所致。

5. 气温“反弹”现象

如图1所示,某些洞穴内气温变化曲线在离洞口10—50m处出现拐点,即所谓气温升高的“反弹”现象。这是由于下列原因造成的:(1)支洞渗透的洞外暖空气;(2)洞穴积水;(3)凝结潜热的释放;(4)拐点前后出现蒸发吸热现象。

洞穴气温与大气温度一样也具有日变化。其日变化是由洞外动态环境影响而产生的,所以变化振幅由洞口向洞底逐渐减小,极值出现时间逐渐落后。日变化波及的深度与洞口的形状有关。洞口愈开阔,波及愈深;反之,洞口愈封闭,波及愈浅。如双洞有南北两个洞口,前者为封闭型,后者为开阔型。观测(图3)表明,两洞口外气温最高值出

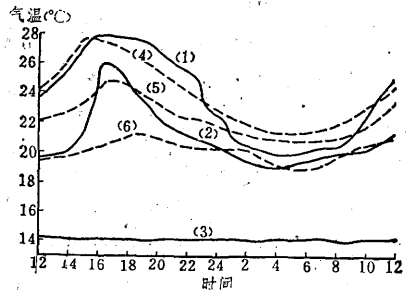


图3 双洞1986年8月6—7日
(晴)气温日变化

(1)南洞口外,(2)南洞口;(3)南洞口内20m处;(4)北洞口外;(5)北洞口;
(6)北洞口内20m处

现在15时前后,洞口最高值约落后1小时,向洞内延伸,落后时间加长,距北洞口20m处约落后3小时,其变化振幅随之逐渐减小。距封闭型南洞口20m处气温无日变化现象。

三、洞穴湿度

洞穴的湿度与洞穴风、洞穴规模、洞口形态及地下水有关。根据对贵州几个洞穴观测可知,除了入口区洞穴风向内吹时以外,相对

* 安顺地区农业区划办公室、镇宁布依族苗族自治县农业区划办公室合编,镇宁县旅游志,1985,5。

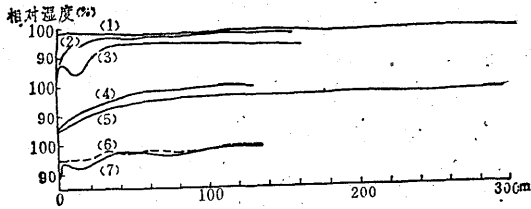


图4 洞穴相对湿度分布

- (1) 上洞(晴); (2) 张嘴洞(多云);
 (3) 三元洞上层(多云); (4) 黑风洞(雨);
 (5) 熬硝洞(晴); (6) 对门洞(雨);
 (7) 柑子树洞(晴)

湿度一般都比较高,在90—100%之间(图4)。例如在双洞风向内吹的北洞口附近(见图2),相对湿度较低,往往低于80%,在距洞口不到20m处,相对湿度已高达98%。由此向内,相对湿度变化不大,均接近100%。可见,洞穴内湿度不随地面起伏而变。在大水体洞内,相对湿度一般较高,而且洞内各部位几乎一致。如上洞相对湿度均为98%。另外由图4还可以看出,相对湿度分布曲线与温度一样也存在“反弹”现象。

洞穴内相对湿度也具有日变化。日变化的振幅随洞穴的延伸而逐渐减小。由图5可见,在距洞口20m处,相对湿度均无明显的日变化了。对比图3和图5可见,相对湿度日变化波及的深度不如气温日变化波及的深。

四、小结

喀斯特洞穴空气运动、温度及湿度一般取决于洞口的多少、洞穴的规模和形态及流

入的地下水量。洞穴风主要由4种因素所引起:(1)洞内外气压差异;(2)洞内外气温差异;(3)抽吸作用;(4)流水牵引作用。洞穴气温还与地下水和岩石热状况及洞穴风有关。洞穴内相对湿度一般很大(90—100%)。

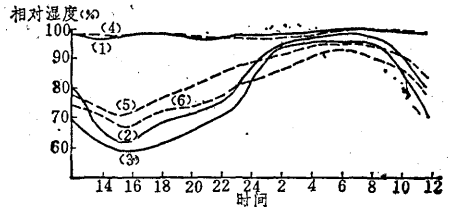


图5 双洞1986年8月6—7日相对湿度日变化(晴)

- (1)南洞口内20m处;(2)南洞口;(3)南洞口外;(4)北洞口内20m处;(5)北洞口;(6)北洞口外

洞穴气温和湿度日变化振幅由洞口向内逐渐减小,极值出现时间逐渐落后,日变化波及的深度与洞口形态有关。

致谢:本文承蒙朱炳海教授、虞静明老师提出宝贵意见,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] T. M. Wigley, M. C. Brown, The physics of caves, The science of speleology, edited by T. D. Ford and C. H. D. Cullingford. London, 1976, p329—344.
 [2] A. Bögli, Karst hydrology and physical speleology, translated by J. C. Schmid, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1980, p214—226.
 [3] 俞锦标等,喀斯特洞穴小气候,南京大学学报(地理学),1935, p49—58。

The microclimatic characters in the karst cave

Cheng Shouquan

(Department of Geo and Ocean Sciences, Nanjing University)

Abstract

Based on the investigation of the microclimate in some caves in western Guizhou Province, the author proposes that the wind speed in a cave depends on the number of mouths of the cave and the shape of it. The air temperature in a cave is determined by the thermal character of groundwater or rock and by the air movement in it. The humidity in a cave is related not only with the wind in the cave and the shape of the cave, but also with the volume of groundwater the flows into the cave. Normally, the relative humidity is 90—100%, except for the mouth's area of the cave through which wind is blowing.