

文章编号:1001-4810(2000)02-0180-08

路南石林地区土壤空气中 CO₂ 浓度分布规律与土下溶蚀形态研究*

梁福源¹, 宋林华¹, 王富昌², 郑炳元², 张丽萍²

(1. 中国科学院地理研究所, 北京 100101; 2. 石林风景名胜区管理局, 云南石林 652211)

摘 要:研究了路南石林地区不同植被、石灰岩表面溶沟内土壤空气中 CO₂ 浓度的分布规律及石牙—土壤接触带土壤空气 CO₂ 浓度。讨论了土下溶蚀形态特征与土壤 CO₂ 浓度分布规律间的对应关系。研究表明,土下溶蚀形态主要发育在土下 0.20~0.60m 处,与土壤空气 CO₂ 浓度分布规律相吻合;不同植被对土壤 CO₂ 浓度的影响次序为:人工草坪>柏树林>天然草被>松林>无植被耕地;有土溶沟中土壤水的溶蚀能力比无土壤溶沟水高出一倍到几倍;与 CO₂ 处于动力平衡的土壤水的潜蚀能力达到 73.242~202.275mg/l。
关键词:路南石林;土下溶蚀形态;土壤空气中 CO₂
中图分类号:P931.5 **文献标识码:**A

土下溶蚀形态是在土壤覆盖下土壤水或有机酸对石灰岩的溶蚀或腐蚀作用所形成的各种形态,是温带、热带、亚热带的喀斯特发育环境和强度的标志之一。土下溶蚀形态是石林景观的重要组成部分。研究石林地区的土下溶蚀形态及其成因机制对于认识石林的形成过程和保护具有重要的意义^[1,2]。

土下溶蚀形态形成于土下,是表层土壤水溶蚀作用的最直接的证据。本文试图通过研究土壤空气中 CO₂ 浓度的分布规律及土下溶蚀形态的特征,探讨土壤空气 CO₂ 对溶蚀过程的驱动作用。

1 石林地区土下溶蚀形态类型及特征

1.1 土下溶蚀形态类型

土下溶蚀形态一般以凹进的负地形为主。土下石灰岩体的表面一般比较光滑,没有很尖的

* 基金项目:石林研究基金项目资助(199903)
作者简介:梁福源(1975—),男,硕士生,1997年毕业于长春地质学院地质系,1997年考入中国科学院地理研究所,主要从事高原数据研究。
收稿日期:2000-04-30

棱角^[3]。土下溶蚀形态的规模较小,其间常有穿孔相通。石林地区的土下溶蚀形态比较简单,一般可分为如下几种类型:

水平溶沟:指那些发育于石灰岩石牙、石柱与土壤的接触带的水平凹痕。一般长约 1m,长者可达 2~3m;沟高为 0.3m,大者可达 0.4m;沟深一般为 0.10~0.30m。在出露的石牙或石柱上常发育规模大小不一的数期次的水平溶痕。

竖直溶槽:指发育于石灰岩体上的垂向凹沟或凹槽。其规模一般小于水平溶槽,高约为 0.3~0.5m,深为 0.1m。

穿洞:指形态大小不一、穿透石灰岩的圆形或椭圆形的洞穴。穿洞发育规模大小不一,大者直径可达 0.74m,小者亦有 0.28m。

溶碟:指在石灰岩面上为薄层土壤所覆盖的小型封闭的溶蚀负地形。深者如盘,表现为底平、壁陡,直径几厘米至 1m,深几厘米至几十厘米。

倒钩状溶纹:指发育于一整块岩石表面上、形态极不规则的刺状的溶蚀形态。

石林地区的土下溶蚀形态还有弧形、扇形的溶槽、深溶坑。在不同的土壤深度下发育的溶蚀形态在规模、形态上均有较大的差异。

1.2 土下溶蚀形态空间发育特征

在出露地表的石牙或石柱上常发育规模大小不一的溶痕和穿洞。在同一石牙或石柱上还常常叠加发育不同期次的水平溶痕。为了解土下溶蚀形态的发育规律,我们对石林景区内 120 个土下溶痕的高度(H)、埋深深度(D)、溶痕深度(d)及 12 个穿洞的埋深深度等进行了测量和统计分析。其中,溶痕高度指溶痕上下边沿的垂向距离,埋深深度指溶痕凹进最深处与土下溶蚀(形态光滑)和气下溶蚀(形态粗糙)分界线的垂向距离,溶痕深度指其凹进的最大深度(如图 1 所示),穿洞埋深深度指穿洞最上沿与土下溶蚀和氣下溶蚀分界线的垂向距离。

统计结果表明,溶痕高度最大值为 130cm,最小值为 6cm,均值为 32cm,29% 的高度值落在 10~20cm 区间内,75% 的高度值则落在 10~40cm 区间内;溶痕深度最大值为 103cm,最小值为 2cm,均值为 26cm,29% 的深度值落在 10~20cm 区间内,70% 的深度值则落在 0~30cm 区间内;溶痕埋深深度最大值为 158cm,最小值为 0cm,均值为 42cm,43% 的埋深深度值落在 20~40cm 区间内,72% 的埋深深度值则落在 20~60cm 区间内;而穿洞土下埋深深度多出现在 30~40cm 区间及 70~80cm 区间内,两区间均分别占 25%。总之,土下溶痕的埋深深度一般约在 20~60cm,而穿洞的埋深深度则在 30~40cm 和 70~80cm 范围内。

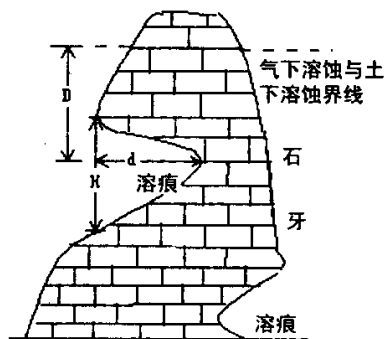


图 1 土下溶痕形态参数示意图

Fig. 1 Shape parameters of subsoil karren

2 路南石林地区土壤空气中 CO_2 浓度分布

土壤首先数据 O_2 为植物根系呼吸、微生物活动及大气扩散输入的混合^[4]。 CO_2 的浓度受

土壤的通气性、土壤生物化学过程的强度、气象条件及植被的影响^[5]。在不同土壤结构、不同的植被条件下,土壤空气中 CO₂ 浓度会有很大差别。

2.1 植被对土壤空气 CO₂ 浓度的影响

路南石林地区,土壤类型主要为红壤、紫色土及水稻土。主要植被类型为云南松林、柏树林、石灰岩刺柏灌木、天然草被、人工草被。土壤空气中 CO₂ 浓度测量用日本产 GASTEC801 抽气筒和 GASTEC 二氧化碳测管进行测量。1999 年 4~6 月对石林地区不同植被覆盖下的红土中 CO₂ 进行了测量,结果如图 2 所示。

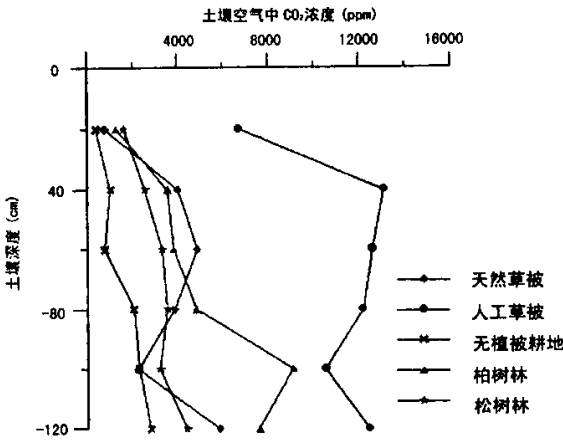


图 2 不同植被下土壤空气中 CO₂ 浓度

Fig. 2 CO₂ concentration in soil covered with different vegetations

图 2 表明,人工草被下不同深度土壤空气中 CO₂ 浓度较高,最大值达 13100ppm (—40cm),远远超过松林、柏林及天然草被下的土壤 CO₂;最低是无植被耕地,其最大值仅为 2800ppm。以土下 40~60cm 为例,石林地区不同植被下土壤空气中 CO₂ 浓度大小次序为:人工草被>柏树>天然草被>松树>无植被耕地。在不同土壤深度下,以天然草被及人工草坪下的 CO₂ 浓度变化最大,而且其最大浓度多出现在—60cm 或—120cm 处。

2.2 石灰岩表面溶沟内土壤空气中 CO₂ 浓度

在雨水的溶蚀和侵蚀作用下,石灰岩的表面形成溶窝和较深的溶沟系统。在这些形态中,常常会残积一定厚度的土壤,其上还生长有小草、灌木等植被。石林地区石灰岩溶沟内土壤一般厚 0.3m 左右,最厚不超过 0.5m。石林景区内几个溶沟系统土壤空气中 CO₂ 测量结果列于表 1。

各测点的土壤 CO₂ 浓度均指土壤与石灰岩界面处的浓度。表 1 表明,薄层土壤空气中 CO₂ 浓度也要比一般空气中 CO₂ 浓度高数倍到数十倍。有无土壤的溶沟水的溶蚀能力相差很大。石林地区部分溶沟内有土壤及植被,部分溶沟则没有。为区分有无土壤对石灰岩溶蚀的影响,将所采集的水样分为两种类型,分析结果如表 2 所示。

表 1 石灰岩表面溶沟内土壤空气中 CO₂ 浓度

Tab. 1 Soil CO₂ concentration in limestone solution gully system

点号	采样日期	采样地点	植被土壤状况	土壤深度 (cm)	CO ₂ 浓度 (ppm)
No. 1	6. 20	天然舞场	石牙表面溶沟,红土,沟宽 30 厘米	—25	1600
No. 2	6. 20	天然舞场	石牙表面溶洼,红土	—15	2200
No. 3	6. 20	天然舞场	石牙表面溶洼,褐土,植被根系发育	—20	4200
No. 4	6. 20	异境天开	红土,有机质丰富	—10	900
No. 5	11. 19	天然舞场	石牙表面溶沟,红土,上覆树叶	—40	1500
No. 6	11. 19	天然舞场	石牙表面溶洼,褐土,植被根系发育	—12	1200
No. 7	11. 22	莲花池	石牙表面溶坑,褐土,长有小树	—15	3600
No. 8	11. 22	石监狱点 1	石牙表面裂隙	—16	3800
No. 9	11. 22	石监狱点 2	褐土,杂草	—31	2000
No. 10	11. 22	石监狱点 3	褐土,杂草	—12	1000
No. 11	11. 22	唐僧石	溶蚀裂隙,褐土,杂草	—12	2100
No. 12	11. 23	步哨山顶	褐土,长苔藓及草	—8	650
No. 13	11. 23	步哨山	石牙溶沟,红土,杂草	—20	2000
No. 14	11. 23	步哨山	石牙上溶坑,红土,草	—40	6000

表 2 有无土壤、植被的溶沟水的化学成分

Tab. 2 Chemical compositions of gully water influenced by soil and vegetation

水样类型	样品数	pH	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	电导率(μs/cm)
无土壤及植被	4	8. 1~8. 9	55. 06~74. 88	13. 43~20. 04	86~177
有土壤及植被	15	7. 7~8. 6	75. 62~198. 22	36. 47~90. 58	187~458

从表中的分析结果可以看出,有土的溶沟水的 HCO₃⁻、Ca²⁺、电导率均比无土的溶沟水高,而 pH 值则较低。有土的溶沟水的溶蚀能力是无土的溶沟水的一倍到数倍。

2.3 石牙与土壤接触带土壤空气中 CO₂ 浓度

石牙表面比较光滑,是一种特殊的土下溶蚀形态,出露地表部分的高度一般不超过 3~5m 的石体。为了研究石牙的形成过程,我们在石屏风附近的人工草坪上选择了一个出露地表高约 2m 的石牙,对其下部土壤盖层中的 CO₂ 的浓度进行了详细的测量,测量点的平面间距为 0. 2m,垂向测距间隔 10cm,测量结果列于表 3 中。

表 3 表明,即使是在很小范围内,土壤空气中 CO₂ 浓度差别很大,差值可达 1000~9000ppm。在土壤深度超过 60cm 的 B₁、B₂、B₃、C₁、C₂ 等点,土壤空气 CO₂ 浓度的最大值均出现在 -60cm 处。土壤层较厚的岩土界面处的 CO₂ 浓度一般比较高,如 B₁ 在 -60cm 处达 18840ppm,C₁ 和 C₂ 在 -100cm 处也分别达到 8000 ppm 和 10000 ppm。而 A₁、A₂、B₃ 等点由于土壤层较薄(<10cm),土壤 CO₂ 容易向大气中释放,导致土壤 CO₂ 浓度较小。

表 3 石牙基部岩土界面土壤空气中 CO₂ 浓度 (单位:ppm)

Tab. 3 Soil CO₂ concentration along soil-rock interface at stone teeth base

点号	土 壤 深 度 (cm)								
	10	20	30	40	50	60	70	80	100
A ₁	1000								
A ₂	2200								
B ₁	4000	10000		11200		19000			
B ₂			13000		9000	14000	13000		
B ₃	4000								
C ₁	6000			16000		18000		8000	8000
C ₂	6000		12000		15000	16000		5600	10000
C ₃	10000		12000						

狮子山的山腰或山脚下,土下溶蚀形态发育。在数个石牙与土壤接触带,我们选择 7 个点,分别测量了土壤空气中 CO₂ 的浓度,其结果如图 3 所示。

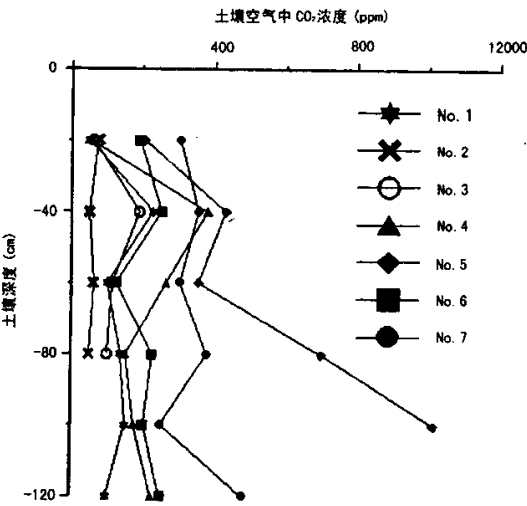


图 3 狮子山地区石牙—土壤界面处 CO₂ 浓度分布图(1999 年 6 月 5 日)

Fig. 3 Soil CO₂ concentration along soil-stone teeth interface

测量结果表明,除了 No. 5 在土壤深度为 40cm 时 CO₂ 浓度超过 4000ppm,继而随土壤深度加大,土壤 CO₂ 浓度也增加,在 100cm 处超过 10000ppm。而其它几个点,在不同土壤深度 CO₂ 浓度均小于 4000ppm(除 No. 7 点—120cm 处外)。在浅层土壤(≤60cm)中,几乎所有的测量点(除 No. 2 外)均在土下 40cm 处出现 CO₂ 浓度的最大值。

干旱季节,石牙与土壤界面一般均有宽 5cm 左右的裂缝,这为土壤水的下渗提供了良好的条件,往往也是土壤空气向大气扩散的通道,从而降低了土壤空气中 CO₂ 的浓度。

3 土壤潜在溶蚀强度的估算

万方数据

土壤空气中的 CO₂ 浓度要较大气中的高出数十倍到数百倍。在一个开放的地球化学系统

中,液相 H₂O、气相 CO₂ 和固相的石灰岩在喀斯特系统中处于动态平衡过程。土壤水在土壤介质中缓慢地向下渗流,在下渗过程,就有足够的时间吸收土壤 CO₂,因此土壤水和土壤空气 CO₂间能达到溶解动力平衡,大幅度提高了土壤水溶蚀石灰岩的能力。L. Zambo et. al^[6]研究了一个洼地内土壤空气中的 CO₂ 浓度、温度、湿度、入渗量等因素,从而得出洼地内不同部位的潜在溶蚀强度,其平均溶蚀潜力为 17g/m²·a。土壤 CO₂ 浓度的季节变化在泉水、土壤水水化学性质上均能表现出来,并且 CO₂ 浓度与溶蚀率正相关^[7~9]或与土壤 CO₂ 浓度梯度成正比^[10]。根据开放的地球化学系统中的溶解平衡可以估算土壤水的溶蚀潜力。

在一个开放的地球化学系统中,存在如下平衡关系:

CO₂(g)=CO₂(a)(1)

CO₂(a)+H₂O=H₂CO₃ 或 (H₂CO₃)=K_{CO₂}×P_{CO₂}(2)

H₂CO₃=H⁺+HCO₃⁻ 或 (HCO₃⁻)=K₁×(H₂CO₃)×(H⁺)⁻¹(3)

HCO₃⁻=H⁺+CO₃²⁻ 或 (CO₃²⁻)=K₂×(HCO₃⁻)×(H⁺)⁻¹(4)

CaCO₃=Ca²⁺+CO₃²⁻ 或 (Ca²⁺)=K_C×(CO₃²⁻)⁻¹(5)

H₂O=H⁺+OH⁻ 或 (OH⁻)=10⁻¹⁴×(H⁺)⁻¹(6)

其中,()表示该离子的浓度,K 表示平衡常数,P_{CO₂}为 CO₂ 的分压。

根据化学平衡方程式,可以计算出在一定土壤 CO₂ 浓度下土壤水对石灰岩的溶蚀量(SONG,1998)。为简化计算,在计算潜在溶蚀强度时,土壤中的温度采用石林地区的年均温度 15.5℃^[11],在此温度下,K_{CO₂}=10^{-1.347},K₁=10^{-6.424},K₂=10^{-10.435},K_C=10^{-8.423}^[12],CO₂ 浓度采用岩石—土壤界面处的 CO₂ 浓度。计算结果列于表 4。

表 4 土壤潜在溶蚀强度估算

Tab.4 Evaluation of potential solution rate in soil

点号	采样日期	采样地点	采样环境描述	岩土界面深度 (cm)	岩土界面 CO ₂ 浓度 (ppm)	pH	潜在溶蚀强度 (mg/l)
No. 1	6. 20	大三弦广场	石牙溶蚀缝隙	25	1600	7. 815	88. 895
No. 2	6. 20	大三弦广场	石牙溶蚀缝隙	45	2200	7. 723	98. 759
No. 3	6. 20	大三弦广场	石牙溶蚀缝隙	20	4200	7. 536	122. 391
No. 4	6. 20	大三弦广场	石牙溶蚀缝隙	10	900	7. 982	73. 242
No. 5	6. 20	石屏风	石牙基部	10	1000	7. 952	75. 683
No. 6	6. 20	石屏风	石牙基部	10	2200	7. 723	98. 759
No. 7	6. 20	石屏风	石牙基部	60	19000	7. 101	202. 275
No. 8	6. 20	石屏风	石牙基部	66	13000	7. 215	177. 095
No. 9	6. 20	石屏风	石牙基部	15	3800	7. 564	118. 318
No. 10	6. 20	石屏风	石牙基部	97	7600	7. 363	149. 306
No. 11	6. 20	石屏风	石牙基部	100	9600	7. 295	161. 211
No. 12	6. 20	石屏风	石牙基部	25	12000	7. 239	172. 348

表 4 说明人工草被下土壤水对石灰岩的溶蚀潜力达到 75~99 mg/l (地表下 10cm)到 177~202mg/l(地表下 60~100cm)。虽然土壤厚度不大,仅 10~45cm,土壤水的溶蚀潜力却达到 73.242~98.759mg/l,最大为 122.391mg/l。上述潜在溶蚀强度是基于土壤空气中 CO₂ 浓度计算得出的,实际上,土壤对石灰岩的溶蚀作用包括土壤水对石灰岩的化学腐蚀作用和机械破坏作用^[13],另外,土壤中其它有机酸也会进一步增强土壤水的溶蚀强度^[14]。因此,土壤水对石灰岩的溶蚀将高于本理论计算值。

4 几点初步认识

(1) 土下溶蚀作用形成的穿洞和水平溶痕主要分布在土下 0.20~0.60m 段,土壤中 CO₂ 浓度在土下 0.4~0.6m 出现最大值,因此,土下溶痕埋深深度与土壤 CO₂ 浓度分布有一定的对应关系。

(2) 在不同植被覆盖下,土壤空气 CO₂ 浓度具有很大的差别。土下 40~60cm,不同植被下土壤 CO₂ 浓度的大小顺序为:人工草坪>柏树林>天然草被>松林>无植被耕地。

(3) 当石灰岩溶沟中有土时,虽然土层不厚,但有土壤溶沟水的溶蚀能力比无土壤溶沟水高出一倍到几倍。

(4) 石林地区土壤—岩石接触带空气中 CO₂ 浓度为 900~19000ppm,与其处于动力平衡的土壤水的潜在溶蚀能力达到 73.242~202.275mg/l。实际溶蚀能力将高于计算所得的潜在溶蚀能力。

参考文献:

[1] CHEN Zhiping, SONG Linhua & M. M. SWEETING, 1986. The pinnacle karst of the Stone Forest, Lunnan, Yunnan, China; an example of a subject karst[A]. In: K. Paterson and M. M. SWEETING; New Directions In Karst. , Geo Books[C]. 1986:597—608.

[2] SONG Linhua, 1996. The stone forest landscape and its value as a tourist attraction[A]. In: Joan—J FORN6S and Angel GIN6S; Karren Landforms[C], Universitat de les Illes Balears, 1996:421—432.

[3] 袁道先, 蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆出版社,1988.

[4] Fritz,P Mozeto A A and Reardon E. J. Practical consideration on carbon isotope studies on soil carbon dioxide[J]. Chemical Geology(Isotope GEOSCIENCE SECTION),1985,58:89—95.

[5] 俞锦标等. 贵州普定县岩溶地区土壤空气中 CO₂ 含量分布及溶蚀作用的研究[J]. 中国岩溶,1985,4(4):325—331.

[6] L. Zamble &D. C. Ford Limestone dissolution processes in Beke doline Aggtelek National Park,Hungary[J]. Earth surface processes and landforms . 1997,22:531—543.

[7] 何师意,徐胜友,张美良. 岩溶中土壤 CO₂ 浓度、水化学观测及其与岩溶作用的关系[J]. 中国岩溶,1997,16(4) :319—323.

[8] 刘再华. 桂林岩溶水文地质试验场岩溶水文地球化学的研究[J]. 中国岩溶,1992,11(3):209—217.

[9] 刘再华,何师意,袁道先 土壤中的 CO₂ 对岩溶作用得驱动作用[J]. 水文地质与工程地质,1998,4:42—45.

[10] 徐胜友等. 碳酸岩土壤 CO₂ 的动态特征及对溶蚀作用的驱动作用[J]. 中国岩溶,1996,15(1~2).

[11] 石林研究数据. 路南石林喀斯特研究[M]. 云南科技出版社,1996.

[12] Derek Ford & Paul Williams. Karst Geomorphology and Hydrology[M]. UNWIN HYMAN,1989:42—81.

- [13] 宋焕荣, 黄尚瑜. 喀斯特发育过程中的化学溶解和物理破坏作用[A]. 喀斯特地貌与洞穴研究[C]. 科学出版社, 1990: 172—181.
- [14] Stephen Trudgill, Limestone Geomorphology[M]. Longman, 1985.

THE CASE STUDY OF SUBSOIL SOLUTION FEATURES AND SOIL CO_2 CONCENTRATION IN STONE FOREST REGION, LUNAN, YUNNAN, CHINA

LIANG Fu-yuan¹, SONG Lin-hua¹, WANG Fu-chang²,

ZHENG Bing-yuan², ZHANG Li-ping²

(1. *Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Administration Bureau of Stone Forest National Park, Yunnan Shilin 652211, China*)

Abstract: Soil CO_2 concentration (SCC) in gully and soil-rock interface in Lunan Stone Forest was studied to find the relationship between SCC and subsoil solution features. Results show that (1) the subsoil solution feature mainly formed at depth 0.2~0.6m below the ground surface, where SCC is max; (2) the influence of different vegetations on SCC ranges in such a decreasing order: vigorous lawn→cypress forest→scattered grassland→pine forest→cultivated land without vegetation; (3) the solution capacity of soil water in gully with soil is a few times more than that of water in gully without soil, (4) the potential solution capacity of soil water in equilibrium with soil CO_2 is estimated from 73.242 mg/l to 202.275 mg/l in the period from April to June, 1999.

Key words: Lunan stone forest; Subsoil solution features; Soil CO_2 concentration
万方数据