

4 种植物直根抗折力和抗折强度的研究

张欣¹, 刘静², 郑永刚², 尹瑞平¹, 吴永胜¹, 郭建英¹

(1. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古农业大学 生态环境学院, 呼和浩特 010019)

摘 要:以柠条(*Caragana microphylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙柳(*Salix psammophila*)和白沙蒿(*Artemisia sphaeroceph*)的直根为研究对象,采用 TY-8000 伺服式强力机进行两端固定式折断试验,研究了土体内的根系受到径向折断力作用时,不同径级直根的抗折力和抗折强度。结果表明:在 1~6 mm 径级范围内,4 种植物直根抗折力随根径的增加均呈幂函数增长趋势,抗折强度随根径的增加呈幂函数减小趋势;在 $\alpha=0.05$ 的显著水平下,4 种植物直根平均抗折力、抗折强度种间差异性均显著。随着径级的增加,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿 4 种植物直根平均抗折力范围分别为 $(79\pm 5.8)\sim(1\ 119\pm 104.46)$, $(32\pm 6.12)\sim(410\pm 36.1)$, $(12\pm 1.5)\sim(141\pm 6.2)$, $(8\pm 1.2)\sim(100\pm 2.56)$ N,直根平均抗折强度范围分别为 $(62\pm 9.68)\sim(43\pm 4.01)$, $(25\pm 3.82)\sim(15\pm 1.42)$, $(8\pm 1.01)\sim(6\pm 1.29)$, $(6\pm 0.61)\sim(4\pm 0.14)$ MPa。1~6 mm 径级范围内,4 种植物种内径级间平均最大折断变形量差异性不大,平均最大折断变形量排序为柠条(16.77 mm)>沙柳(14.7 mm)>沙棘(11.22 mm)>白沙蒿(8.68 mm)。

关键词:直根; 抗折特性; 径级

中图分类号:Q947.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)05-0338-05

Study on the Anti-Fracture Mechanical Properties of Four Kinds of Straight Roots

ZHANG Xin¹, LIU Jing², ZHENG Yonggang², YIN Ruiping¹, WU Yongsheng¹, GUO Jianying¹

(1. Institute of Water Conservancy Science, Ministry of Water Resources in Inner Mongolia, Hohhot 010020, China; 2. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract:Fixed-ends broken experiments were set up by the TY-8000 servo-type powerful machine in this study, the straight roots of *Caragana microphylla*, *Hippophae rhamnoides*, *Salix psammophila* and *Artemisia sphaeroceph* were used as test material to find the difference about anti-fracture forces, the anti-fracture strength between straight roots of diameter grade while the roots in the soil body was affected by the radial fracture force perpendicular to the axis of the root. The result showed that within the scope of the 1~6 mm diameter, anti-fracture forces of straight root had a power growing pattern with the increase of root diameter, but anti-fracture strength reversed; there were significant differences on the average anti-fracture forces, anti-fracture strength of taproot of four kinds plant species under significant level $\alpha=0.05$. With the diameter increase, the range of the average anti-fracture forces of four kinds of plants taproot of *Caragana microphylla*, *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Artemisia sphaeroceph* were $(79\pm 5.8)\sim(1\ 119\pm 104.46)$, $(32\pm 6.12)\sim(410\pm 36.1)$, $(12\pm 1.5)\sim(141\pm 6.2)$, $(8\pm 1.2)\sim(100\pm 2.56)$ Newton, while the ranges of the average anti-fracture strength of four kinds of plants taproot of *Caragana microphylla*, *Salix psammophila*, *Hippophae rhamnoides* and *Artemisia sphaeroceph* were $(62\pm 9.68)\sim(43\pm 4.01)$, $(25\pm 3.82)\sim(15\pm 1.42)$, $(8\pm 1.01)\sim(6\pm 1.29)$, $(6\pm 0.61)\sim(4\pm 0.14)$ MPa, respectively. Within the scope of the 1~6 mm diameter, the average of maximum broken deformation was no difference between 4 plants, the order of the average of maximum broken deformation was *Caragana microphylla* (16.77 mm)>*Salix psammophila* (14.7 mm)>*Hippophae rhamnoides* (11.22 mm)>*Artemisia sphaeroceph* (8.68 mm).

Keywords:straight root; anti-fracture features; diameter grade

收稿日期:2015-08-06

修回日期:2015-11-06

资助项目:国家自然科学基金“根系固土抗蚀受损后自我修复的力学特性”(51364034);内蒙古自治区水利科研专项“神东煤矿采煤塌陷区水土保持植被配置应用研究”

第一作者:张欣(1972—),女,河北青河县人,硕士研究生,研究方向为水土保持研究。E-mail:nmmkszx@163.com

通信作者:刘静(1958—),女,湖北钟祥人,博士,教授,主要从事水土保持研究。E-mail:Ljing58@126.com

近年来,随着国家逐步加大对基础设施项目的投资力度,公路、铁路建设项目持续增多。在山区道路工程建设中,坡面的开挖必定破坏已有的植被覆盖层,可能导致出现严重的水土流失以及产生大量次生裸地现象,同时造成生态环境的严重破坏,边坡岩土体的滑坡、崩塌、泥石流等的失稳破坏形式还会间接给人民生命以及财产带来巨大的损失。

在边坡稳定方面,植物措施已经得到广泛的应用^[1-3]。目前众多研究主要集中于根系提高土壤抗冲性、抗剪性以及根系抗拉特性等方面进行研究,以此作为根系固土机理以及边坡防护树种的选择依据。根系在土壤中主要起到锚固^[4-5]和加筋作用,由于根系呈网络状分布生长在土壤中,与无根土相比,根—土复合体的抗剪能力明显提高^[6],穿插生长在土体中的植物根系通过提高根—土接触面的摩擦力,进而直接导致土体的抗剪强度^[7]增加。根系在与土壤颗粒紧密结合,不仅能加固土壤的稳定性,同时从土壤中吸收大量的水分、养分来促进植物生长发育,也将使植物根系牢牢穿插于土壤中,起到保持水土以及固定流沙的作用^[8]。

穿插生长在土壤中的根系,当外界施加垂直于根轴线的径向作用力时,由于施力点两端根系穿插其中,根系则表现出抗折性能,我们把上述根系抵抗断裂的力称为抗折力,对应的强度称为抗折强度。到目前为止,国内外基于根系的抗弯折研究甚少,且试验大多采用悬臂梁(一端固定)、3点弯曲和4点弯曲(两端不固定)方法进行试验研究。本试验采用两端固定式折断法进行上述模拟试验研究,目前尚未见报道。

因此,本试验以柠条(*Caragana microphylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙柳(*Salix psam-mophila*)、白沙蒿(*Artemisia sphaerocep*)的直根为研究对象,运用两端固定折断试验分析4种植物抗折力及其抗折强度,以及折断变形过程中4种植物直根平均最大折断变形量,以此来探明4种植物抗折能力和差异性。此项研究将为分析根系固土机理以及边坡防护树种的选择等实践应用方面提供一定的理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 根系采集

本试验样地位于内蒙古磴口县,此地是典型的沙漠地区,植被类型主要以柠条、沙柳等灌木为主,本试验所需的4种植物主要集中在各林场范围内。本试验在磴口县第4林场选择生长良好的林地作为试验样地,每种植物分别随机选取生长良好的30株待测

植株,测其冠幅、株高和地径,分别计算其平均值,最后在样地内选取与平均值相近的标准株挖掘其根系。在根系生长初期的5—6月份采集3~4年生柠条、沙棘、沙柳、白沙蒿根系。在标准株基径大约2 m处绕树1圈挖1.5 m深的圆形剖面,采用收缩法由外逐渐向内挖,同时进行根系的采集,挖掘时尽量不要破坏根系,以免影响根系的力学性能。根系挖出后装在塑料袋内用湿沙覆盖带回实验室内,再放于4℃恒温箱内保证其湿度,尽快完成试验。

1.2 根系制备

首先,将野外取回的根系进行水洗,对根系进行生命活性的筛选,通过根皮脱落、根颜色等将死根去除。然后选择径向通直、直径均匀的根系作为试验根系。依照根系直径大小,每种植物按照0.5 mm为1个径级间隔,从1~8 mm逐级划分。试验根总长不小于80 mm,其中试验部分为40 mm。对每根根系的中点以及中点两侧20 mm处进行标记,用游标卡尺测量试验根上的3个标记点处的直径(每隔120°测量1次),然后取断裂点直径的平均值作为该试验根抗折强度计算中直径的大小,每1径级制备不少于30根待测根。

1.3 试验仪器与抗折强度的计算

本试验使用TY-8000伺服式强力机以及自制夹具(内蒙古大学机械厂制造),采用两端固定折断法研究根系的抗折特性。夹持点位于根段中点往外2 cm处,施力点位于根段中点,压头位于施力点上方,与试验根垂直。调节强力机和联机软件的相关参数并开始试验,强力机自动记录力—位移关系曲线图。抗折强度计算公式如下:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (1)$$

式中: σ 表示抗折强度(MPa); F 表示根被折断的峰值(N); D 表示根系平均直径(mm)。

1.4 数据处理方法

本试验利用Excel 2003, SPSS 18.0软件,采用回归分析法对植物单根抗折力与根径、抗折强度与根径的关系进行研究。采用方差分析法对不同植物相同直径时,抗折力与抗折强度的种间差异进行研究;不同直径时,相同植物抗折力与抗折强度进行研究。

2 结果与分析

2.1 结果与分析

2.1.1 4种植物抗折力与根径的关系 1~6 mm径级范围内,随着直径的增加,4种植物直根抗折力均表现出明显的增长趋势(图1)。在0.05的显著水平

下,4种植物种内不同径级间抗折力均呈现较显著差异($p<0.05$),并且在相同根径下,种间抗折力同样呈现显著性差异($p<0.01$),通过表1的多重比较结果显示,沙棘和白沙蒿抗折力差异性不大,但就数值,同径级下沙棘抗折大于白沙蒿(图1)。

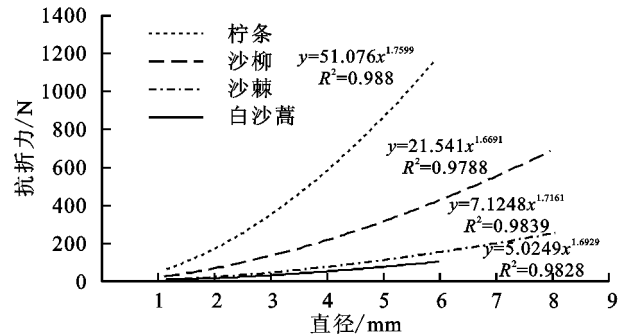


图 1 4种植物直根抗折力

表 1 4种植物抗折力种间多重检验

植物(I)	植物(J)	均值差值(I-J)/N	标准误差/N	Sig.	差分的 95%置信区间	
					下限	上限
白沙蒿	柠条	-460.740	63.431	0.000	-590.888	-330.591
	沙棘	-22.328	63.431	0.728	-152.476	107.821
	沙柳	-145.189	63.431	0.030	-275.337	-15.040
柠条	白沙蒿	460.740	63.431	0.000	330.591	590.888
	沙棘	438.412	63.431	0.000	308.263	568.561
	沙柳	315.551	63.431	0.000	185.403	445.700
沙棘	白沙蒿	22.328	63.431	0.728	-107.821	152.476
	柠条	-438.412	63.431	0.000	-568.561	-308.263
	沙柳	-122.861	63.431	0.013	-253.009	7.288
沙柳	白沙蒿	145.189	63.431	0.030	15.040	275.337
	柠条	-315.551	63.431	0.000	-445.700	-185.403
	沙棘	122.861	63.431	0.013	-7.288	253.009

注:方差分析所用数据为1~6 mm 径级范围内,不同植物各径级抗折力的均值(40 组数据)。

随着径级的增加,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿直根平均抗折力范围分别为(79±5.8)~(1 119±104.46), (32±6.12)~(410±36.1), (12±1.5)~(141±6.2), (8±1.2)~(100±2.56) N。4种植物中柠条的抗折力最大,对于抵抗折断的能力最为明显。

2.1.2 4种植物抗折强度 1~6 mm 径级范围内,4种植物抗折强度与直径呈现不同程度的幂函数负相关关系(图2)。随着径级的增加,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿直根平均抗折强度范围分别为(62±9.68)~(43±4.01), (25±3.82)~(15±1.42), (8±1.01)~(6±1.29), (6±0.61)~(4±0.14) MPa。通过对4种植物抗折强度与直径回归拟合得出(图2),4种植物抗折强度与直径均呈幂函数负相关关系,相关系数为0.6~0.7。

从图2中还可以看出,柠条抗折强度拟合曲线的坡度同样为4种植物中最陡,斜率最大,在 $\alpha=0.05$ 水平下,4种植物种内不同直径时抗折强度差异性显著($p<$

通过对4种植物抗折力与直径的回归拟合分析得出图1中的回归模型,4种植物抗折力与直径关系均呈幂函数正相关关系,相关系数均大于0.97。在1~6 mm 径级范围内,对表中4种植物的回归模型进行商比得出: $F_1(x)=y_{\text{柠条}}/y_{\text{沙柳}}=2.3711x^{0.0908}>1$, $F_2(x)=y_{\text{沙柳}}/y_{\text{沙棘}}=3.0234x^{-0.047}>1$, $F_3(x)=y_{\text{沙棘}}/y_{\text{白沙蒿}}=1.4179x^{0.0232}>1$ 。从以上的商比得出,在1~6 mm 径级范围内,4种植物直根抗折力比较结果为柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿。从图1中还可以看出,4种植物中柠条的拟合函数曲线斜率与其他3种植物相比变化幅度比较大,即曲线坡度最陡,说明柠条径级间抗折能力的差异性最为明显,且在相同直径时,曲线所对应的柠条抗折力始终为最大,其次为沙柳,然后为沙棘,最小为白沙蒿。

0.05),且4种植物种间的抗折强度存在极显著差异($p<0.001$);沙棘和白沙蒿的斜率变化不大,通过种间进一步的两两对比发现,沙棘与白沙蒿的抗折强度之间差异性不大($p>0.05$),但就数值上来看沙棘大于白沙蒿。在1~6 mm 相同径级范围内,4种植物直根平均抗折强度均表现出柠条>沙柳>沙棘>白沙蒿。

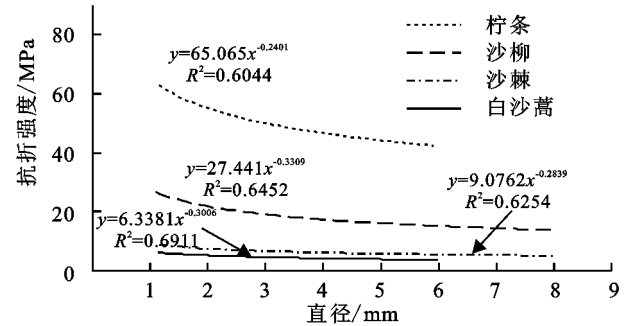


图 2 4种植物直根抗折强度

因此,由以上分析得出,4种植物直根抗折强度在1~6 mm 径级范围内表现出,柠条的抗折强度最

大,白沙蒿最小,并且直径越小,4 种植物的抗折强度越大,也就是说 4 种植物的细根($d<2\text{ mm}$)在抵抗土体下滑方面的能力比粗根更强。

2.1.3 4 种植物最大折断变形量 从表 2 可以看出,在 1~6 mm 径级范围内,4 种植物种内径级间平均最大折断变形量差异性不大,由此可以说明,同种植物根系受外界作用力时,不同径级根系所表现出的最大缓冲位移几乎接近,所能阻碍土体下滑最大限度基本相近。4 种植物 1~6 mm 直根平均最大折断变

形量排序均为柠条(16.77 mm)>沙柳(14.7 mm)>沙棘(11.22 mm)>白沙蒿(8.68 mm),由此可以说明,同径级 4 种植物中柠条阻碍土体下滑最大缓冲位移为最大,能力最强,白沙蒿最弱。在土体下滑过程中,由于根系固持在土体中,对土体下滑有缓冲作用。从以上分析得出,在外界因素相同情况下,4 种植物中柠条对于提高土体的缓冲位移最大,缓冲能力最强,沙柳其次,沙棘第三,白沙蒿最次。这一指标可以作为最优边坡防护植物种的评价指标之一。

表 2 不同径级时 4 种植物平均最大折断变形量 mm

径级/mm	柠条	沙柳	沙棘	白沙蒿
1~1.5	14.47±2.84	14.13±3.16	10.78±2.60	8.14±2.35
1.5~2	16.86±1.98	14.18±3.17	10.86±1.60	8.14±2.35
2~2.5	15.29±2.27	14.83±2.76	10.68±1.84	7.64±0.96
2.5~3	16.46±1.98	14.41±3.03	11.19±1.08	7.75±1.28
3~3.5	17.00±2.08	13.93±2.46	11.32±1.05	8.10±1.41
3.5~4	16.53±1.80	14.44±2.18	10.95±1.68	8.52±1.10
4~4.5	17.67±1.78	14.13±2.22	11.14±1.88	8.93±1.75
4.5~5	18.57±0.75	15.20±1.56	11.75±1.91	9.05±1.75
5~5.5	16.55±1.19	16.14±2.06	11.46±1.60	10.15±1.92
5.5~6	18.30±1.05	15.64±2.40	12.07±1.69	10.36±1.50
均值	16.77	14.70	11.22	8.68

注:以上所用数据均为 TY-8000 强力机在试验根系断裂时记录的最大下行位移。

3 讨论与结论

3.1 讨论

4 种植物的抗折力与直径呈幂函数正相关关系,抗折强度与直径呈幂函数负相关关系,这与包括本试验组在内的许多学者对根系抗拉特性的结果相似。边坡失稳时,虽然粗根与细根相比需要更大力才能被折断,但是细根的抗折强度明显比粗根大。粗根同锚杆一样穿插生长在坡面上,能使根系与土体紧密结合,从而使边坡更加稳定,其作用机理同钢筋混凝土相似^[9];而细根则是起到加筋作用^[10],细根的总量多,根系分泌粘质物能够使根系与土体更加紧密连接,形成微团聚体,改变土壤的理化性质^[11],粗根和细根的完美结合对坡面稳固起到重要的贡献^[12]。

4 种植物中直根平均抗折强度柠条为最大 62~43 MPa,约为沙柳的 2.5 倍,沙棘的 8 倍,白沙蒿的 10 倍,因此,在相同外界折断力的作用下,柠条抵抗折断的能力更强。4 种植物中柠条不仅在抗折力和抗折强度最大,而且通过 2.1.3 的研究结果显示,柠条的平均最大折断变形量也为最大,外界作用力下其根系自身的缓冲能力最强,这在实践应用中具有至关重要的作用,在土体下滑过程中,相同情况下,由于柠条的缓冲能力最强,能够使坡面发生彻底滑落所需要的时间延长,相比其他 3 种植物更有利于稳固边坡。不同植物

种之间的力学差异可归结为根系内部的结构组成,研究结果表明根系抗拉强度同纤维素、木质素、半纤维素、果胶以及根系生物学性状有关^[13-14],这也许是影响 4 种植物抗折力学差异的实质原因,有待进一步研究。

综上所述,单从根系抗折性能角度分析 4 种植物中柠条为最优边坡防护树种,沙柳和沙棘居中,白沙蒿最差。柠条不仅在抗折性能上优于其他 3 种植物,且本试验组苑淑娟^[15]采用拉伸试验方法,在室内对柠条、沙柳、沙地柏和白沙蒿 4 种植物直根抗拉力学特性研究结果表明,柠条的抗拉力及其抗拉强度均大于其他 3 种植物。由此说明柠条为边坡防护最优树种。

3.2 结论

在 1~6 mm 径级范围内,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿 4 种植物直根抗折力随着径级的增大均呈现出不同程度幂函数增长趋势,直根抗折强度呈现出不同程度幂函数减小趋势。4 种植物直根平均抗折力、抗折强度种间差异性显著。4 种植物直根平均抗折力和平均抗折强度范围各不相同,随着径级的增加,柠条、沙柳、沙棘和白沙蒿 4 种植物直根平均抗折力范围分别为(79±5.8)~(1 119±104.46),(32±6.12)~(410±36.1),(12±1.5)~(141±6.2),(8±1.2)~(100±2.56) N,直根平均抗折强度范围分别为(62±9.68)~(43±4.01),(25±3.82)~(15±1.42),(8±1.01)~(6±1.29),(6±0.61)~(4±

0.14) MPa。4种植物种内径级间平均最大折断变形量差异性不大,1~6 mm 平均最大折断变形量排序均为柠条(16.77 mm) > 沙柳(14.7 mm) > 沙棘(11.22 mm) > 白沙蒿(8.68 mm)。

参考文献:

- [1] 张俊云,周德培.红层泥岩边坡生态防护机制研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):250-256.
 - [2] 高德彬,倪万魁,杨泓全.黄土地区公路路堑高边坡植物防护探讨[J].路基工程,2007(5):125-127.
 - [3] 江锋,张俊云.植物根系与边坡土体间的力学特性研究[J].地质灾害与环境保护,2008,19(1):57-61.
 - [4] 晏益力,宋云.植物根系—土体的相互作用力学模型[J].湖南城市学院学报:自然科学版,2006,15(2):10-11.
 - [5] 王库.植物根系对土壤抗侵蚀能力的影响[J].土壤与环境,2001,10(3):250-252.
 - [6] 李红丽,董智,王林和,等.浑善达克沙地榆树根系分布特征及生物量研究[J].干旱区资源与环境,2002,16(4):99-105.
 - [7] 李为萍,史海滨,胡敏.沙地柏根系径级对根土复合体抗剪强度的影响[J].土壤通报,2012,43(4):934-937.
 - [8] 封金财,王建华.植物根的存在对边坡稳定性的作用[J].华东交通大学学报,2003,20(5):42-45.
 - [9] Stokes A, Atger C, Bengough A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. Plant and Soil, 2009,324(1/2):1-30.
 - [10] 陈丽华.林木根系固土力学机制[M].北京:科学出版社,2008.
 - [11] 王韵秋,郝绍卿,于得荣,等.老参地土壤理化性状的变化[J].特产研究,1979(3),1-9.
 - [12] Waldron L J, Dakessian S. Effect of grass, legume, and tree roots on soil shearing resistance[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(5):894-899.
 - [13] 乔娜,余芹芹,卢海静,等.寒旱环境植物护坡力学效应与根系化学成分响应[J].水土保持研究,2012,19(3):108-113.
 - [14] 罗春燕,吴楚,芦光新,等.三江源区植物根—土复合体的抗拉拔力特征及影响因素分析[J].水土保持研究,2014,21(5):260-266.
 - [15] 苑淑娟.4种植物单根抗拉力学特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- ~~~~~
- (上接第 337 页)
- [14] 周长春,王晓青,武传震,等.洞穴滴水水化学特征及影响因素研究:以山东沂源九天洞为例[C]//中国地质学会,全国第十三届洞穴学术会议论文集.湖南郴州,2008.
 - [15] 周文亮,姜光辉,陈国富,等.桂林硝盐洞滴水水文和水化学动态变化特征[J].中国岩溶,2013,32(1):51-56.
 - [16] Liu Z, Li Q, Sun H, et al. Seasonal, diurnal and storm-scale hydrochemical variations of typical epikarst springs in subtropical karst areas of SW China: soil CO₂ and dilution effects[J]. Journal of Hydrology, 2007,337(1):207-223.
 - [17] 叶明阳,李廷勇,王建力,等.芙蓉洞次生碳酸盐沉积特征及与降水的关系研究[J].沉积学报,2009,27(4):684-690.
 - [18] 衣成城,李廷勇,李俊云,等.芙蓉洞洞穴水离子浓度和元素比值变化特征及其环境意义[J].中国岩溶,2011,30(2):200-207.
 - [19] 王新中.洞穴滴水化学过程及其动力学与上覆土壤驱动问题[D].南京:南京农业大学,2005.
 - [20] 王新中,班凤梅,潘根兴.洞穴滴水地球化学的空间和时间变化及其控制因素[J].第四纪研究,2005,25(2):258-264.
 - [21] 谭明,潘根兴.石笋与环境:石笋纹层形成的环境机理初探[J].中国岩溶,1999,18(3):197-205.
 - [22] McBride M B. Environmental Chemistry of Soils[M]. Oxford University Press, 1994.
 - [23] 马倩倩.山东半岛九天洞洞穴滴水微量元素季节变化及其气候环境意义研究[D].山东烟台:鲁东大学,2014.
 - [24] 周运超,王世杰.贵州七星洞滴水的水文水化学特征及其意义[J].水文地质工程地质,2006,33(1):52-57.
 - [25] Gascoyne M. Trace-element partition coefficients in the calcite-water system and their paleoclimatic significance in cave studies[J]. Journal of Hydrology, 1983, 61(1):213-222.
 - [26] Huang Y M, Fairchild I J, Borsato A, et al. Seasonal variations in Sr, Mg and P in modern speleothems (Grotta di Ernesto, Italy) [J]. Chemical Geology, 2001,175(3):429-448.
 - [27] Fairchild I J, Borsato A, Tooth A F, et al. Controls on trace element (Sr-Mg) compositions of carbonate cave waters: implications for speleothem climatic records [J]. Chemical Geology, 2000,166(3):255-269.
 - [28] Atkinson T C. Growth Mechanisms of Speleothems in Castleguard Cave, Columbia Icefields, Alberta, Canada [J]. Arctic & Alpine Research, 1983,15(4):523-536.
 - [29] Chou L E I, Garrels R M, Wollast R. Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals[J]. Chemical Geology, 1989, 78(3):269-282.