

10 种藓类植物的耐旱性能研究

朱克淞¹, 丁晓璐², 李易衡³, 师瑞萍^{4*} (1. 江苏省无锡开放大学, 江苏无锡 214000; 2. 上海中医药大学, 上海 201203; 3. 江苏省徐州市第一中学, 江苏徐州 221002; 4. 上海自然博物馆(上海科技馆分馆), 上海 200041)

摘要 [目的] 筛选抗旱能力强的苔藓植物用于城市立体绿化。[方法] 对采自江西省井冈山自然保护区的 10 种藓类植物进行干旱胁迫, 研究其在干旱胁迫后再复水过程中的植物体含水量及光合作用效率变化, 分析其抗旱能力。[结果] 10 种藓类植物经干旱处理后均表现出相应的抗旱能力, 其中密枝灰藓(*Hypnum densirameum*)、桧叶白发藓(*Leucobryum juniperoides*)、尖叶匍灯藓(*Plagiomnium cuspidatum*)和拟阔叶小石藓(*Weisia platyphylloides*)表现出较强的干旱适应能力。[结论] 该研究结果为今后开展苔藓植物的规模化生产并应用于城市绿化提供了理论依据。

关键词 苔藓植物; 耐旱性; 干旱胁迫; 城市绿化

中图分类号 S-3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)09-0004-04

Drought Tolerance in Ten Mosses under Drought Stress

ZHU Ke-song¹, DING Xiao-lu², LI Yi-heng³ et al (1. Wuxi Open University, Wuxi, Jiangsu 214000; 2. Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203; 3. Xuzhou No. 1 Middle School, Xuzhou, Jiangsu 221002)

Abstract [Objective] The aim was to screen out bryophytes with strong drought tolerance to use in urban three-dimensional greening. [Method] We studied the drought tolerance of 10 mosses collected from Jinggangshan Nature Reserve in Jiangxi Province by measuring the changes of water content and photosynthesis efficiency. [Result] All of the 10 mosses demonstrated drought resistance after drought stress treatment. In particular, four species, that is *Hypnum densirameum*, *Leucobryum juniperoides*, *Plagiomnium cuspidatum* and *Weisia platyphylloides* exhibited high tolerance to drought. [Conclusion] The results provide theoretical basis for developing the scale production and application in urban greening of bryophytes.

Key words Bryophyte; Drought tolerance; Drought stress; Urban greening

苔藓植物是高等植物中最原始的类群, 是生物多样性重要的组成部分, 其物种丰富度在高等植物中仅次于被子植物。我国苔藓植物种类丰富, 大约有 3 460 种^[1]。作为自然界主要拓荒者之一, 苔藓植物具有很强的耐旱能力, 能够在裸露的岩壁和极端干旱的环境中^[2]。由于全球气候变暖的影响, 各地旱灾日益频发, 尤其是城市化的进程加快导致城市出现热岛效应。城市绿化是唯一具有生命的基础设施, 具有降温增湿、固碳释氧、滞尘杀菌等功能, 是城市生态环境修复的一个主要途径^[3-4]。苔藓绿化在城市绿化中是一个新兴的应用领域, 具有质量轻、对基质要求低、适应性强等特点, 同时又不受城市用地指标的制约, 可利用墙面、屋顶及道路边坡等特殊生境实现绿化, 是立体绿化、生态建筑和郁闭林地绿化的理想植物材料。在这种情况下, 如能对苔藓植物的耐旱能力进行研究, 筛选出具有较强耐旱能力的苔藓植物应用于城市绿化, 可节约大量的水资源, 调节城市小气候, 改善生态环境。因此, 耐旱苔藓在城市环境监测和绿化中蕴含着广阔的应用前景。

不同的苔藓植物耐旱能力差异较大, 从数小时到十几年。生长在热带云雾林中的泥炭藓(*Sphagnum*)和白发藓(*Leucobryum*)只能忍耐几个小时到几天的干旱^[5]。Keever^[6]发现大多数的阔叶紫萼藓(*Grimmia laevigata*)的干标本能存活 3 年以上, 只有 20% 的标本在保存 10 年后经复水成活。但有些藓类, 如丛本藓(*Anoetangium compactum*) 在保存 19

年后仍具有活力^[7]。为了筛选出抗旱能力强的苔藓植物, 笔者对采自江西省井冈山自然保护区的 10 种藓类植物进行干旱胁迫, 研究了其在干旱胁迫后再复水过程中的植物体含水量及光合作用效率变化, 分析了其抗旱能力, 以期为今后开展规模化生产应用于城市绿化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料 以长叶绢藓 [*Entodon longifolius* (C. Muell.) Jaeg.]、紫萼藓 (*Grimmia* sp.)、密枝灰藓 (*Hypnum densirameum* Ando)、桧叶白发藓 [*Leucobryum juniperoides* (Brid.) C. Muell.]、尖叶匍灯藓 [*Plagiomnium cuspidatum* (Hedw.) T. Kop.]、圆叶匍灯藓 [*Plagiomnium vesicatum* (Besch.) T. Kop.]、硬叶小金发藓 [*Pogonatum neesii* (C. Muell.) Dozy]、小扭口藓 [*Semibarbula orientalis* (Web.) Wijk & Marg.]、拟阔叶小石藓 (*Weisia platyphylloides* Card.)、褶叶小墙藓 [*Weisiposis anomala* (Broth. & Par.) Broth.] 10 种具有一定观赏价值又具有相对耐旱能力的藓类作为研究材料。研究材料于 2013 年 10 月采自江西省井冈山市井冈山自然保护区 (114°04'47.93"E ~ 114°08'27.44"E, 26°29'49.72"N ~ 26°35'58.05"N, 海拔 906 ~ 1 500 m), 均为土生。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 将试验材料在适量水中浸泡一段时间, 去除泥土, 用吸水纸将藓类植物表面的水分吸干, 放到没有盖的培养皿中。

1.2.2 干旱处理 将藓类植物放进人工智能气候箱 (温度 28 °C, 无光照), 干燥培养。

1.2.3 干旱处理阶段藓类质量的测定 分别在干旱处理前, 干旱处理 24、48、120 h 后, 称量每种藓类植物材料的质量, 记录结果。

基金项目 上海科技馆科研专项; 上海中医药大学第十批大学生创新活动计划项目 (2017KCZ12)。

作者简介 朱克淞 (1978—), 女, 江苏无锡人, 讲师, 从事园林绿化研究。* 通讯作者, 工程师, 硕士, 从事苔藓植物分类研究。

收稿日期 2017-11-16; **修回日期** 2017-12-07

1.2.4 干旱复水处理。在藓类植物干旱处理 120 h 后,用滴管向每种藓类植物中滴加 20 滴水,继续放入培养箱培养。

1.2.5 复水阶段藓类质量和持水量的测定。在复水 1 和 24 h 分别对植物进行称量,计算持水量,记录结果。

持水量 = (复水处理后的质量 - 复水处理前的质量) / 复水处理前的质量

1.2.6 叶片光合作用效率和植物抗逆性的测定。利用调制叶绿素荧光仪 Junior - PAM,在复水前和复水 1 h 后,测定藓类植物叶片的实际光合量子产量 $Y(II)$ (实际光合效率)。

利用调制叶绿素荧光仪 Junior - PAM,植物干旱处理 72 h 和复水 24 h 后,进行非光化学淬灭系数 NPQ (植物抗逆性)的测定。

检测干旱处理和再复水的藓类植物实际光合量子产量

(实际光合效率)和的值。

1.2.7 数据统计。每个处理重复 3 次,利用 Excel 软件对数据进行统计、分析及制图。

2 结果与分析

2.1 藓类含水量的变化 藓类植物因为其结构的特殊性,叶片仅由单层细胞组成,不具保护组织和输导组织,因此,当环境温度、湿度发生变化后,植物体会随着环境的变化而迅速变化。最明显的就是含水量的变化,即植物快速失水,因此含水量的变化量可以从一定角度反映出植物将外界胁迫危害降到最低的一种适应性反应。

2.1.1 干旱处理阶段藓类质量的变化。分别在干旱处理前以及干旱处理 24、48、120 h 后对材料进行称量,获得平均质量(表 1)。

表 1 10 种藓类植物失水后不同时间的质量

Table 1 Weight of 10 mosses at different time after dehydration

种类 Species	干旱处理前 Before drought stress	干旱处理时间 Drought stress time//h		
		24	48	120
长叶绢藓 <i>Entodon longifolius</i>	0.585 5	0.118 5	0.118 0	0.115 5
紫萼藓 <i>Grimmia</i> sp.	0.780 5	0.225 0	0.225 0	0.226 5
密枝灰藓 <i>Hypnum densirameum</i>	0.620 5	0.096 0	0.095 5	0.097 0
桧叶白发藓 <i>Leucobryum juniperoides</i>	0.324 5	0.037 5	0.038 0	0.038 0
尖叶匐灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0.217 5	0.042 0	0.041 5	0.040 0
圆叶匐灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	0.182 0	0.094 5	0.096 0	0.093 5
硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i>	0.401 0	0.134 0	0.131 5	0.137 0
小扭口藓 <i>Semibarbula orientalis</i>	0.169 5	0.056 5	0.057 0	0.053 0
褶叶小墙藓 <i>Weisiposis anomala</i>	0.504 0	0.140 0	0.105 5	0.103 5
拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphylloides</i>	0.452 5	0.073 0	0.074 5	0.075 0

干旱处理 24 h 后,10 种藓类植物的植株都失去绿色,呈灰褐色,叶片皱缩,且质量都明显下降,平均质量降到原有的 25.8%,失水量高低顺序依次是桧叶白发藓、密枝灰藓、拟阔叶小石藓、尖叶匐灯藓、长叶绢藓、褶叶小墙藓、紫萼藓属、小扭口藓、硬叶小金发藓和圆叶匐灯藓,其中前 3 种藓类的质量分别下降到原有质量的 11.5%、15.5% 和 16.1%。图 1 表示 10 种藓类植物干旱处理过程中的质量变化趋势,在干旱处理 24 h 后,藓类植物的质量处于一个稳定范围,变化很小。

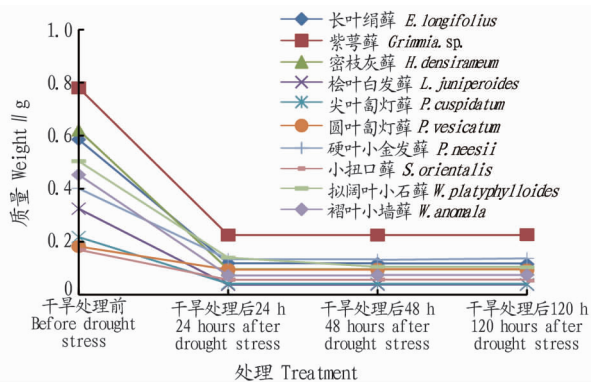


图 1 10 种藓类植物干旱处理过程中质量的变化趋势

Fig. 1 The variation trend of 10 mosses weight during drought stress

2.1.2 复水阶段藓类质量的变化情况。干旱处理 120 h 后,先滴加 20 滴水让其开始复水,之后继续放入培养箱,让植物保持水分,在复水 1 和 24 h 后分别对植物进行称量,获得平均质量。由表 2 和图 2 可知,干旱处理 120 h 后的藓类在与水接触后,叶片能够迅速吸收水分,质量变化明显。10 种藓类植物复水 1 h 后,其复水能力顺序依次是密枝灰藓、尖叶匐灯藓、拟阔叶小石藓、褶叶小墙藓、桧叶白发藓、长叶绢藓、圆叶匐灯藓、紫萼藓属、硬叶小金发藓和小扭口藓。

2.2 复水前后藓类植物光合作用效率的情况 当植物受到胁迫的情况下,特别是干旱胁迫时,作为光合作用的重要来源,水分的缺失必定会影响到植物的光合作用。叶绿素荧光仪可以有效地测定藓类这种植株矮小、叶片几乎看不清的植物的光合作用效率。 $Y(II)$ 代表了光量子实际产量,也是反映植物实际光合效率的指标,当植物受到胁迫后, $Y(II)$ 会明显降低,说明植物光合作用过程中电子传递的速率受到抑制,也反映了植物的代谢过程受到影响。

干旱处理 6 d 后,在 10 种藓类植物复水前和复水 1 h 后测定其 $Y(II)$ 的值。由表 3 和图 3 可知,与复水前相比,所有藓类的实际光合效率都有显著提高,其中密枝灰藓、桧叶白发藓和尖叶匐灯藓 3 种藓类增长幅度最大,分别增长至复水前的 14.48、6.46 和 6.32 倍。

表2 10种藓类植物复水前后质量变化情况

Table 2 Weight changes of 10 kinds of mosses before and after rehydration

种类 Species	复水前 Before rehydration	复水1 h 1 h after rehydration	复水24 h 24 h after rehydration	干旱处理前 Before drought stress
长叶绢藓 <i>Entodon longifolius</i>	0.115 5	0.353 0	0.418 0	0.585 5
紫萼藓 <i>Grimmia</i> sp.	0.226 5	0.552 0	0.964 0	0.780 5
密枝灰藓 <i>Hypnum densirameum</i>	0.097 0	0.549 0	0.311 0	0.620 5
桧叶白发藓 <i>Leucobryum juniperoides</i>	0.038 0	0.148 0	0.286 0	0.324 5
尖叶匐灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0.040 0	0.215 0	0.244 0	0.217 5
圆叶匐灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	0.093 5	0.242 0	0.372 0	0.182 0
硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i>	0.137 0	0.193 0	0.197 0	0.401 0
小扭口藓 <i>Semibarbula orientalis</i>	0.053 0	0.063 0	0.297 0	0.169 5
褶叶小墙藓 <i>Weisiposis anomala</i>	0.103 5	0.408 0	0.389 0	0.504 0
拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphyloides</i>	0.075 0	0.336 0	0.534 0	0.452 5

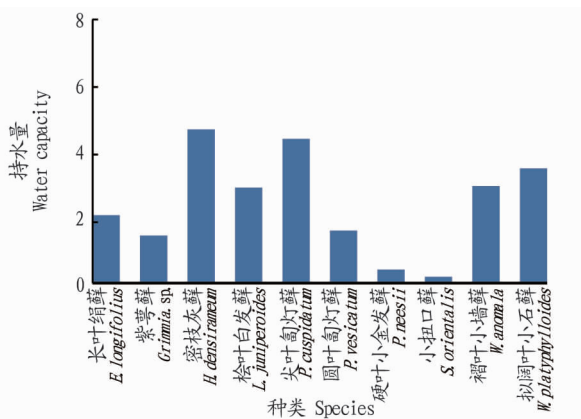


图2 10种藓类干旱处理后持水量

Fig. 2 Water capacity of 10 mosses after drought stress

表3 10种藓类植物复水前及复水后1h的Y(II)值

Table 3 Y(II) of 10 mosses before and 1 h after rehydration

种类 Species	复水前 Y (II) Y (II) before rehydration	复水后 Y (II) Y (II) after rehydration
长叶绢藓 <i>Entodon longifolius</i>	0.020 8	0.074 1
紫萼藓 <i>Grimmia</i> sp.	0.086 8	0.313 6
密枝灰藓 <i>Hypnum densirameum</i>	0.015 4	0.223 0
桧叶白发藓 <i>Leucobryum juniperoides</i>	0.026 9	0.173 9
尖叶匐灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0.048 1	0.303 9
圆叶匐灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	0.040 5	0.095 0
硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i>	0.036 1	0.089 3
小扭口藓 <i>Semibarbula orientalis</i>	0.091 6	0.149 1
褶叶小墙藓 <i>Weisiposis anomala</i>	0.050 3	0.204 6
拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphyloides</i>	0.065 4	0.262 5

2.3 藓类植物抗逆性(NPQ)的测定 NPQ是植物光合作用中非光化学淬灭参数,可以反映植物耗散过剩光能为热的能力,反映了植物的光保护能力。当植物受到干旱胁迫时,外界的光对于植物来讲提供的能量过多,此时植物需要通过非光化学淬灭的方式将接受的不能进行光合作用的能量以热能的形式散发掉,从而可以保护植物本身光合作用有关蛋白质的功能活动,从而得以继续生存下去。

试验对处理前、干旱3和6d后的材料的NPQ值进行测定。由表4可知,在10种藓类植物中,大部分植株随着干旱时间的延长,NPQ值减少,只有密枝灰藓和拟阔叶小石藓的NPQ值显著上升。

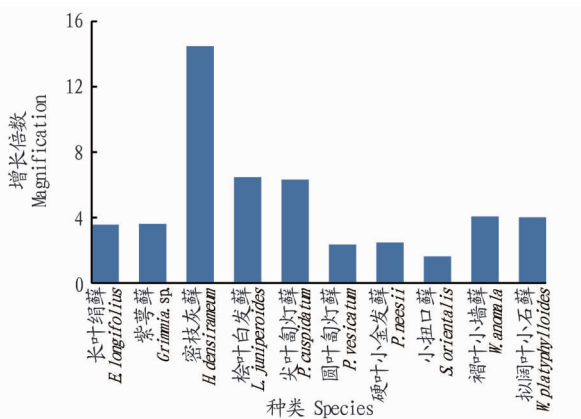


图3 复水后藓类植物Y(II)的增长倍数

Fig. 3 Growth times of Y(II) values of 10 mosses after rehydration

表4 10种藓类植物干旱处理前后NPQ的变化

Table 4 NPQ of 10 mosses before and after drought stress

种类 Species	干旱处理前 Before drought stress	干旱3 d 3 d after drought stress	干旱6 d 6 d after drought stress
长叶绢藓 <i>Entodon longifolius</i>	0.273 5	0.072 8	0.035 9
紫萼藓 <i>Grimmia</i> sp.	0.074 9	0.046 6	0.032 3
密枝灰藓 <i>Hypnum densirameum</i>	0.303 5	0.134 1	0.237 3
桧叶白发藓 <i>Leucobryum juniperoides</i>	0.597 5	0.123 1	0.077 6
尖叶匐灯藓 <i>Plagiomnium cuspidatum</i>	0.300 0	0.119 8	0.064 1
圆叶匐灯藓 <i>Plagiomnium vesicatum</i>	0.609 6	0.116 6	0.045 6
硬叶小金发藓 <i>Pogonatum neesii</i>	0.304 1	0.097 9	0.050 8
小扭口藓 <i>Semibarbula orientalis</i>	0.244 8	0.072 1	-0.043 5
褶叶小墙藓 <i>Weisiposis anomala</i>	0.456 8	0.097 4	0.035 5
拟阔叶小石藓 <i>Weisia platyphyloides</i>	0.090 5	0.147 6	0.096 8

3 结论与讨论

苔藓植物具有较强的忍耐干旱能力已经受到国内外研究者的广泛关注,作为一类变水植物,苔藓植物必须忍耐极度的干燥速率,而这种快速失水速率对其他高等植物均是致命的^[2]。随着环境变干,苔藓植物可将体内的含水量降得很低,以休眠的状态生存下来,一旦环境条件适合,又可以迅速地吸收水分,恢复正常的生理代谢活动。在长期的进化过程中,有些耐旱苔藓植物种类形成了一些特殊的形态以适应干旱的环境,有的通过叶片的卷曲或改变叶片的伸展方向从而减少水分蒸发,有的叶片具有毛状尖通过反射光照减少水分

蒸发;有些种类的叶片具有疣或突起,也可以起到反射太阳辐射作用^[8]。另一方面,苔藓植物的耐旱能力是由于其具有一些特殊的生理特征的结果,研究发现耐旱藓类对损伤的膜系统具有很强的修复能力,还与其细胞具有低水势的特点密切相关^[9]。

苔藓植物在干旱条件下存活可以通过失水后生长速率和叶绿素含量变化来观察,光合作用和呼吸作用常被用于测量变水植物的水分和生活力关系研究^[10]。耐旱苔藓植物在失水过程中散热能力增强,能利用不稳定的水分供给降低光损伤,从而使光合合成系统处于可恢复状态^[11-12]。

10 种藓类植物的含水量在干燥处理后均明显下降,这与苔藓植物的形态、结构特征有关。苔藓植物缺乏维管组织,个体较小,在长期适应环境过程中形成了一系列耐旱机制,并依靠这种机制调节其体内含水量从而减轻干旱胁迫所造成的伤害。其中桧叶白发藓、密枝灰藓、拟阔叶小石藓和尖叶匍灯藓在干燥处理过程中表现出较强的快速失水能力,而在随后的复水试验中,密枝灰藓、尖叶匍灯藓、拟阔叶小石藓和褶叶小墙藓则表现出快速的复水能力。10 种藓类在干旱处理 6 d 后复水 1 h 的实际光合效率都有显著性的提高,其中密枝灰藓、桧叶白发藓和尖叶匍灯藓表现最佳。在不同干燥时间下,只有密枝灰藓和拟阔叶小石藓的 NPQ 值显著上升,说明这 2 种藓类在干旱情况下仍能够通过自身的调节将多余的光能散掉,从而起到保护作用。

综上所述,密枝灰藓、桧叶白发藓、尖叶匍灯藓和拟阔叶小石藓 4 种藓类在该研究各种处理中均表现出较强的适应干旱环境能力,可作为今后城市绿地及园林绿化开发的理想材料。但是,该研究将 10 种藓类植物剥离基质后进行光合

作用测量会因为改变水分丧失和吸收条件进而影响到测量结果的准确性,在今后的研究中将进一步对苔藓植物进行大棚移栽,利用脉冲式叶绿素荧光计,实地测量苔藓这一类变水植物的光合作用。

参考文献

- [1] CAO T, ZHU R L, BENTIO C T, et al. A report of the first national red list of Chinese endangered bryophytes[J]. Journal of the hattori botanical laboratory, 2006, 119(99): 275-295.
- [2] 吴玉环,程佳强,冯虎元,等.耐旱藓类的抗旱生理及其机理研究[J].中国沙漠,2004,24(1):23-29.
- [3] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等.北京城市园林绿化生态效益的研究(3)[J].中国园林,1998,14(57):53-57.
- [4] 李帅杰,程晓陶.福建福州市屋顶绿化及雨水收集对雨洪的调节作用[J].中国防汛抗旱,2012,22(2):16-20.
- [5] VANDERPOORTEN A, GOFFINET B. Introduction to bryophytes[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [6] KEEVER C. Establishment of *Grimmia laevigata* on bare granite[J]. Ecology, 1957, 38(3): 422-429.
- [7] MALTA N. Versuche über die Widerstandsfähigkeit der moose gegen Austrocknung[J]. Acta university latviensis, 1921, 1: 125-129.
- [8] HAMERLYNCK F P, TUBA Z, CSINTALAN Z, et al. Diurnal variation in photochemical dynamics and surface reflectance of the desiccation-tolerant moss, *Tortula ruralis*[J]. Plant ecology, 2000, 151(1): 55-63.
- [9] 吴鹏程. 苔藓植物生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] TUBA Z, CSINTALAN Z, PROCTOR M C F. Photosynthetic responses of a moss, *Tortula ruralis* ssp. *ruralis*, and the lichens *Cladonia convoluta* and *C. furcata* to water deficit and short periods of desiccation, and their eco-physiological significance: A baseline study at present-day CO₂ concentration[J]. New phytologist, 1996, 133(2): 353-361.
- [11] GREEN T G A, SCHROETER B, KAPPEN L, et al. An assessment of the relationship between chlorophyll a fluorescence and CO₂ gas exchange from field measurements on a moss and lichen[J]. Planta, 1998, 206(4): 611-618.
- [12] MARSCHALL M, PROCTOR M C F. Desiccation tolerance and recovery of the leaf liverwort *Porella platyphylla* (L.) Pfeiff.; Chlorophyll-fluorescence measurements[J]. Journal of bryology, 1999, 21(4): 257-262.

(上接第 3 页)

法。李亦秋等^[4]对 1974—2007 年山东省森林资源变化进行分析,建立非等距灰色预测模型,得到森林资源未来变化较为精确的结果。通过预测精度检测,横县森林资源的方差比 C 都小于 0.2,预测精度都为一级“好”,其中森林覆盖率的预测精度为“最好”,表示模型所得的计算值与实际值之差不大离散^[13]。预测结果显示横县森林资源的变化在 2017—2030 年间除了林地面积略有减少,森林面积(有林地)、森林覆盖率及活立木总蓄积量则都呈现增长的趋势,但林地面积、森林面积、森林覆盖率的相对变化率都低于 1%,而活立木总蓄积量则相较于 2017 年相对净增长率分别为 6.02%、17.15%、29.83%,这在一定程度上表明横县的森林资源的总体发展较为平稳,森林生产量与消耗量基本持平;林地面积减少而蓄积量增加,表明林地管护措施得当,林木的蓄积单产显著增长,活立木总蓄积量则逆势增长。而在灰色理论体系中,随着时间的发展,将会出现一些随机的扰动或驱动因素进入系统,使系统的发展发生变化,一般而言,越久远的发展,越远离时间原点,模型的预测意义就越弱^[14]。

参考文献

- [1] 尤光辉. 武汉市森林资源动态分析及林业可持续发展探讨[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [2] 王凯, 陈涛, 罗军伟, 等. 基于 EKC 模型的山东省森林资源变化与人均 GDP 关系分析[J]. 林业经济问题, 2016, 36(3): 222-226.
- [3] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 12-14.
- [4] 李亦秋, 冯仲科. 山东省森林资源动态变化的非等间距灰色预测[J]. 浙江林学院学报, 2009, 26(1): 7-12.
- [5] 陈勇. 非等间距序列的灰色模型的程序实现[J]. 商洛学院学报, 2005, 19(2): 20-21.
- [6] 郑艳琳, 刘保东. 非等间距 GM(1,1) 模型的模糊优化[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2004, 23(4): 75-77.
- [7] 傅泽强, 孙启宏, 蔡运龙, 等. 基于灰色系统理论的森林火灾预测模型研究[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 95-100.
- [8] 马友平, 冯仲科, 何友均. 日本落叶松人工林生长量的灰色-马尔柯夫预测[J]. 福建林学院学报, 2007, 27(2): 151-156.
- [9] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 王丰效. 多变量非等间距 GM(1, m) 模型及其应用[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 388-390.
- [11] 曾志三, 顾明. GM(1, 1) 模型对烟草产量的灰色预测[J]. 山地农业生物学报, 2006, 25(4): 293-296.
- [12] 李振全, 徐建新, 邹向涛, 等. 灰色系统理论在农业需水量预测中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(11): 24-26.
- [13] 罗佑新, 周继荣. 非等间距 GM(1, 1) 模型及其在疲劳试验数据处理和疲劳试验在线监测中的应用[J]. 机械强度, 1996(3): 60-63.
- [14] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010.