

段 然,杨春宇,苏加福. 重庆市张关溶洞景观照明研究[J]. 中国岩溶,2018,37(3):468-473.
DOI:10.11932/karst20180319

重庆市张关溶洞景观照明研究

段 然^{1,2},杨春宇²,苏加福³

(1. 重庆工商大学艺术学院,重庆 400067; 2. 重庆大学建筑城规学院,重庆 400030;
3. 重庆工商大学国家智能制造服务国际科技合作基地,重庆 400067)

摘 要:溶洞照明推进了溶洞旅游业的发展,不科学的溶洞照明引起溶洞内灯光植物生长,破坏了溶洞内部特殊环境。通过对张关溶洞内灯光植物和人工光源的调研测量,研究了人工光源光谱、光照强度与溶洞灯光植物的生长关系,结果表明:光照强度高于 20 000 lux 或低于 100 lux 的传统光源及光谱能量分布在 500~600 nm 的窄光谱光源,能够有效抑制溶洞内灯光植物的生长;根据人工光源光谱、光照强度对灯光植物生长的抑制作用,提出了保持溶洞内特殊生态环境的景观照明技术指标。

关键词:景观照明;灯光植物;张关溶洞

中图分类号:P642.25; TU113.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2018)03-0468-06

0 引 言

溶洞是旅游区中的一个组成部分。人工照明是开展溶洞旅游的必备条件。通过光与影的搭配,能造就溶洞内的自然奇观^[1]。绝大多数溶洞内部自然光线不足,人工光源灯光设计及配置成为开发溶洞旅游的重要标准^[2],也可以说没有人工照明就没有溶洞旅游。溶洞资源是一种不可再生资源,具有巨大的科研、生态和经济价值。溶洞内生态情况复杂,且与地面自然环境有所不同,不科学的照明会影响溶洞内生态环境^[3]。溶洞内气候温暖潮湿,人工照明为溶洞内植物生长提供了光照条件,被带入溶洞的植物种子萌发滋生了大量灯光植物。植物根系、分泌物等会破坏溶洞内原有地质条件,同时,灯光植物的光合作用、呼吸作用也会改变洞内气体环境,损害洞内亿万年形成的钟乳石等石景沉积物,威胁天然地质资源^[4]。目前我国缺乏溶洞生态性照明技术的标准。如何能既为溶洞提供适宜的人工照明又不使灯光植物生长干扰洞内生态环境,科学确定人工光源光谱及光照强度

限制洞内灯光植物生长,对保护旅游溶洞资源具有重要的科学价值及工程实践意义。

1 文献回顾

长期以来溶洞的研究集中在溶洞开发利用与生态保护^[5-6]、旅游规划^[1]及生物学研究方面^[7-8],针对溶洞照明与洞内生态环境,特别是照明与灯光植物生长关系方面的研究相对较少。溶洞照明光源的选用多为传统光源,包括白炽灯、荧光灯、高压钠灯及金属卤化物灯等^[9],随着 LED 光源的快速发展,溶洞内传统照明光源被 LED 光源替代已成为现实。在溶洞照明设计方面,国内学者提出重点景观照度不宜超过 250 lux^[4],装饰性照明照度应控制在 10~20 lux,游道照明照度控制在 2~5 lux,显示照明照度为 5 lux。低照度的照明设计需采用偏黄色的低色温光源,照度小于 20 lux,色温为 2 000 K;中等照度采用低色温光源,照度在 50~200 lux,色温在 2 000~3 500 K;高照

基金项目:国家自然科学基金面上项目“基于光气候分区的高校室内照明与大学生抑郁情绪的光生物效应研究”(51478060);高层次人才科研启动项目“基于光谱能量分析的植物补光技术研究”(950318046)

第一作者简介:段然(1986—),女,讲师,博士,研究方向:环境光学。E-mail:dr_optics@163.com。

收稿日期:2017-06-14

度景观段照明,照度可大于 200 lux,色温在 2 500~7 000 K 白光或偏蓝光^[10]。国外在溶洞照明的艺术性^[11-12]及生态性^[13-14]上均做了大量研究,特别针对洞穴灯光照明系统微观领域的研究,并指出溶洞内光照强度低于 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时藻类植物无法生长,为满足游客视看,推荐溶洞照度值控制在 $4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下^[15]。前者能抑制植物生长却不能满足游人观景,后者满足了游人洞内视觉功能但不能抑制植物生长^[16]。显然,仅从照度值高低或单纯从视看功能角度与植物光度量角度确定溶洞内照明指标,都不能成为旅游溶洞的生态照明技术参数,也不能直接应用于旅游溶洞的景观照明。



图 1 张关溶洞内景观照明

Fig. 1 Landscape lighting in Zhangguan karst cave

通过对张关溶洞内生长的灯光植物及人工照明的调研发现:(1)溶洞内照明光源主要为白光金卤灯、黄光金卤灯、蓝光金卤灯、绿光金卤灯及荧光灯等传统光源;(2)不同光源光谱能量分布照射下灯光植物类型不同,例如,绿光金卤灯照射下以蕨类植物生长为主;黄光金卤灯照射下以苔藓植物为主;(3)根据光照强度不同,灯光植物疏密度不同,例如,荧光灯照射于崖壁而生长的苔藓植物,随光照强度减弱,植物分布逐渐稀疏直至完全消失;高强度绿光金卤灯下植物植株普遍高于 20 cm,低强度下植物植株相对较矮;(4)溶洞内自设置人工照明开始生长灯光植物,且植物无自然四季变化,生长量逐年增多。

2.2 张关溶洞灯光植物与人工光源测量

张关溶洞中主要灯光植物类型为苔藓类植物与蕨类植物。苔藓植物为一种结构简单的小型绿色植物,其能分泌酸性物质溶解岩石成分,对溶洞地质资源有极大的破坏性,其结构包含茎和叶两部分,普遍生长于裸露的石壁上,生长需要一定的散射光及荫蔽

2 张关溶洞照明光源与灯光植物现状

2.1 张关溶洞内灯光植物生长状况

张关溶洞位于距重庆市主城区 52 km 的渝北区境内,是经过漫长地质运动形成的具有四层溶洞的“天然地质博物馆”,拥有极大的研究和旅游价值,吸引着各个领域的研究学者和中外游客。张关溶洞内全无天然采光,溶洞景致丰富,地下三重瀑布极为罕见,溶洞内嵌长约 1 km 的狭长河道,地下河水终年不断,河水随雨水多寡而涨落,提供游人泛舟观赏,溶洞内空气湿润冬暖夏凉,常年恒温 18 ℃。溶洞内重要景观节点景观照明见图 1。

环境,对光照有一定的需求。蕨类植物是生长广泛且极具侵略性的绿色植物,有真正的根、茎、叶和维管组织,其植物叶片兼具光合作用制造有机物和产生孢子繁殖子代的功能特性^[7]。调研发现,凡人工光源照射处均有灯光植物生长(图 2)。

利用 XYI—Ⅲ 全数字照度计对生长灯光植物处光照强度进行测量,在植物被照面均匀取点进行多次测量并计算平均照度值。整理记录测量结果、植物种类名称、植物株高及照射距离见表 1。

3 张关溶洞照明光源技术参数

3.1 溶洞照明的人工光源光谱能量分布参数

天然的日光光谱是植物生长最适宜光谱,对金卤灯、荧光灯光源光谱能量分布与日光光谱比较(图 3)发现,其光谱能量分布与天然日光不同,荧光灯、金卤灯光谱各能量段比例较平均,对灯光植物的生长起到促进作用^[17]。金卤灯为气体放电光源,不同颜色金

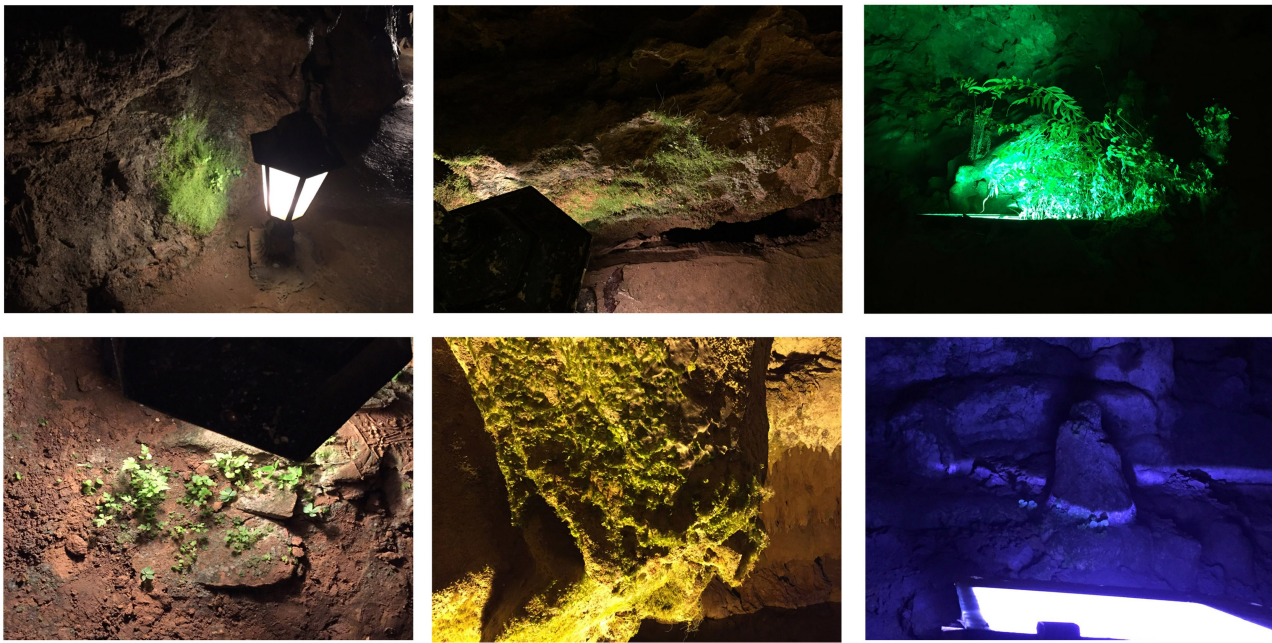


图 2 张关溶洞的灯光植物生长情况

Fig. 2 Growth of lighting plants in Zhangguan karst cave

表 1 张关溶洞照明与灯光植物生长统计表

Table 1 Statistics of green plants and lighting of Zhangguan karst cave

植物名称	人工光源	平均照度/ lux	最高照度/ lux	植物株高/ cm	照射距离/ cm
蹄盖蕨 <i>Brake fern (Athyriaceae)</i>	绿光金卤灯	93	188	20~30	0~30
山羽藓 <i>Feather moss Hill (Abietinella abietina)</i>	白光金卤灯	96	220	3~10	10~30
葫芦藓 <i>Funaria hygrometrica (Funaria hygrometrica Hedw.)</i>	荧光灯	89	180	0.5~1	10~30
地耳蕨 <i>Ground ear fern (Quercifilix zeylanica (Houtt. Cop.))</i>	蓝光金卤灯	85	162	0.5~1	10~30
凤尾苔 <i>Phoenix moss (Fissidnes bryoides)</i>	黄光金卤灯	89	206	0.5~1	10~30

卤灯区别在于光谱能量分布的中心波长范围不同。白光金卤灯波峰范围在 600 nm 附近,黄光金卤灯波峰范围在 580 nm 附近,绿光金卤灯波峰范围在 510 nm 附近,蓝光金卤灯波峰范围在 470 nm 附近。通过表 1 可知,不同光谱能量分布下的植物类型有所不同。绿光金卤灯与蓝光金卤灯照射下生长大量蕨类植物,可见波峰在 470~510 nm 的金卤灯利于蕨类植物生长;黄光金卤灯、白光金卤灯及荧光灯下灯光植物以苔藓类为主,可见波峰在 580~600 nm 的金卤灯利于苔藓植物生长。荧光灯、金卤灯光源附近灯光植物长势茂盛,因而金卤灯、荧光灯并不适宜于溶洞照明。

植物对光辐射波长为 400~700 nm 区域非常敏

感^[18],且对光谱能量的需求是具有一定比例的,仅补充单色光对绿色植物生长并无益处^[19]。根据植物光合有效辐射图(图 4)可知,绿色植物光合作用主要吸收光谱能量分布在 400~500 nm(紫光、蓝光)及 600~700 nm(橙光、红光),而 500~600 nm(黄光、绿光)不能提供绿色植物光合作用能源。因此,溶洞照明选择光谱仅分布于 500~600 nm(黄光、绿光)的窄光谱光源(图 5)能够有效抑制绿色植物生长,例如,窄光谱黄光 LED、绿光 LED,或光谱能量分布在此范围的其他光源。黄光、绿光金卤灯并不是窄光谱光源,其各光谱段能量分布较均匀,仅是中心波长分布在 500~600 nm 之间,所以,即使为黄色、绿色灯光,仍会引起绿色植物生长。

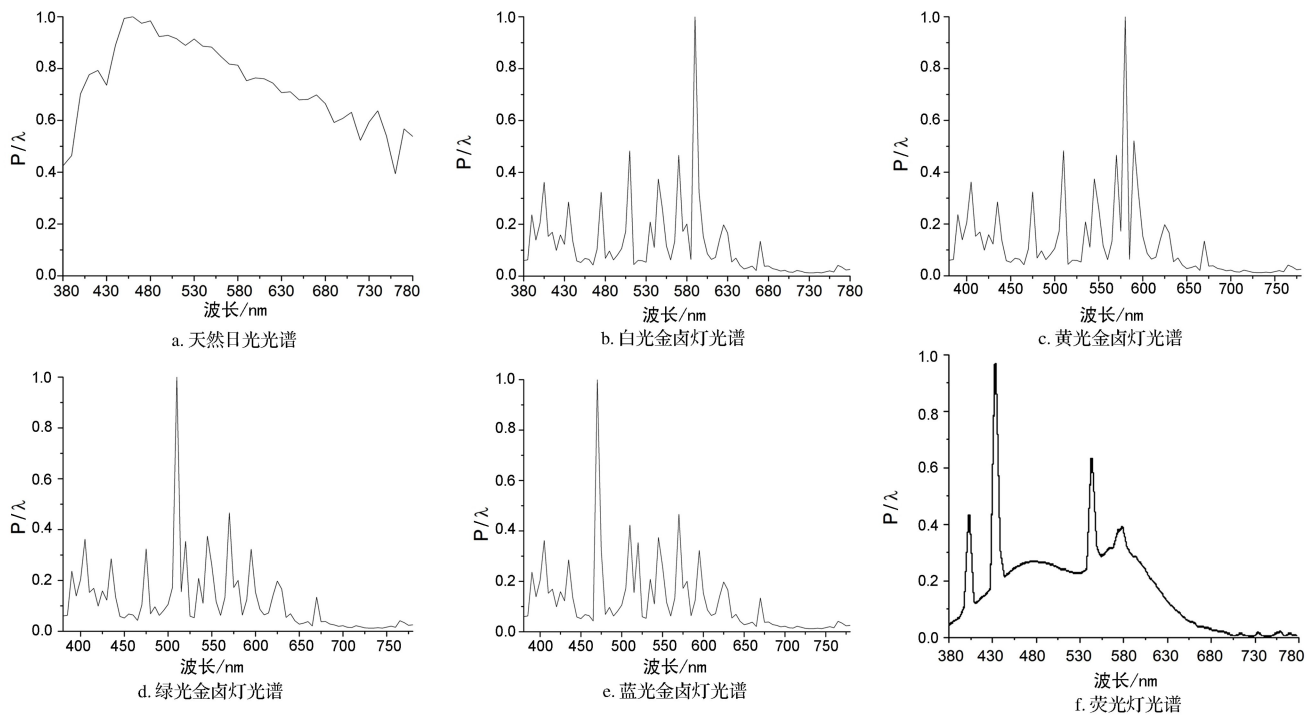


图 3 光谱能量分布范围

Fig. 3 Artificial light spectrum

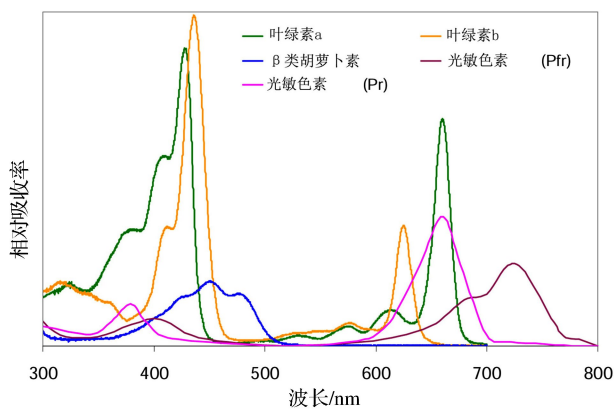


图 4 植物光合有效辐射图

Fig. 4 Photosynthetically active radiation map of plants

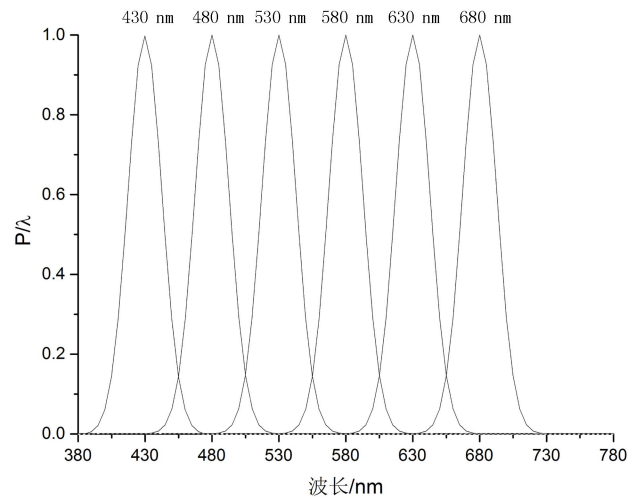


图 5 窄光谱单色光光谱能量分布图

Fig. 5 Energy distribution map of narrow spectral monochromatic light

3.2 溶洞照明的人工光源光照强度参数

随着光照强度变化,张关溶洞的灯光植物长势也有所不同。绿光金卤灯照射下的蹄盖蕨 *Brake fern* (*Athyriaceae*) 最高光照强度达 188 lux, 平均光照强度达到 93 lux, 随光照强度降低株高变低, 光源附近长势极为茂盛, 平均株高达到 20 cm, 大部分具有极强的向光性, 已经完全遮挡住了光源, 距离光源较远处低照度下株高逐渐降低。蓝光金卤灯下蕨类长势较稀疏, 地耳蕨 *Ground ear fern* (*Quercifilix zeylanica* (Houtt.) Cop.) 的最高光照强度达 1 621 lux,

平均照度为 85 lux, 生长在光源较远处, 在低光照强度的蓝光下生长状态较好。黄光金卤灯下的凤尾苔 *Phoenix moss* (*Fissidnes bryoides*) 最高光照强度达 206 lux, 平均光照强度为 89 lux, 分布均匀、不密集。白光金卤灯下的山羽藓 *Feather moss Hill* (*Abietinella abietina*) 最高光照强度达 220 lux, 平均光照强

度为 96 lux, 长势健壮且相对稀疏。荧光灯下苔藓植物分布极为密集, 在光照强度为 89~180 lux 周围区域以葫芦藓 *Funaria hygrometrica* (*Funaria hygrometrica* Hedw.) 生长为主, 周边低光照区域生长其他藓类。

根据植物的生理特点, 当光照强度超过植物的光补偿点时, 绿色植物就可以进行能量积累, 促进植物的生长; 当光照强度超过植物光饱和点时, 会损害植物的光合机制, 长时间照射会造成植物死亡。在天然光照情况下, 阳性植物光补偿点是 1 000~2 000 lux, 阴性植物光补偿点是 100~500 lux; 阳性植物的光饱和点在 20 000~25 000 lux, 阴性植物的光饱和点在 5 000~10 000 lux。所以, 当人工光源光照强度低于 100 lux 时, 大量绿色植物不能够进行能量积累而无法生长, 利于溶洞的生态照明。虽然张关溶洞内光源光照强度较低(为 96 lux), 但最高光照强度均在 162~220 lux 之间, 因此, 有灯光植物生长。同时, 过高的光照强度也可起到对植物生长的抑制作用, 当光照超过 20 000 lux 时, 植物光合机制受损, 遏制植物生长, 因此, 高光照强度也可作为溶洞景观照明的参考。

4 结论与建议

通过对张关溶洞的景观照明研究, 根据人工光源光谱能量分布、光照强度与灯光植物生长的关系分析得出: (1) 溶洞利用传统光源照明时, 光照强度高于 20 000 lux 时可破坏绿色植物的生理系统, 达到消除灯光植物的目的, 但高光强会改变溶洞其他资源环境, 也容易产生炫光且能耗大, 不建议大面积使用; (2) 溶洞照明利用传统光源时, 人工光源最高光照强度应控制在 100 lux 以下, 才不会提供灯光植物足够的光照生长能量, 可达到防治植物生长的目的, 但应减少 580~600 nm 及 470~510 nm 的光谱能量光源的使用, 尽量选用红光(640~750 nm)、橙光(600~640 nm)、紫光(400~450 nm), 避免诱发蕨类植物及苔藓植物生长; (3) 如选用第四代新型 LED 光源, 建议选用绿色植物不能够吸收的 500~600 nm(黄光、绿光)窄光谱段进行照射, 这个光谱段不提供植物生长光谱能量, 可遏制绿色植物生长。

综上所述, 结合观赏性与科学性, 溶洞照明设计中以光谱能量分布在 500~600 nm 窄光束 LED 黄光为主, 配以光照强度低于 100 lux 的其他颜色光源, 如红光、橙光、紫光的传统光源, 可达到抑制绿色植物生长的最佳效果。

参考文献

- [1] 张昭霖. 溶洞的规划设计[J]. 中国园林, 1997, 13(2): 15-16.
- [2] 翁子凡, 杨晓霞, 向旭, 等. 喀斯特洞穴灯光照明系统研究述评与展望[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2): 255-262.
- [3] 张美良, 朱晓燕, 吴夏, 等. 旅游活动对巴马水晶宫洞穴环境及碳酸钙沉积物景观的影响[J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 119-130.
- [4] 孙成国, 黄俊发. LED 光源在旅游洞穴景观照明中的应用[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 83-89.
- [5] 段然. 鄂西南岩溶洞景的保护与开发研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
- [6] 鲍青青, 刘胜峰. 岩溶旅游地生态安全动态评价与障碍因子分析: 以桂林为例[J]. 中国岩溶, 2017, 36(3): 407-414.
- [7] 孙丹. 溶洞浮游硅藻群落特征与环境因子关系分析[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
- [8] 从春蕾, 刘天雷, 孔祥远, 等. 贵州普定喀斯特受损生态系统石生藓类植物区系及物种多样性研究[J]. 中国岩溶, 2017, 36(2): 179-186.
- [9] 杨志清. 溶洞照明中金属卤化物灯的控制方法[J]. 光源与照明, 2004(2): 20-21.
- [10] 朱文孝, 李坡, 苏维词. 喀斯特旅游洞穴景观多样性特征及其保护[J]. 经济地理, 2000, 20(1): 103-107.
- [11] Toomey R S, Olson R A, Kovar S. Relighting Mammoth Cave's New Entrance: improving visitor experience, reducing exotic plant growth, and easing maintenance[C]//Whit W B. Proceedings of the 15th International Congress of Speleology [M]. Kerrville: Greyhound Press, 2009: 1223-1228.
- [12] Johnson K. Control of Lampenflora at Waitomo Cave Management in Australia III: Proceeding of the Third Australasian Cave Tourism and Management Conference[M]. Mount Gambier: National Parks and Wildlife Service, 1980: 105-122.
- [13] Cigna A A. Show cave development with special references to active cave[J]. Tourism and Karst Areas, 2011, 4(1): 7-16.
- [14] Mulec J. Human impact on underground cultural and natural heritage sites, biological parameters of monitoring and remediation actions for insensitive surfaces: case of Slovenian show caves[J]. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(2): 132-141.
- [15] Grobbelaar J U. Lithophytic algae: A major threat to the karst formation of show caves[J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12(3-5): 309-315.
- [16] Boyee P R. Education: the key to the future of lighting practice[J]. Lighting Research and Technology, 2006, 38(4): 283-294.
- [17] 段然, 杨春宇, 陈霆. 园林照明对景观植物叶片色彩影响研究[J]. 中国园林, 2016, 32(1): 83-86.
- [18] Balegh S E, Biddulph O. The photosynthetic action spectrum of the bean plant[J]. Plant Physiology, 1970, 46(1): 1-5.
- [19] 杨春宇, 段然, 马俊涛. 园林照明光源光谱与植物作用关系研究[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(6): 24-27.

Study on landscape lighting of Zhangguan karst cave in Chongqing

DUAN Ran^{1,2}, YANG Chunyu², SU Jiafu³

(1. College of Art, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing Technology
and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract Karst cave lighting promotes the development of karst cave tourism. However, the unscientific cave lighting causes the growth of the light plants in the cave, which destroys the special environment in the cave. In this paper, the relationship between the growth of light plant and the artificial light source of cave lighting are studied by measuring the intensity of light and plant growth and surveying the spectral energy distribution of the cave lighting source in the optical laboratory. The research results show that, (1) When the light intensity is higher than 20,000 lux, the green plant physiological system will be destroyed, which inhibits the growth of the light plant in the cave; (2) When the traditional light intensity is under 100 lux, it can't provide enough energy for the growth of the light plant, which can achieve the purpose of preventing and controlling the growth of the light plant; (3) The artificial light source in the narrow light spectrum of 500—600 nm (yellow light and green light), such as yellow LED and green light LED, can inhibit the growth of green plants.

Key words landscape lighting, light plants, Zhangguan karst cave

(编辑 黄晨晖)

· 新书简讯 ·

《云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究》专著出版发行

由王宇、张贵、张华等编著的《云南省岩溶水文地质环境地质调查与研究》一书于 2018 年 6 月由地质出版社出版发行。

专著以地球系统科学理论为指导,应用水文地质、工程地质、环境地质学的分析方法,通过历史和宏观层面上的统计分析、典型点解剖、流域评价,从全省岩溶水文地质及环境地质特征、调查区地质环境条件、水文地质及地下水资源评价、重大环境地质问题及防治措施、岩溶地下水开发利用示范五个方面,对 1999 年至 2014 年云南省水文地质环境地质调查与研究成果进行了全面的总结。该书系统论述了高原岩溶石山地区的水文地质及环境地质条件,深化了对岩溶发育规律的认识,归纳总结了地下水富集规律,提出了新的岩溶水源地分类方案,评价了岩溶水开发技术条件,重新评价了地下水资源;厘清了重大环境地质问题,系统掌握了各类重大环境地质问题的基本特征和危害程度,提出了防治措施与建议;总结了岩溶水开发利用示范成果,重点对创新性工程和流域示范进行了分析评价,建立了岩溶水科学开发利用的模式,集成了岩溶水有效勘查开发利用方案。这一成果集成大大丰富了水文地质环境地质基础数据,提高了高原岩溶水文地质环境地质研究程度和科技水平,为经济社会发展、生态文明建设、资源开发与保护、防灾减灾、教学科研提供了科学依据及丰富的资料。