

基于反射光谱的景观水体表观质量的测量研究

王 军¹ 黄 勇^{2*} 吴泉英¹ 潘 杨² 范君柳¹ 王 帆¹

(¹ 苏州科技学院数理学院, 江苏 苏州 215009
² 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009)

摘要 为了客观、定量地评价城市景观水体的表观质量,提出了一种基于反射光谱的水体表观质量的测量和评价方法。在光学暗室中,利用卤素灯模拟日光照明,使用光谱仪测量水体的反射率和反射光谱数据,定量研究水体反射率特征值与水体浊度的关系、反射光光谱与水体色度间的关系,进而综合浊度与色度与表观质量的定量关系,定义了水体表观质量品质因子的计算公式,从而实现了定量评价表观质量的目的。该方法综合考虑了水体的浊度和色度信息对表观质量的影响,并可避免环境、时间等因素对测量的影响。

关键词 测量;景观水体;表观质量;感官评价;反射光谱;水体色度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.111203

A Study on the Evaluation Method of Apparent Quality for Scenic Water Using the Reflection Spectrum

Wang Jun¹ Huang Yong² Wu Quanying¹ Pan Yang² Fan Junliu¹ Wang Fan¹

¹ School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou, Jiangsu 215009, China

² School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou, Jiangsu 215009, China

Abstract In order to evaluate the apparent quality of scenic water objectively and quantitatively, a method is proposed to measure and evaluate the apparent quality of scenic water. The scenic water is illuminated by halogen lamps in the dark room, while the reflectivity and reflection spectrum data is measured by a spectrometer. The relation between reflectivity and turbidity of water as well as the relation between reflection spectrum and chroma of water are quantified respectively. By which the apparent quality factor of scenic water is defined to evaluate the apparent quality of scenic water. The affects of the water turbidity and chroma are both considered in this method, and the influence of time and surroundings can be avoided.

Key words measurement; scenic water; apparent quality; sensory evaluation; reflection spectrum; chromaticity of water

OCIS codes 120.5700; 260.1440; 260.2130

1 引言

景观水体作为城市景观的重要组成部分在城市系统中具有非常重要的功能,例如调控城市温度,减弱洪涝灾害,为城市生物多样性提供物质基础,提供景观娱乐场所,产生社会及经济效益等^[1,2]。然而,城市景观水体目前面临非常严重的表观污染问题,使得水体颜色、浑浊度等表观性状变差,甚至出现黑臭、水华现象,导致居民产生不适的表观感受,水体景观功能失效,严重影响城市形象、城市生态环境和居民健康。因此治理城市景观水体的水质,恢复其良好的表观性状,改善居民对景观水体的表观感受是社会发展和城市建设中急需解决的问题。

收稿日期: 2012-06-10; 收到修改稿日期: 2012-07-09; 网络出版日期: 2012-08-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50938005)资助课题。

作者简介: 王 军(1981—),男,博士,讲师,主要从事光学干涉测量方面的研究。E-mail: wjk31@163.com

* 通信联系人。E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

人对水体的表观表述具有主观性,且易受时间、日照等环境因素的影响,因此为了客观地评判景观水体的治理效果,需要建立一种科学的、客观的水体表观的评价方法,即利用仪器对水体的表观特性进行客观测量,通过逻辑计算对水体的表观质量进行正确度量。

目前,景观水体表观质量的评价方法的研究主要有两种:

1) 从水体污染的极端现象黑臭入手研究水体表观质量的划分。黑臭评价方法总体可分为两大类:临界指标法和判别关系式法^[3~6]。临界指标法,先根据水体污染源及其它环境因素,选定引起水体黑臭的关键指标,进而测量所选指标值,然后与所选指标阈值相比较,如果超过所选指标阈值则表明水体黑臭。判别关系式法是根据影响水体黑臭的主要环境因素和黑臭状况关键指标的回归方程判断水体的黑臭程度。上述研究的进展停留在如何表征水体黑臭这种极端表观的情况,而城市景观水体一般为非黑臭水体,上述方法并未给出非黑臭水体的表观质量评价方法。

2) 利用水体的吸收光谱研究其表观质量的评价方法^[7]。该方法使用分光光度计测量水体的吸收光谱曲线,通过研究曲线的最大吸光度、平均吸光度、出现最大吸光度处所对应的波长、起始点与曲线趋于平缓点之间的水平距离以及曲线平缓处相对 x 轴的垂直距离等参数,得到水体表观与光谱曲线的定性关系,但并未做定量关系的研究。

综上所述,目前尚缺少一种客观、定量的评价景观水体表观质量的方法和标准。本文在实验暗室中构建水体表观测量系统,使用卤素灯模拟日光照明,避免环境、时间等因素对测量的影响。测量水体的反射光谱、反射率,定量研究分析光学参数与水体表观质量之间的关系,定义品质因子算法,实现了定量评价水体表观质量的目的。

2 原 理

人对景观水体表观质量的感知主要源于水体反射光携带的信息,景观水体的表观质量主要表现在两方面:水体的浊度和色度,而浊度与水体的反射率、色度与水体反射光谱之间都具有定量关系,因此通过分析景观水体的反射光即可定量的评价景观水体的表观质量。

对于一定深度、一定表面积的水体其反射率与浊度的关系为:水体越浑浊,水体反射率越大。相对水体的浊度,人对水体的色度信息的感知更加直接和敏感,表观质量良好的水体一般呈现无色或浅绿色,随水体表观质量的下降,水体逐渐呈现深绿色、土黄色、褐色甚至黑色。人对水体颜色的感知具有主观性,因此必须定量测量水体的色度值以客观地反映水体的颜色信息。

人眼对景观水体的颜色感知主要来自水体的反射光,且人眼的颜色视觉是视网膜上三种锥体细胞对 380~780 nm 范围的光辐射可选择性吸收而产生的,这种可选择性的颜色刺激可用光谱功率分布函数 (SPD) 来表示。不同人的三种锥体细胞的光谱功率分布有所不同,为了统一色度学中的评价标准,1931 年国际照明委员会 (CIE) 在 XYZ 色度系统的基础上,制定了“CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值”。利用水体反射光的辐射光谱分布 $S(\lambda)$ 和“CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值”即可计算出水体反射光颜色的 X 、 Y 、 Z 色度值^[8,9]:

$$X = \int_0^{\infty} \bar{x}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad Y = \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad Z = \int_0^{\infty} \bar{z}(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为“CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值”。 X 、 Y 、 Z 色度值与颜色的 RGB 值之间的关系为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.41845 & -0.15865 & -0.08283 \\ -0.09116 & 0.25242 & 0.01571 \\ 0.00092 & -0.00255 & 0.17859 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

同一颜色可以用不同的色度系统表示,如 XYZ 色度系统、RGB 色度系统、HSV (H 色调, S 饱和度, V 亮度) 色度系统等,其中 XYZ、RGB 等色度系统至少需要用两个色度分量值确定一种颜色,而 HSV 色度系统中,色调 H 值与颜色具有一一对应关系,且 V 亮度分量与色调分量互相独立,即亮度的变化不会影响颜色

的色调,因此选取 HSV 色度系统中的色调值 H 定量地表征水体反射光的颜色,其与 RGB 色度值的关系为

$$H = \begin{cases} \arccos \frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}}, & G \geq B \\ 2\pi - \arccos \frac{[(R-G) + (R-B)]/2}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}}, & G < B \end{cases} \quad (3)$$

3 景观水体表观质量的定量评价

3.1 测量系统

为了避免景观水体周围环境、时间等因素对测量的影响,采集景观水体至暗室中测量。测量系统如图 1 所示,由机械结构、光源、光谱仪和水箱(口径 460 mm,高度 400 mm)构成,其中被测景观水体置于黑色水箱中,利用卤素灯仿真太阳光,照明水体,使用海洋光学 QE65000 型光谱仪接受水体的反射光,获取光谱曲线和反射率数据。

3.2 测量

分别采取苏州市百吉桥、沧浪亭、石湖、金鸡湖和太湖五处的景观水体,通过在取水地实地观察,上述水体的表观质量由差到优分别为:百吉桥的水体表观质量明显最差,水体浑浊,发臭,呈黄绿色;沧浪亭附近水体呈土褐色,但无臭味;石湖和金鸡湖的水体表观基本一致;太湖的水体表观质量最好。为了客观、定量地分析上述景观水体的表观质量,在暗室中使用图 1 所示的设备测量五种水体在相同水深($L_w = 280$ mm)情况下的反射率和反射光谱曲线,同时测量自来水的反射率和反射光谱曲线作为参考。

3.2.1 水体反射率的测量

五种景观水体和自来水的反射率曲线如图 2 所示,不同水体的反射光谱曲线不同,在所有被测水体中,自来水最清澈,水质最佳,其反射率曲线最低;五种景观水体的反射率曲线由高到低依次为:百吉桥、沧浪亭、石湖、金鸡湖和太湖,与在取水地观察得到的表观质量排序相同,即水体表观质量越差,反射率曲线越高。

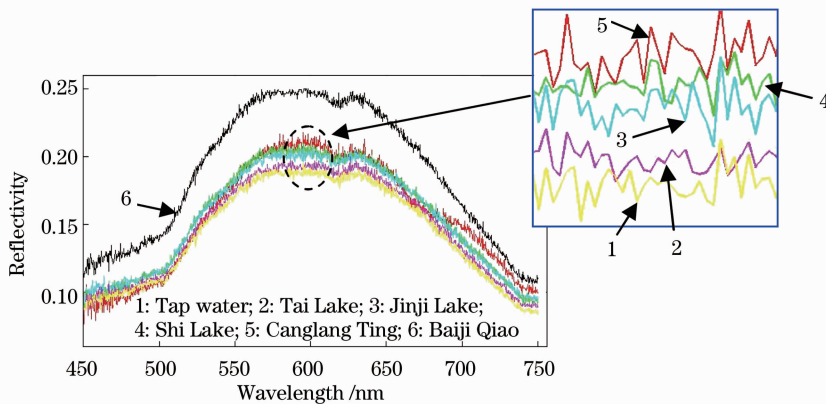


图 2 不同景观水体的反射率曲线图

Fig. 2 Reflectivity of different scenic water

为了用与反射率相关的特征值 S_r 表示表观质量,将各水体反射率曲线中所有波长对应的反射率相加,得到该水体在可见光谱段内的反射率之和,并将其归一化,如图 3 为各水体归一化 S_r 值的分布。从中明显看出, S_r 值越大,水体越浑浊,表观质量越差,其总体分布与人眼在实地观察的表观质量基本一致,因此 S_r 值可定量评价水体的表观质量。

3.2.2 水体色度的测量

为计算水体反射光的色调值 H ,需先测量各水体的反射光谱 $S(\lambda)$,图 4 为使用 QE65000 型光谱仪测得

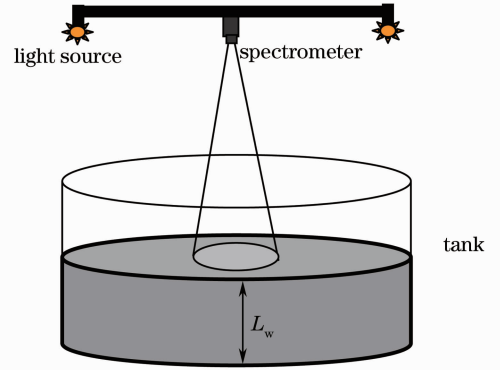


图 1 景观水体测试设备

Fig. 1 Test setup of scenic water

的各水体的反射光谱曲线。利用(1)~(3)式便可计算得到水体反射光颜色的色调值 H ，将五种景观水体与自来水的色调值相减，得到景观水体与自来水色调值的偏差 ΔH ，如图 5 所示，其中太湖、金鸡湖和石湖与自来水色调值分别为 $\Delta H_2 = 2.3 \times 10^{-4}$ 、 $\Delta H_3 = 0.57 \times 10^{-4}$ 、 $\Delta H_4 = 4.9 \times 10^{-4}$ ，相对其他水体与自来水的差距较小，表观质量也相对较好；沧浪亭水体显土褐色，与自来水颜色区别最大，其色调偏差也最大 $\Delta H_5 = 1.61 \times 10^{-3}$ ；百吉桥水体显黄绿色， $\Delta H_6 = 1.46 \times 10^{-3}$ ，其色度偏差虽小于沧浪亭水体样品，但其浊度明显高于沧浪亭样品，因此水体的表观质量需综合考虑其浊度和色度，即反射率特征值 S_r 和色调值偏差 ΔH 。

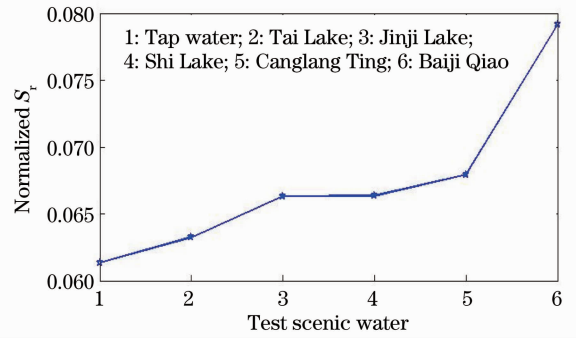


图 3 景观水体的归一化 S_r 值分布
Fig. 3 Normalized S_r of scenic water

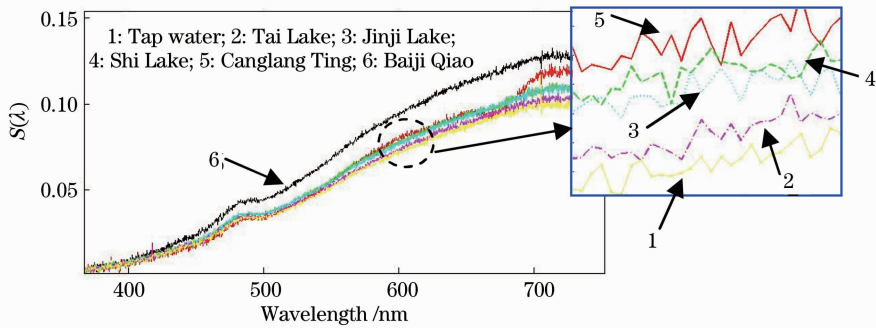


图 4 水体的反射光谱

Fig. 4 Reflection spectrum of scenic water

在图 3 中，金鸡湖与石湖的 S_r 值相差很小，不易区分两水体中的差别，而金鸡湖与石湖水体的色调偏差值 ΔH 差别明显，如图 5 所示，因此为了增大 S_r 值相近的水体的区分度，用水体的 ΔH 值修正 S_r 值，修正公式为

$$Q = 15.0S_r + 90.0\Delta H, \tag{4}$$

式中 Q 为表征水体表观质量的品质因子，其值越大，表观质量越差，如图 6 所示。

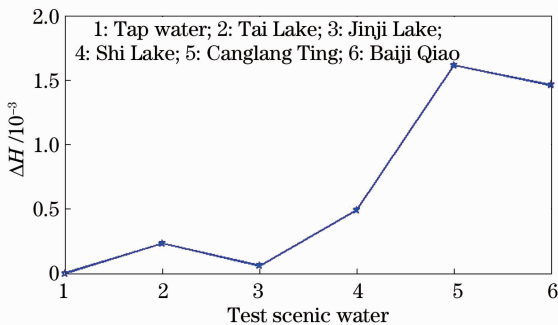


图 5 景观水体与自来水的色调偏差
Fig. 5 Hue deviations of scenic water and tap water

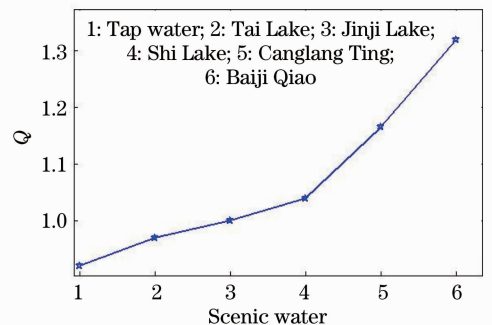


图 6 水体品质因子的分布
Fig. 6 Apparent quality factors of scenic water

3.2.3 实验验证

为了验证(4)式表观质量品质因子计算公式的合理性，采集苏州市官太尉的景观水体进行测量，得到其 S_r 值为 0.0718，色调偏差值 $\Delta H = 1.33 \times 10^{-3}$ ，代入(4)式得品质因子 $Q = 1.19$ ，其品质因子在沧浪亭和百吉桥之间，这与现场观察到的水体表观质量相吻合。

4 分 析

测量系统中 QE65000 型光谱仪的光纤探头接收角为 $\theta=15^\circ$, 光纤探头距水面高度 $h=120\text{ mm}$, 因此光谱仪仅接受面积为 $S_h = \pi(h \tan \alpha)^2 = 784\text{ mm}^2$ 的水面反射光, 水深 L_w 越浅, 探头距离水面距离 h 越大, 接收面积越大, 反射率越高。如图 7 所示, 分别测量了 $L_w = 100\text{ mm}$ 、 120 mm 的水体反射率, 100 mm 水深反射率明显高于 120 mm 水体, 因此在实验中必须严格保证不同被测景观水体在测量系统中的深度保持一致。

此外, 水体深度越深, 其色度特征越明显, 但过高的水深会增大测量系统和水体样本的体积, 因此实验应在测量条件允许的前提下, 尽量增大水深。

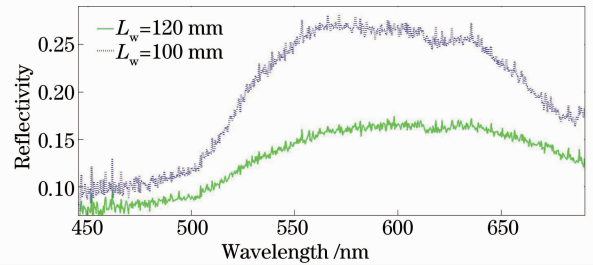


图 7 不同深度水体的反射率曲线图

Fig. 7 Reflectivity of scenic water with different depths

5 结 论

在暗室中, 利用卤素灯模拟日光照射, 利用光谱仪测量景观水体的反射率和反射光谱, 通过定量分析反射率与反射光谱及水体表观质量之间的关系, 可知水体越浑浊, 表征水体反射率的 S_r 值越大, 水体反射光的色调与自来水反射光色调的偏差越大, 人对水体颜色的感官越差。为综合水体浊度和色度对表观质量的影响, 并提高相近水体的区分度, 定义品质因子用于定量评价水体的表观质量, 实验研制了该方法的合理性, 初步实现了定量评价景观水体表观质量的目的。然而目前实验中水体样品数量有限, 品质因子公式的适用性还未在更广范围内得到验证, 下一步的研究工作即为增大水体样品数量, 进一步修正品质因子公式。

参 考 文 献

- 1 S. V. Smith, W. H. Renwick *et al.*. Distribution and significance of small, artificial water bodies across the United States landscape [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **299**: 21~30
- 2 Zhao Shuging, Fang Jingyun, Wei Ji *et al.*. Lake restoration from imploding: impact of land conversion on riparian landscape in Honghu Lake area, Central Yangtze[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2003, **95**(1): 111~115
- 3 Ying Tailin, Zhang Guoying, Wu Xinxin. The mechanism of blackening and stink and effects of resuspended sediments on Suzhou creek water quality[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1997, **16**(1): 23~26
应太林, 张国莹, 吴芯芯. 苏州河水体黑臭机理及底质再悬浮对水体的影响[J]. *上海环境科学*, 1997, **16**(1): 23~26
- 4 Li Xiangli, Zhang Pengcheng, Yu Hongcun. Analysis on black color and odor of Weigong River in Shenyang [J]. *Environmental Protection Science*, 2003, **29**(5): 27~28
李相力, 张鹏程, 于洪存. 沈阳市卫工河黑臭现象分析[J]. *环境保护科学*, 2003, **29**(5): 27~28
- 5 Luo Jiahai. The major reason influencing darkening and smelling of partial water in Guangzhou reach pearl water [J]. *Guangzhou Environmental Sciences*, 2001, **16**(2): 10~13
罗家海. 影响珠江广州河段局部水体黑臭的主要原因剖析[J]. *广州环境科学*, 2001, **16**(2): 10~13
- 6 Hu Guochen, Wang Zhong, Chang Xiaoqing. Study on water quality index for preventing black and offensive odor water [J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 1999, **18**(11): 523~525
胡国臣, 王 忠, 常晓青. 预防水体黑臭的水质指标研究[J]. *上海环境科学*, 1999, **18**(11): 523~525
- 7 Li Pengzhang. A Study on the Characterization Method of Apparent Pollution for Scenic Water[D]. Suzhou University of Science and Technology, 2008
李鹏章. 景观水体表观污染的表征方法研究[D]. 苏州: 苏州科技学院硕士论文, 2008
- 8 Liu Zhaodong, Bian Jiang, Wang Jun *et al.*. Computer simulation and application of white light interference color [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 303~307
刘兆栋, 边 疆, 王 军等. 白光干涉色的计算机仿真及应用 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(S1): 303~307
- 9 Takenori Kato. A method to synthesize interference color chart with personal computer [J]. *J. Geol. Soc. Japan*, 2001, **107**(1): 64~67