

校园绿地夏季小气候效应分析

冯悦怡¹ 李恩敬² 张力小^{1,†}

1. 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875;
2. 北京大学环境保护办公室, 北京 100871; †通信作者, Email: zhanglixiao@bnu.edu.cn

摘要 为评估不同绿地类型对校园小气候的改善作用, 尤其是对人体舒适度的影响, 选取北京大学校园内有代表性的 4 处校园绿地(半天然乔-灌-草、人工乔-灌-草、人工乔-草、人工草坪), 在 2012 年夏季 7—8 月对其内部温湿度进行连续 32 天的 24 小时同步监测。结果表明: 夏季高温季节, 各类型校园绿地相对于无绿化地面均表现出显著的降温增湿效应, 尤其是北京大学校园内的半天然林发挥着重要的生态调节功能; 在约 1 个月的观测期内, 各类绿地对人体舒适性均有一定的改善, 改善程度上呈半天然乔-灌-草>人工乔-草>人工乔-灌-草>人工草坪的趋势, 但效果并不如降温增湿效应明显; 从一天的不同时段来看, 早晚时段人工草坪的舒适度改善作用较为明显, 高温时段不显著。总体来讲, 北京大学校园内部分绿地夏季对舒适度的改善作用未根据其不同的功能需求得到充分发挥, 在未来校园绿地建设中应得到进一步关注。

关键词 校园绿地; 温度; 相对湿度; 舒适度

中图分类号 P404

Microclimate Effects of Campus Green Space in Summer

FENG Yueyi¹, LI Enjing², ZHANG Lixiao^{1,†}

1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875; 2. Office of Environmental Protection, Peking University, Beijing 100871;
† Corresponding author, E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

Abstract Four representative types of green space including tree-shrub-herbage semi-natural mixture, tree-shrub-herbage artificial mixture, tree-herbage artificial mixture, and artificial lawn were selected in the campus of Peking University to study the improvement effects of green space on campus microclimate, especially on the human comfort. The air temperature and relative humidity were measured every one hour from 0:00 to 24:00 every day for continuously 32 days during July and August in 2012. The results indicate that all types of green space show significant cooling and humidification effects compared with the concrete floor in hot summer. Among these, the semi-natural forests perform a very important ecological regulatory function. During the observation period, all types of green space improve the human comfort degree to a certain extent, which are ranked in an order of tree-shrub-herbage semi-natural mixture > tree-herbage artificial mixture > tree-shrub-herbage artificial mixture > artificial lawn, but the improvement effect is not as obvious as their cooling and humidification effects. From the perspective of the different times of a day, the comfort improvement of the green space is more obvious early in the morning and late in the evening than that at any other time of a day. As a whole, some parts of the green space in the campus of Peking University don't give full play to the improvement effects of the campus comfort according to the various functional requirements in summer, which deserves further attention in the campus green space construction.

Key words campus green space; temperature; relative humidity; comfort index

城市化进程的加剧引发城市高层建筑、机动车辆、人为热源的激增以及城市用地性质的巨大改变, 这些因素共同作用导致城市热岛效应、大气污染和生态失衡等诸多环境问题。其中, 以城市热岛效应为代表的城市热环境恶化已成为影响城市生态环境的重要因素, 并且严重制约城市人居环境的改善^[1-2]。绿地作为城市结构中的自然生产力主体, 具有明显的改善空气质量、降温增湿、调节局地小气候等多种生态功能, 是缓解城市热岛效应和改善城市热环境的有效途径^[3-4]。大学校园绿地既是城市绿地景观的重要组成部分, 又是独立于城市绿地的封闭系统, 在校园生态系统中发挥着重要的生态调节和服务功能。

北京大学校园位于北京西北部海淀区北侧, 西山山麓前沿, 在明清两代是著名的皇家园林。绿地景观是校园内重要的造景因素, 校园绿化覆盖面积为 8712 hm², 绿化覆盖率达 53.88%^[5]。实现校园绿地生态效益和服务功能的最大化, 使其更有效地改善校园小气候, 提高校园环境的舒适性, 具有重要意义。

近年来, 国内外学者对不同类型绿地和绿化植物的生态效益做了大量的研究, 结果表明: 绿地面积、覆盖率、林型、冠层结构等空间结构因子均会对其生态功能的发挥产生不同程度的影响^[6-10]; 特别是在绿化二维指标相近时, 绿地对温、湿度调节能力的大小与其立体空间结构和植物平面布局关系密切^[11-14]。然而, 以往研究更多侧重于绿地自身降温增湿效应的评价, 没有落实到作为绿地服务主体“人”的切身感受上。因此, 本文以北京大学校园内几处较具代表性的绿地为例, 将人体舒适度作为主要评价指标, 定量评估夏季不同绿地对校园小气候的改善作用, 为建设更舒适的校园环境提供一定的参考。

1 试验地与研究方法

1.1 样地选择

根据研究目标, 在北京大学校园内选取 4 个人群活动较多, 并具有较好绿化代表性的区域进行空气温湿度监测, 其中 3 处分别是: 位于未名湖附近的人工乔-灌-草绿地(P1)、南阁西侧的人工乔-草绿地(P3)以及静园人工草坪(P4)。此外, 在办公楼东侧、未名湖南岸的起伏山丘上, 经过近 80 年的人工改造和自然演替, 形成成片的半天然林^[15], 在

校园绿地中具有一定的特殊性, 从中选取一块样地进行研究, 即半天然乔-灌-草绿地(P2)。在远离绿地区域的逸夫二楼天井内的水泥地面另设一个对照观测点(PR)。样地植物构成大致相同, 彼此之间距离较远, 不存在交互影响。样地位置见图 1, 样地特征见表 1。

1.2 试验内容与方法

观测时间选择在绿地对生态改善作用最明显的夏季进行。于 2012 年 7 月 4 日至 8 月 4 日对选定样点的温、湿度进行连续 32 天的 24 小时观测, 观测间隔时间为 1 小时。测量仪器采用 Onset 计算机公司生产的 HOBO[®] Pro 温、湿度数据采集器(温度测试精度为±0.05℃, 相对湿度测试精度为±3%), 仪器设置在距地面 1.5 m 处(人体对温、湿度最敏感的感知高度), 并用防辐射罩进行遮挡, 以避免仪器被阳光直射而产生误差。使用 Microsoft Excel 和 SPSS 分析软件对数据进行处理。

1.3 人体舒适度研究方法

影响人对热环境感受的因素很多, 除了生理因素, 还包括温度、湿度、风、太阳辐射、气压等气象因素, 其中温度和相对湿度是影响人体热舒适感和维持人体热平衡的重要因子。综合考虑温度和湿度对人体舒适度的影响早有研究, 前人提出许多基于这两个因子的人体舒适度指标, 其中应用最多的是 Thom^[16]提出的不适指数(discomfort index, DI), 即后来美国国家气象局用于夏季舒适度及工作时数预报的温湿指数(thermal humidity index, THI)。这一指标实际上是用人类生物气象学的方法评价夏季环境的舒适度, 在气候环境评估方面得到广泛的应用^[17-19]。公式表示为

$$THI = T - 0.55(1 - RH)(T - 14.5), \quad (1)$$

式中 THI 为温湿指数, T 为空气温度(℃), RH 为相对湿度(%). THI 与人体舒适度的划分标准见表 2。

2 结果与分析

2.1 不同结构绿地降温增湿效果分析

2.1.1 总体降温增湿效应

将 7 月 4 日至 8 月 4 日这 32 天各类型绿地日平均温、湿度与水泥地面对照点进行比较分析, 可以得到: 在夏季高温季节, 不论是晴朗、多云还是雨天等各种天气状况下, 各类型校园绿地相对于无绿化地面, 均有不同程度降低空气温度、增加湿度的作用。图 2 和 3 分别显示各绿地与逸夫二楼天

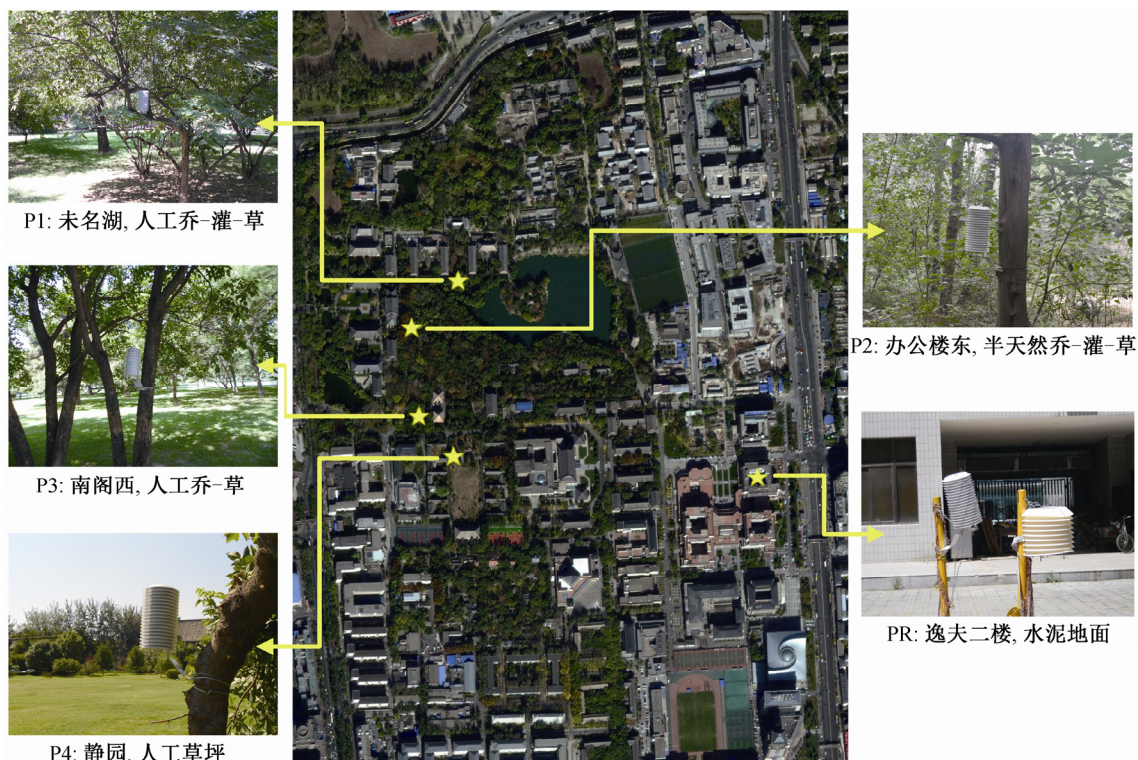


图 1 北京大学校园内观测点位置

Fig. 1 Location of the observation sites in the campus of Peking University

表 1 供试绿地的基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots

样地编号	绿地类型	植物组成	郁闭度/%	类型特点
P1	人工乔-灌-草	国槐、碧桃、金银木、榆叶梅、棣棠、细叶麦冬	80	郁闭度适中, 靠近水体
P2	半天然乔-灌-草	油松、刺槐、构树、元宝枫、黄刺玫、金银木、茜草、细叶麦冬	95	半天然林, 植物种植密度较大, 多层乔木, 中下层植物密集
P3	人工乔-草	油松、国槐、元宝枫、细叶麦冬	65	郁闭度较小, 视线通透
P4	人工草坪	早熟禾、野牛草	0	大面积草坪, 边缘区域有少量乔灌木

表 2 夏季 THI 与舒适度的关系^[20]

Table 2 Relationship between THI index and comfort degree in Summer^[20]

舒适度等级	温湿指数	舒适度	评价
一	≥29.5	酷热	无降温措施难以工作
二	26.7-29.4	很热	很不舒服
三	23.9-26.6	热	不舒服
四	21.1-23.8	较热	较不舒服
五	<21.1	凉爽	舒服

井内水泥地面相比, 降温增湿的范围, 均呈现出 P2>P1>P3>P4 的趋势。其中, 半天然乔-灌-草绿地 (P2) 的降温增湿幅度最大, 平均温度较水泥地面低 1.96℃, 湿度增加 12.34%; 其次为未名湖附近的人

工乔-灌-草绿地 (P1); 静园草坪 (P4) 的降温增湿幅度最小, 平均温度比水泥地面低 1.14℃, 湿度增加 7.46%。植物通过叶片的蒸腾作用及枝叶的遮阴作用产生降温增湿效应, 因此三维绿量较大、郁闭度较高的乔-灌-草及乔木结构绿地降温增湿效应更明显。

北京大学校园的绿地景观经过近 80 年的人工改造和自然演替, 已经形成成片的半天然林, 如未名湖南岸起伏山丘上的森林植被群落。研究表明, “近自然”植被群落由于其较高的植被覆盖、丰富的群落层次和物种多样性, 因而群落内部的稳定性更高, 绿地自我调节能力更强, 更有利于发挥其生态功能^[21-22]。本研究结果显示, 发挥降温增湿效应最

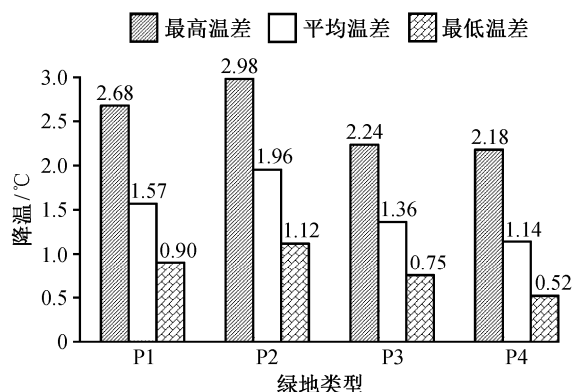


图 2 不同绿地类型降温效果比较

Fig. 2 Comparisons of cooling effect among different types of green space

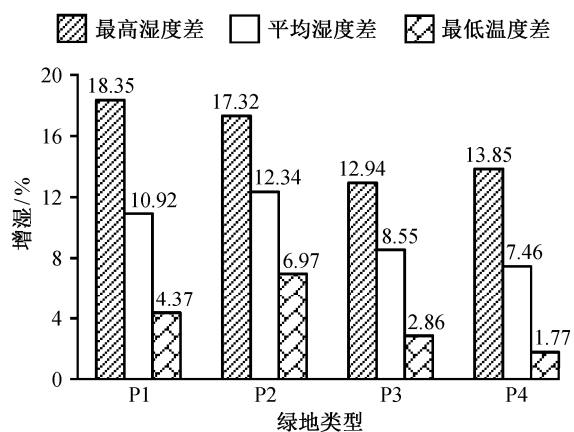


图 3 不同绿地类型增湿效果比较

Fig. 3 Comparisons of humidification effect among different types of green space

好的绿地结构是办公楼东侧的半天然乔-灌-草绿地，由于其拥有最接近自然演替结果的植被结构而表现出更为显著的温湿效应，在北京大学校园生态系统中起重要的生态调节作用。

2.1.2 温湿度日变化比较

选择温度较高并且连续 3 天都处于晴朗无风或微风天气的 7 月 15, 16, 17, 29 日和 8 月 4 日这 5 天进行绿地温湿度日变化比较。将 5 天内同一时段相同样点的温度和相对湿度进行平均，并截取人群活动较多的 8 个时间段进行比较分析。

在这 8 个时间段中，除 8:00 和 10:00 静园草坪(P4)的温度高于水泥地面外，各绿地相对于水泥地均起到一定的降温效应(图 4)。一天中，以 14:00 的温度差别最大，此时水泥地面达到 33.90℃的日最高温，比半天然乔-灌-草绿地高 2.65℃，比静园草坪高 1.03℃。也就是说，在一天中温度最高、空气

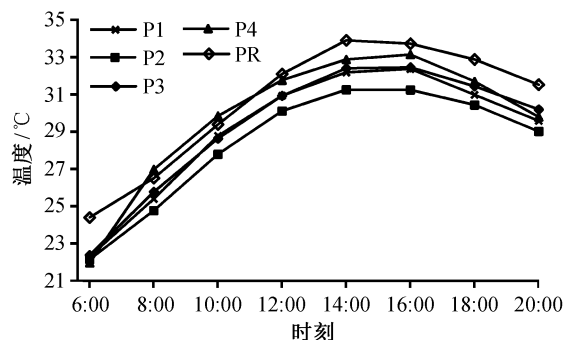


图 4 各样点温度日变化

Fig. 4 Temperature diurnal variations of the sample plots

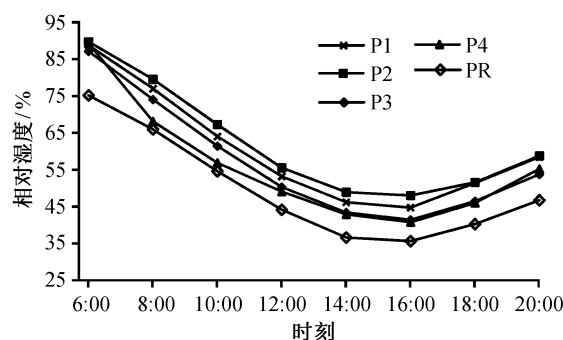


图 5 各样点相对湿度日变化

Fig. 5 Relative humidity diurnal variations of the sample plots

相对湿度最小的时段，绿地由于蒸腾遮阴作用而产生的降温效应最明显。比较各绿地类型可以发现，静园草坪(P4)温度的日变化幅度最大，甚至在 8:00 和 10:00 超过水泥地面的温度，主要原因是草坪上空空旷，无树木遮挡，对外界环境变化的缓解能力较小。夜间良好的空气对流和日间强烈的太阳辐射使其散热及升温速率都相对更快，与此同时，逸夫二楼天井内由周边高大密集建筑物环绕所导致的太阳辐射遮蔽作用使其在 10:00 前温度相对较低。对于乔木层郁闭度较高、三维绿量最大的半天然乔-灌-草绿地(P2)，内环境相对稳定，表现出对日间高温较强的缓解能力。人工乔-草绿地(P3)以及人工乔-灌-草绿地(P1)各时段温度相差不大。

晴朗天气下各样点的相对湿度日变化与温度变化趋势相反。在一天的 8 个时段中，各绿地湿度均高于水泥地面，增湿效果明显(图 5)。与降温效果不同的是，人工乔-灌-草绿地(P1)的增湿效应各时段均强于人工乔-草绿地(P3)，受未名湖湖水的影响较大。静园草坪(P4)的相对湿度低于人工乔-草绿地

(P3), 但在 14:00 之后两者逐渐趋于接近, 甚至在 20:00 草坪表现出更好的增湿效应, 其原因可能是草坪对土壤的覆盖率较大, 加之有一定的腐殖层, 因而更有利于水分的保持, 并在夜晚蒸散出来。

2.2 不同结构绿地舒适度比较

2.2.1 舒适度总体分布

根据式(1), 对各样地日均温湿指数进行比较分析。图 6 给出绿地与水泥地面在观测期内舒适度等级的分布情况。在炎热的夏季, THI 值越低, 人体感觉越舒适(表 1)。从图 6 可以看出, 7 月 4 日至 8 月 4 日这 32 天中, 水泥地面有 2 天舒适度处于二级(很不舒服), 27 天处于三级(不舒服), 也就是说, 观测期内 91%的时间水泥地面都让人有强烈的不适感。相比而言, 4 种类型绿地均对不适感有不同程度的缓解作用。半天然乔-灌-草绿地对人体舒适性的改善作用最为突出, 其中有 10 天的舒适性得到改善, 不适感天数下降至 72%。其余 3 种类型绿地均有 7 天的舒适性得到改善。从日均温湿指数来看, 水泥地面(25.11)>人工草坪(24.62)>人工乔-灌-草(24.53)>人工乔-草(24.52)>半天然乔-灌-草(24.30)。以乔木结构为主的绿地景观表现出更好的舒适性, 且舒适度随着郁闭度的增加而增大。因此, 在营造植物群落时, 增加乔木郁闭度是增加人体舒适感的最佳方法。张碧辉等^[23]通过模拟北京大学校园气象场, 得到水体和绿地对温湿度及人体舒适性有较明显的改善作用, 与本文结论一致。

值得注意的是, 各绿地总体舒适性的改善程度并不如降温增湿效应明显, 甚至人工乔-草绿地的

舒适性要略好于人工乔-灌-草绿地, 这与降温增湿效应相反。由此说明, 虽然绿地的降温增湿效应一定程度上提高了人体的舒适性, 但并非降温增湿效应越强, 绿地的舒适性就越高。很多研究表明, 当气温较高时, 高湿会加剧人体对热的感觉^[24]。相比于未名湖的人工乔-灌-草绿地, 人工乔-草型绿地中下层空间较开阔, 空气流通性较好, 一定程度上限制了湿度的增加, 表现出更好的舒适性。

2.2.2 舒适度日变化比较

选择温度较高且连续 3 天都处于晴朗无风或微风天气的 7 月 15, 16, 17, 29 日和 8 月 4 日这 5 天进行各样地舒适度日变化比较。将 5 天内同一时段相同样点的 THI 进行平均, 并根据校园主要人群的生活节奏, 截取 7 个典型时段进行分析比较(图 7)。

6:00 时 THI 指数最低, 舒适性是一天中最好的, 此时相对于水泥地面, 各绿地发挥了较强的改善作用, 其中静园草坪尤为突出; 8:00—12:00 静园草坪受强烈的太阳辐射, 不适感陡增, 甚至远超过逸夫二楼天井的水泥地面; 14:00—16:00 处于一天中 THI 最高的时段, 不舒适程度最强, 绿地虽有所缓解, 但作用有限; 18:00—20:00 THI 有所下降, 但并不显著, 此时静园草坪的舒适感逐步提高。总的来说, 半天然乔-灌-草绿地(P2)在所有时段都表现出对不适感较强的缓解作用, 静园草坪(P4)除了清晨和晚上, 一天的大部分时间这种作用都不显著, 人工乔-草绿地(P3)在 12:00—18:00 的高温时段舒适度高于人工乔-灌-草绿地(P1), 与 2.2.1 节结论一致。

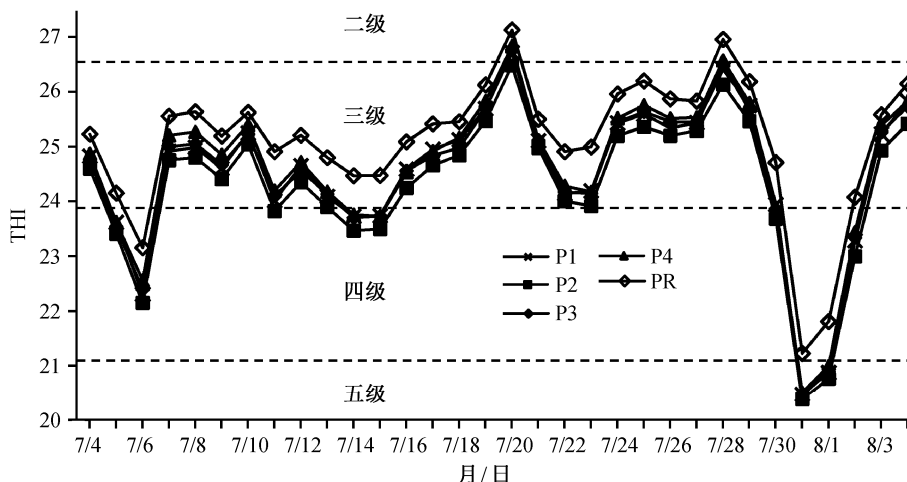


图 6 各样点舒适度等级分布情况

Fig. 6 Grade distribution of comfort degree for the sample plots

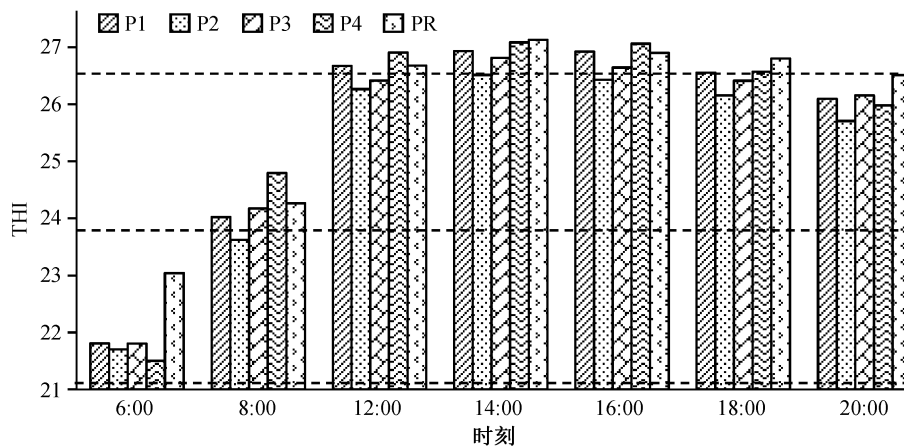


图 7 各样点舒适度日变化比较

Fig. 7 Diurnal variations of comfort index for the sample plots

3 结论与讨论

3.1 结论

本文通过对北京大学校园内有代表性的校园绿地的温湿度进行连续 32 天的同步测定, 评估不同绿地类型对校园小气候的改善作用, 尤其是对人体舒适度的影响, 得到以下结论。

1) 在夏季高温季节, 各类型校园绿地相对于无绿化地面, 均表现出显著的降温增湿效应, 平均降温 1.96~1.14℃, 增湿 12.34%~7.46%, 总体趋势表现为: 半天然乔-灌-草>人工乔-灌-草>人工乔-草>人工草坪, 绿量越大、乔木层郁闭度越高的复层结构绿地降温增湿效应越明显, 尤其是办公楼东侧、未名湖南岸的半天然林发挥着重要的生态调节功能; 从温湿度日变化来看, 静园草坪日变化幅度最大, 调节能力弱, 而半天然乔-灌-草绿地内环境相对稳定, 对日间高温缓解能力较强。

2) 在 32 天的观测期内, 各绿地对人体舒适性均有一定程度的改善, 总体表现为: 半天然乔-灌-草>人工乔-草>人工乔-灌-草>人工草坪, 乔木层郁闭度是决定绿地人体舒适度的重要因素。尽管如此, 相比于绿地的降温增湿效应, 其改善效果并不十分明显。此外, 人体舒适感由环境温度和湿度共同决定, 人工乔-草绿地由于其较好的降温增湿效应及良好的通风结构, 相比于未名湖附近的人工乔-灌-草绿地表现出更好的舒适性。

3) 从一天的不同时段来看, 早晚时段绿地舒适度改善作用较为明显, 高温时段并不显著, 尤其是静园草坪表现出极强的不适性。

3.2 讨论

通过研究发现, 发挥降温增湿效应最好的绿地是办公楼东侧的半天然乔-灌-草绿地, 其显著的温湿效应是因为它最接近自然演替结果的植被结构。然而, 目前的校园绿地大多过于人工化, 群落层次简单, 结构单一, 因而无法真正发挥其生态效益。因此, 校园绿化建设应采用拟自然的生态群落式配置, 设计和建立近自然的绿地景观。应通过促进群落自然生产力, 充分发挥城市绿地系统的整体功能, 实现人工的低度管理和景观资源的可持续发展。

绿地生态效用是以其对人的影响程度为依据的, 因此, 绿地结构是否科学合理, 最终应以人体舒适感为衡量标准。研究中发现, 办公楼东侧、未名湖南岸的半自然林舒适度的缓解作用最强, 但此区域多为小山坡, 活动空间有限; 静园草坪虽然活动空间宽阔, 但在夏季只有清晨和晚间表现出较好的舒适性, 其他时段不适宜人群活动。因此, 应根据不同的功能需求, 因地制宜, 构建不同结构的校园绿地景观, 如在北京大学校园内构建半露天开放草坪不失为一种选择。

参考文献

- [1] Rizwan A M, Dennis L Y C, Liu C. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 120-128
- [2] 肖荣波, 欧阳志云, 李伟峰, 等. 城市热岛的生态环境效应. *生态学报*, 2005, 25(8): 2055-2060
- [3] 祝宁, 李敏, 柴一新. 哈尔滨市绿地系统生态功能

- 分析. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1117-1120
- [4] Oliveira S, Andrade H, Vaz T. The cooling effect of green spaces as a contribution to the mitigation of urban heat: a case study in Lisbon. *Building and Environment*, 2011, 46: 2186-2194
- [5] 宋宽. 燕园绿化分区: 功能区划关系初探 // 冯宝华. 学圃滋荣: 北京高校校园绿化文集. 北京: 北京大学出版社, 1999: 145-147
- [6] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2010, 9(1): 15-24
- [7] Chang C R, Li M H, Chang S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 80: 386-395
- [8] Potchter O, Cohen P, Bitan A. Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean City of Tel Aviv, Israel. *International Journal of Climatology*, 2006, 26: 1695-1711
- [9] 吴菲, 李树华, 刘娇妹. 林下广场、无林广场和草坪的温、湿度及人体舒适度. *生态学报*, 2007, 27(7): 2964-2970
- [10] 刘娇妹, 李树华, 吴菲, 等. 纯林、混交林型园林绿地的生态效益. *生态学报*, 2007, 27(2): 674-684
- [11] 刘娇妹, 李树华, 杨志峰. 北京公园绿地夏季温湿效应. *生态学杂志*, 2008, 27(11): 1972-1978
- [12] 周立晨, 施文彧, 薛文杰, 等. 上海园林绿地植被结构与温、湿度关系浅析. *生态学杂志*, 2005, 24(9): 1102-1105
- [13] 纪鹏, 朱春阳, 李树华. 河流廊道绿带结构的温湿效应. *林业科学*, 2012, 48(3): 58-65
- [14] 蔺银鼎. 城市绿地生态效应研究. *中国园林*, 2003 (11): 36-38
- [15] 黄永梅, 曹艳丽, 唐志尧, 等. 燕园的半天然植被 // 冯宝华. 学圃滋荣: 北京高校校园绿化文集. 北京: 北京大学出版社. 1999: 154-157
- [16] Thom E C. The discomfort index. *Weatherwise*, 1959, 12: 57-60
- [17] Emmanuel R. Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment*, 2005, 40(12): 1591-1601
- [18] Michelozzi P, Kirchmayer U, Katsouyanni K, et al. Assessment and prevention of acute health effects of weather conditions in Europe, the PHEWE project: background, objectives, design. *Environmental Health*, 2007, 6: 12-22
- [19] Toy S, Yilmaz S, Yilmaz H. Determination of bioclimatic comfort in three different land uses in the city of Erzurum, Turkey. *Building and Environment*, 2007, 42(3): 1315-1318
- [20] John E O. *Climatology: selected application*. London: V H Winston & Sons, 1981: 190-192
- [21] 达良俊, 杨永川, 陈鸣. 生态型绿化法在上海“近自然”群落建设中的应用. *中国园林*, 2004(3): 38-40
- [22] 李玉杰, 郭素娟. 北京市城区公园植物多样性及近自然群落的应用. *林业科技开发*, 2009(2): 33-36
- [23] 张碧辉, 刘树华, 桑建国. 北京大学校园夏季气象场的数值模拟. *北京大学学报: 自然科学版*, 2011, 47(1): 59-65
- [24] 刘梅, 于波, 姚克敏. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景. *气象科技*, 2002, 30(1): 11-18