基于三维绿量的城市公园绿地植被群落降温增湿效应*

陈思含[1] 黄宇宸[2] 孔泽萱[1] 孙媛媛[1] 王 琪[1] 杨永娟[1]

（1. 天津城建大学建筑学院，天津 300384；2. 山东外事职业大学，济南 250100）

摘要：【目的】探究植物群落三维绿量与公园植物群落降温增湿率的量化关系，获得植物群落配置最优值，为天津市公园植物群落优化设计提供科学依据。【方法】以天津市水上公园为研究区，选取 4 种植物群落结构类型设置 21 个样方，使用便携式气象站监测其温湿度；对群落植被特征因子进行测定，计算单株植物及植物群落三维绿量。【结果】1）乔灌草、乔灌、乔草、灌草群落在温湿度调节方面均呈现优势，其中乔灌草复层群落降温率最高达 14.79%，增湿率最优为 30.91%，明显优于其他群落结构；2）植物群落三维绿量与降温率和增湿率均呈现极显著正相关（$P<0.01$）；3）当三维绿量密度达 5~6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$时，降温增湿效应最为显著，超过 6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$则趋于平缓。【结论】植物群落的结构类型与三维绿量显著影响城市公园绿地植被的降温增湿效益。未来应综合考虑植物群落的结构类型与三维绿量等因素，采取合理措施优化植物群落配置，促进城市绿地生态效益的协同发挥与可持续发展。

关键词：三维绿量；降温增湿效应；城市公园绿地；植物群落

DOI：10.12169/zgcsly.2025.11.20.0001

Cooling and Humidifying Effects of Urban Park Vegetation Community Based on Three-Dimensional Green Volume

Chen Sihan[1] Huang Yuchen[2] Kong Zexuan[1] Sun Yuanyuan[1] Wang Qi[1] Yang Yongjuan[1]

（1. School of Architecture, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Shandong Vocational University of Foreign Affairs, Jinan 250100, China）

Abstract：【Objective】This study aims to quantify the relationship between the three-dimensional green volume of plant communities and their cooling and humidification rates in parks, identify the optimal values of plant community configuration, and provide a scientific basis for the optimized design of plant communities in Tianjin's parks.【Method】With the Water Park in Tianjin as the research area, the authors select a total of 21 sample plots representing four structural types of plant communities. Portable weather stations are employed to monitor temperature and humidity, while vegetation characteristic factors are measured. The three-dimensional green volume of individual plants and plant communities is calculated.【Result】1) The vegetation communities of tree-shrub-grass, tree-shrub, tree-grass and shrub-grass demonstrate the advantage in temperature and humidity regulation. The tree-shrub-grass multi-layer communities achieve the highest cooling rate at14. 79% and the optimal humidification rate of 30.91%, significantly superior to other community structures; 2) The three-dimensional green volume of plant communities is significantly positively correlated with both the cooling rate and the humidification rate ($P<0.01$); and 3) The cooling and humidification effects are the most pronounced when the three-dimensional green volume density reaches 5-6. 25 $m^3 \cdot m^{-2}$, while the effects become less pronounced

收稿日期：2025-11-20

* 基金项目：天津市自然科学基金（23JCQNJC00770）

第一作者：陈思含，女，2002 年生，硕士生，研究方向为园林植物应用与景观生态修复。E-mail：2841559754@qq.com

黄宇宸，男，1999 年生，硕士，研究方向为风景园林规划与设计。E-mail：1019909795@qq.com

通信作者：杨永娟，女，1993 年生，博士，讲师，研究方向为园林植物应用与景观生态修复。Email：yongjuanyang@163.com

when the volume exceeds 6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$.【Conclusion】The structural type of plant communities and the three-dimensional green volume have a decisive influence on the cooling and humidification benefits of vegetation in urban park green spaces. In the future, comprehensive consideration should be given to factors such as the structural type and three-dimensional green biomass of plant communities, and appropriate measures should be taken to optimize plant community configuration, thereby promoting the synergistic performance and sustainable development of ecological benefits of urban green spaces.

Keywords: three-dimensional green volume; cooling and humidification effect; urban park green space; plant community

城市建设呈快速推进趋势，植被覆盖水平持续降低，城市景观格局发生转变，对区域生态环境造成深远影响[1]。随着城市热岛效应不断加剧，如何缓解热岛效应、改善城市微气候已成为当前城市生态建设中的重要议题[2]。与此同时，城市中大面积不透水硬化表面阻断了土壤水分蒸发，导致空气湿度下降，城市“干岛”效应也日益凸显。城市公园绿地作为融合自然生态与人文景观的关键空间，在应对城市环境问题方面发挥着重要作用。植物群落则是构成绿地的核心要素[3]，它的光合与蒸腾作用能够有效调节空气温湿度，是维持绿地生态功能的重要载体。近年来，三维绿量逐渐取代二维指标，成为表征植被空间结构及其生态效应的关键参数[4]，越来越多的学者认为提高植物群落的三维绿量是实现城市生态平衡的一条可行路径[5-8]。然而，目前城市公园尺度下的天津市公园植物群落三维绿量对温湿度调节作用的量化指标仍不明确。

大量研究证实，三维绿量与气候调节功能之间存在显著的正向关联[9]。现有研究可归纳为以下 3 类：1）三维绿量与微气候调节关联研究。主要通过实地监测手段，验证植被覆盖度、郁闭度等结构与温湿调节效应的关系，明确三维绿量对局部微气候的积极影响[6-7]。2）三维绿量量化分析研究。借助激光雷达等技术对树冠三维绿量进行精准量化，识别出如小叶槭树等具备较强温湿调控能力的树种，并揭示三维绿量与生态效益之间存在的非线性增长特征[8-9]。3）群落配置与结构优化研究。聚焦乔木盖度、冠幅、树高等群落特征与三维绿量的关系，探讨乔灌草结构的合理配置提升单位绿量的可行路径[10-14]。在研究方法上，该领域呈现出从经验观察到多技术融合的演进趋势。如今激光雷达扫描、智能监测与人工智能生成设计等新技术的逐步应用，进一步推动了研究向智慧化、精准化方向发展[15-17]。目前有关三维绿量的研究虽然已经取得一定进展，但仍存在以下问题：1）现有研究多集中于森林生态系统或单株植物尺度，对城市公园中植物群落层次关注不足[18-19]。2）三维绿量与降温增湿效应之间的量化关系尚未明确[20]，不同植物配置模式的生态调节能力及形成机制仍不清晰。3）受限于测量精度、多尺度适应性及技术融合程度[21-22]，现有方法难以在高密度城市环境中实现高效的数据采集与动态监测。

基于此，本研究以天津市水上公园为研究区，通过公园植物群落特征因子测定，量化不同植物群落的三维绿量数值，揭示群落结构对三维绿量的影响机制，建立三维绿量与植物群落降温率和增湿率之间的数学模型，明确三维绿量与降温增湿效应的量化关系，为天津市城市公园植物群落优化设计奠定基础。

1 研究区概况

天津市位于华北平原东北部。因受暖温带半湿润大陆性季风气候控制，天津市四季分明且高温期与多雨期一致，年均气温为 12~14 ℃，年均降水量为 550~650 mm 且大多集中于 6—8 月。根据天津市气象局公布的数据，2024 年年平均气温为 14.3 ℃，高于常年平均气温 1.2 ℃。年降水量为 775.6 mm，年日照时长 2 649.1 h。从天津市气象局气象数据开放发布的高温天气实况数据看，天津市夏季高温日数已从 2021 年的仅 4 天、最高 37.7 ℃，急剧增加到 2023 年的 23 天、最高 41.5 ℃，2024 年仍维持在 19 天、最高 40.3 ℃，且最高气温已连续 3 年超过 40 ℃，夏季高温日数增加，连续高温时间长。

综合“建设时间长、植被丰富”这两个关键原则，最终选取始建于 1950 年、坐落于南开区西南城角的天津水上公园作为研究区域。天津水上公园总面积为 125 hm^2，园内水域广阔，绿地覆盖率超过 70%。除此之外，园内分布草坪和近 2 万株乔灌木，形成了结构相对完整的植物群落体系，是体现天津城市公园绿地景观与生态功能的典型区域。

2　研究方法

2.1　数据采集

选取 21 个不同结构的植被群落作为调查样方（图 1），样方大小设置为 20 m×20 m。样方类型包括乔灌草、乔灌、乔草、灌草 4 种群落结构配置类型（表 1）。



注：图 1A 中 1~21 分别表示研究区域内布设的 21 个样方；图 1B 为典型乔灌型样方；图 1C 为典型乔灌草型样方；图 1D 为典型乔草型样方；图 1E 为典型灌草型样方。

图 1　样方分布与样地实景照片

表 1　天津水上公园观测样方植被构成

样方编号	分层结构	群落类型	群落名称	植物种类
S1	3	乔灌草	榆树（*Ulmus pumila*）+紫叶李（*Prunus cerasifera*）—大叶黄杨（*Buxus megistophylla*）+龙柏（*Sabina chinensis*）—马蔺（*Iris lactea*）+蛇莓（*Duchesnea indica*）	10
S2	3	乔灌草	圆柏（*Juniperus chinensis*）+胡桃（*Juglans regia*）+紫叶李—贴梗海棠（*Chaenomeles speciosa*）+金叶女贞（*Ligustrum × vicaryi*）+红叶石楠（*Photinia × fraseri*）—高羊茅（*Festuca elata*）	16
S3	2	乔草型	白梨（*Pyrus bretschneideri*）+金银木（*Lonicera maackii*）—狗尾草（*Setaria viridis*）	5
S4	3	乔灌草	柳树（*Salix babylonica*）—金叶榆（*Ulmus pumila*）+紫穗槐（*Amorpha fruticosa*）—荷花（*Nelumbo nucifera*）+睡莲（*Nymphaea tetragona*）	8
S5	3	灌草型	毛白杨（*Populus tomentosa*）+国槐（*Styphnolobium japonicum*）—月季（*Rosa chinensis*）+红叶石楠—牛筋草（*Eleusine indica*）	10
S6	2	乔灌型	榆树+毛白杨—金叶榆	9
S7	2	乔灌型	刺槐（*Robinia pseudoacacia*）+圆柏+黄金树（*Catalpa speciosa*）—牡丹（*Paeonia × suffruticosa*）+芍药（*Paeonia lactiflora*）	8
S8	3	乔灌草	柳树+西府海棠（*Malus × micromalus*）+日本晚樱（*Prunus serrulata* var. *lannesiana*）—大叶黄杨+日本小檗（*Berberis thunbergii*）—结缕草（*Zoysia japonica*）	15
S9	2	乔灌型	刺槐+绒毛白蜡（*Fraxinus tomentosa*）+西府海棠—金叶榆+小叶女贞（*Ligustrum quihoui*）	9
S10	3	乔灌草	刺槐+绒毛白蜡+臭椿（*Ailanthus altissima*）+圆柏—金叶榆+大叶黄杨+高羊茅	14
S11	2	乔灌型	柳树+紫叶李+圆柏—毛樱桃（*Prunus tomentosa*）+榆叶梅（*Prunus triloba*）+金银木	8
S12	3	乔灌草	刺槐+杜仲（*Eucommia ulmoides*）+紫叶李—丁香（*Syringa oblata*）+榆叶梅—结缕草	10
S13	3	乔灌草	柳树+圆柏+国槐+刺槐—月季+连翘（*Forsythia suspensa*）+铺地柏（*Juniperus procumbens*）—结缕草	11
S14	3	乔灌草	毛白杨+国槐+西府海棠—连翘+黄刺玫（*Rosa xanthina*）+金银木—狗尾草	12
S15	2	乔草型	国槐+柳树—芦苇（*Phragmites australis*）+狗尾草	5
S16	3	乔灌草	榆树+白蜡树（*Fraxinus chinensis*）+金枝槐（*Sophora japonica*）—金银木+月季+大叶黄杨—结缕草	15
S17	1	乔草型	毛白杨+圆柏+国槐+西府海棠	4
S18	2	乔灌型	白蜡树+柳树+刺槐—毛核木（*Symphoricarpos sinensis*）+木槿（*Hibiscus syriacus*）	5
S19	3	乔灌草	柳树+圆柏+西府海棠—金银木+金叶女贞+龙柏—玉簪（*Hosta plantaginea*）	11
S20	2	乔灌型	柳树+国槐+金枝槐—大叶黄杨+龙柏+红叶石楠	8
S21	3	灌草型	柳树+刺槐+黄栌（*Cotinus coggygria* var. *cinereus*）—黄刺玫+金银木+平枝栒子（*Cotoneaster horizontalis*）—蛇莓+高羊茅	14

1）样方数据采集。在 21 个植物群落样方内开展群落分层调查，分别记录乔木层、灌木层及草本层的种类组成。利用 Vertex Laser Geo 激光测高测距仪、2 m 胸径尺及 50 m 钢卷尺，逐株测量乔木层以及灌木层所有植株的树高、枝下高、南北与东西向冠幅、胸径（Φ），并记录其冠形；草本层则记录所有植物的种类名称、平均高度及盖度。

2）温湿度检测。选取 2024 年 6—9 月初持续晴且风力较低的天气作为观测时段，该时段内天

津市地区高温天气频发，居民对环境降温增湿调节的需求较高。在此时段内每日 12：00—15：00 进行气象观测，同步测定样方与裸地对照点的空气温度与相对湿度，每个样地的观测周期为连续 3 日，采样间隔为 5 min。实验仪器为 FT-BQX2 便携式气象站，温度量程-40～60 ℃、精度±0.3 ℃、分辨率 0.01 ℃；湿度量程 0～100%RH、精度±3%RH、分辨率 0.01%RH。每个样方内采用梅花布点法布设离地 1.5 m 的 5 个测点，取其平均值作为当日样地温湿度值，并在植被覆盖度为零的裸地设置 1 个对照测点，其均值作为当日对照区域温湿度值。

2.2 数据处理

依据植物茎叶空间体积特征的测算方式，对乔木和灌木开展树冠形态分类判别（图 2），依照植株逐个计算乔木以及灌木的三维绿量（表 2）。运用垂直投影范围乘以冠层高度的测算公式计算草本层的三维绿量[23-24]。总三维绿量为乔木、灌木、草本的绿量之和。三维绿量密度（$m^3 \cdot m^{-2}$）= 总三维绿量/样方面积[23]。



图 2 天津市水上公园不同树木树冠形态示意图

表 2 三维绿量计算公式

序号	树冠形态	计算公式
1	卵形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
2	圆锥形	$\frac{\pi x^2 y}{12}$
3	球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
4	扁球形	$\frac{\pi x^2 y}{6}$
5	球扇形	$\frac{\pi\ (2y^3-y^2 \cdot \sqrt{4y^2-x^2})}{3}$
6	球缺形	$\frac{\pi\ (3xy^2-2y^3)}{6}$
7	圆柱形	$\frac{\pi x^2 y}{4}$

注：x 为冠幅；y 为冠高。

挑选温度变化值（$T_{变}$）、湿度变化值（$H_{变}$）、平均温度变化值（$T_{均}$）、平均湿度变化值（$H_{均}$）、降温率（$\Delta T_{率}$）和增湿率（$\Delta H_{率}$）6 项温湿度评价指标展开分析，植被群落的降温增湿效应分别用平均降温率（$\Delta T_{率}$）和平均增湿率（$\Delta H_{率}$）表示。

2.3 数据分析

利用 Origin 2021 软件，绘制 12：00—15：00 各群落温度、湿度的动态曲线，以及该时段平均降温率和平均增湿率的云雨图。为了量化三维绿量对降温增湿效益产生的影响，将平均降温率与增湿率设为因变量、将总三维绿量作为自变量，在 SPSS 27.0 软件中进行相关性分析，确定三维绿量与平均降温率和平均增湿率之间是否存在显著的相关关系。为了进一步确定三维绿量和降温增湿效益的定量关系，首先利用 Origin 2021 软件制作散点图，通过观察散点图初步确定三维绿量与降温增湿率之间的关系，在此基础上，通过二次曲线拟合分析构建二次回归模型来揭示二者之间的定量关系[7,9]。

3 结果与分析

3.1 不同群落结构的降温增湿效应

对 21 组典型样方展开动态监测（图 3～4）发现，多类型植物群落和裸地对照区都呈现出“升温-降湿”的同步波动，但群落内部的温湿度变化速率明显低于对照区域。温度极值主要出现在 13：00—14：00，各群落的温度区间分别为乔灌草结构 27.86～36.46 ℃、乔灌结构 25.78～35.88 ℃、乔草结构 29.22～36.08 ℃、灌草结构 23.96～31.78 ℃，均低于对照组；此时段各群落的平均温度依次为 30.22 ℃、30.78 ℃、30.63 ℃和 31.76 ℃，均显著低于对照区的 34.65 ℃（$P<0.05$）。湿度峰值出现在 12：00，谷值则出现于 14：00—15：00，各群落的湿度区间分别为

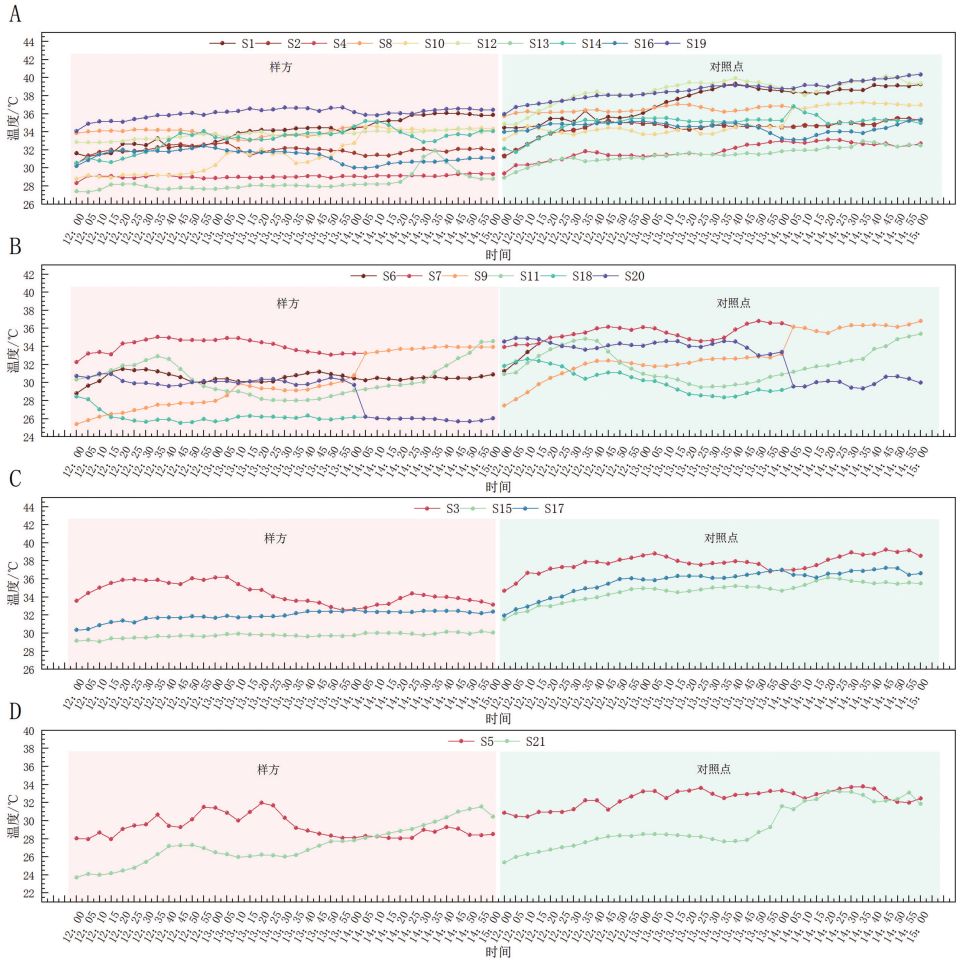


图 3　不同植物群落及其对照点温度变化

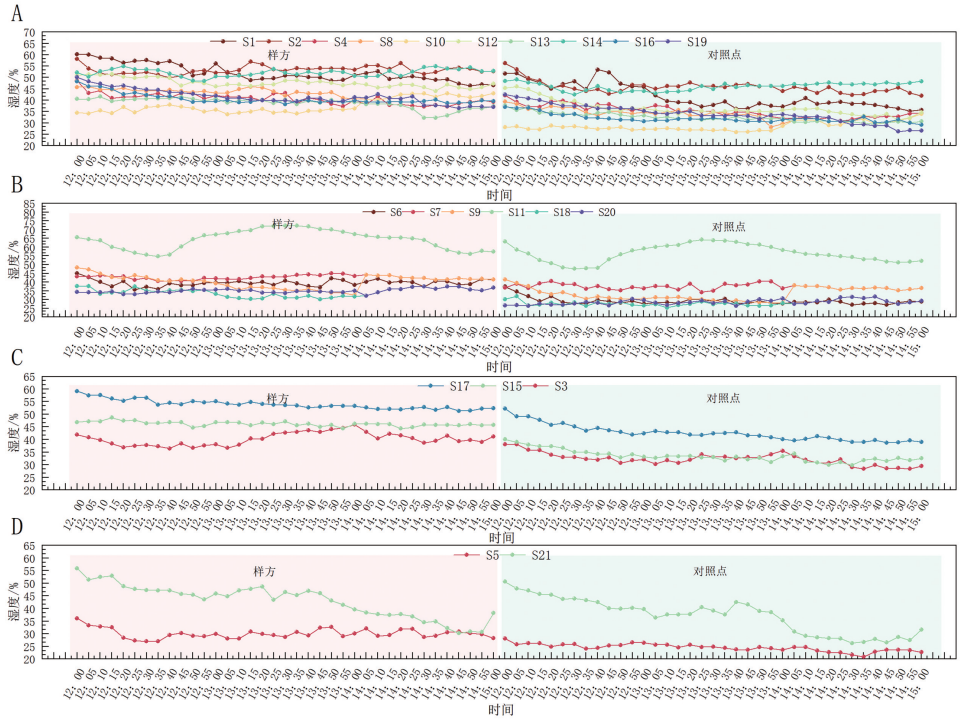


图 4　不同植物群落及其对照点湿度变化

32.54%～60.38%、30.52%～71.14%、36.56%～59.68%和28.04%～57.30%，均高于对照组；在高温时段，各群落的平均湿度分别为51.64%、49.73%、45.67%和42.72%，显著高于对照区的38.28%（$P<0.05$）。以上结果说明植被的生态调节功能和植物群落结构存在正相关关系。

图5～6表明：4类群落的平均降温率为7.05%～14.05%，均值为12.45%；平均增湿率为16.88%～31.97%，均值为27.06%。其中，乔灌草群落表现最佳，降温率与增湿率分别达到14.05%与31.97%，明显优于灌草群落。4类群落的平均降温率与平均增湿率的排序一致，均为乔灌草群落>乔灌群落>乔草群落>灌草群落。这证实了群落垂直结构复杂度越高，植物群落调控降温增湿效益的能力越强。

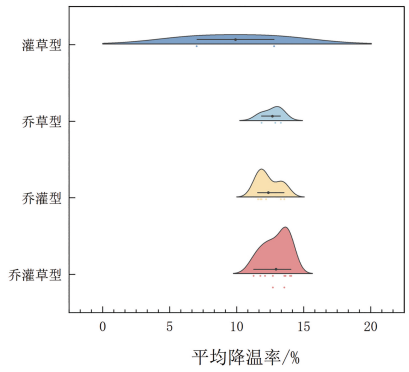


图5 不同植物群落类型平均降温率

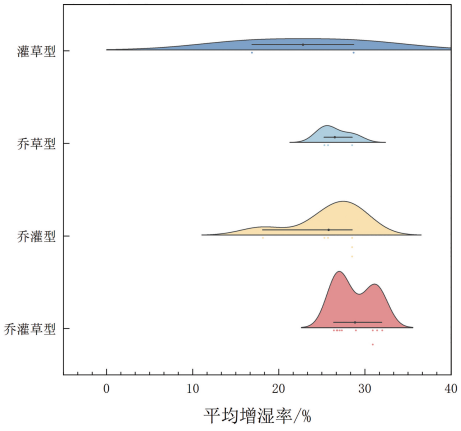


图6 不同植物群落类型平均增湿率

3.2 三维绿量与降温增湿效应的相关性

3.2.1 三维绿量与降温效应的相关性

将样地总三维绿量与降温率进行Pearson皮尔逊相关性分析可知，植物群落的三维绿量与群落平均降温率存在极显著正相关关系（$r=0.842$，$P<0.01$）。为明确其定量关系，把三维绿量（X，m^3）选作自变量，将降温率（Y,%）当作因变量进行二次曲线拟合，得到方程 $Y=-3.42\times10^{-6}X^2+0.017X-7.32$（$R^2=0.687$，$P<0.05$）。

根据二次曲线拟合分析结果（图7）：当绿量处于1 000～2 500 m^3时，环境温度下降速度和绿量增长呈现出正相关，此时三位绿量密度为2.5～6.25 $m^3\cdot m^{-2}$；当绿量达到2 000～2 500 m^3时，温度调节效率有了明显提高，最终在2 500 m^3附近达到峰值（>14%），即当三维绿量密度为5～6.25 $m^3\cdot m^{-2}$时降温率明显提高，在三位绿量密度达到6.25 $m^3\cdot m^{-2}$后趋于平缓。值得注意的是，超过这个阈值后继续增加绿量，单位植被的降温率趋于稳定，出现典型的边际效益递减现象。

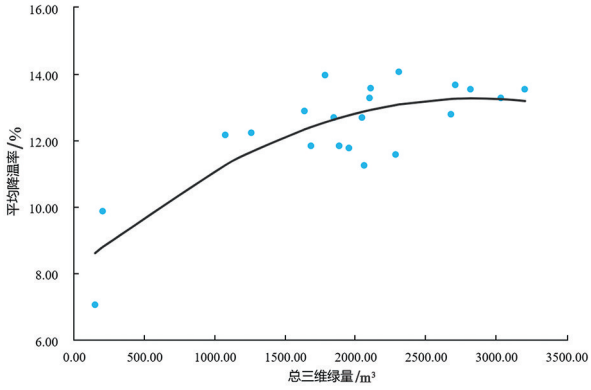


图7 绿量与平均降温率拟合曲线

3.2.2 三维绿量与增湿效应的相关性分析

将样地总三维绿量与增湿率进行Pearson皮尔逊相关性分析发现，植物群落的三维绿量与群落平均增湿率呈极显著正相关（$r=0.587$，$P<0.01$）。通过二次曲线回归分析（图8）可知，三维绿量对植物群落增湿率具有显著影响（$F=25.37$，$P<0.01$），拟合方程为 $Y=-5.17\times10^{-6}X^2+0.026X-10.05$（$R^2=0.836$，$P<0.05$），当绿量处于1 000～2 500 m^3时，增湿率随绿量增加而明显提高，此时三维绿量密度为2.5～6.25 $m^3\cdot m^{-2}$；随着绿量进一步增加，增湿效率虽然依旧维持在较高水平，但效益增速趋于平缓，这跟植物叶面的蒸腾作用与水汽扩散的动态平衡有关。值得注意的是，当绿量在2 000～2 500 m^3时，植物群落的增湿效应最为明显，其最高值可达32%，此时三位绿量密度为5～6.25 $m^3\cdot m^{-2}$。

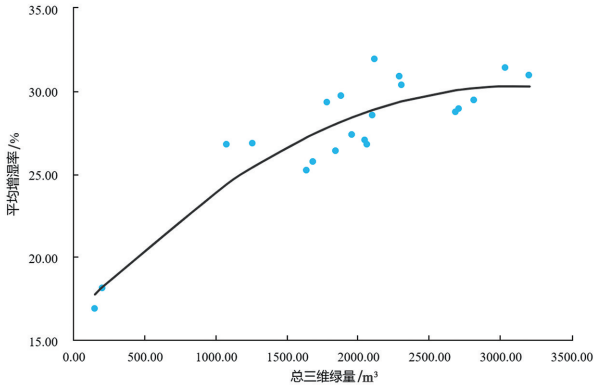


图 8　绿量与平均增湿率拟合曲线

4　讨论

4.1　植物群落结构与降温增湿效应

本研究通过对 21 个植物群落及其对照点温湿度指标的测定发现，在 13：00—14：00 的高温时段内，所有植物群落类型的平均温度均低于对照点，平均湿度均高于对照点，这一现象表明各类植物群落均具备一定的降温与增湿效应，其中乔灌草复层结构群落的调节效果最为突出，这一发现与孔繁花等[7]的研究结论相吻合，进一步证实了复杂垂直结构在提升群落微气候调节功能中的关键作用。

4.2　三维绿量密度与降温增湿效应

从作用机制来看，三维绿量与降温率和增湿率均呈现极显著（$P<0.01$）正相关，印证了植物群落通过蒸腾作用和冠层遮荫调节微气候的基本原理。较高的三维绿量意味着更大的叶面积指数以及更复杂的垂直结构，从而增强群落的蒸腾耗热能力与遮荫效果。

本研究发现，若三维绿量密度处于 2.5～6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$，随着绿量上升，降温率与增湿率都有明显的提升，当绿量密度超过 6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$，降温率与增湿率的趋于平缓，这一现象说明植被的生态效应存在增长临界点，与陈自新等[25]所提出的“叶面积说”相互印证，反映出植物群体内部微气候在一定程度上会对叶片扩展产生抑制作用。徐欣等[6]在对苏州新区公园绿地的研究表明，三维绿量密度≥9 $m^3 \cdot m^{-2}$时，植被群落能够发挥最佳降温增湿功能，与本研究分析得到的结论不同，推测是因为不同地点的植物群落差异较大，发挥最大降温增湿效应的植物群落三维绿量也有所不同。在高吉喜等[24]对北京不同城市绿地的研究中，三维绿量密度>5 $m^3 \cdot m^{-2}$的植物群落的温湿度调节能力基本最佳，与本研究分析得到的结论相似，在三维绿量密度为 5～6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$时，植物群落的温湿度调节能力达到最佳状态。这一结果可为天津市城市园林的生态设计提供关键的数据支持。

4.3　城市公园绿地植物群落优化策略

为充分发挥植物群落的降温增湿功能，从而提升城市生态空间的气候调节效益，提出以下建议：1）优化群落垂直结构：在植物配置中优先构建乔灌草复层结构，利用多层次冠层增强立体遮荫与蒸腾增湿的协同效应，最大化微气候调节能力。2）引入三维绿量作为重要指标：将三维绿量纳入绿地评价与设计体系，建议将三维绿量密度控制在 5～6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$，以平衡生态效益与景观空间需求。3）重视建成后的养护管理：在绿地维护中注重冠层通风与透光管理，避免植物过度密植导致群落内部微气候条件恶化，从而维持长期降温增湿功能。

4.4　局限与展望

本研究在数据获取方面仍存在一定局限性，虽然实地观测所得到的植被参数与微气候数据可信度比较高，但是由于监测范围有限、采集时间间隔较长，研究结论的普适性还是受到了制约。近年来，三维绿量评估手段不断发展，唐雪海[26]、陈小祥等[27]采用的激光雷达技术，以及周小成等[28]提出的无人机影像估算方法，都呈现出规模化数据采集的潜力，后续研究可以整合多平台观测数据，结合地面精细化测量与遥感动态监测，构建更为综合的绿量监测体系。本研究的数据主要来源于夏季日间气象记录，还没有囊括不同季节与昼夜交替的影响，后续研究有必要开展长期定位观测，获取更完整的时序数据，系统揭示降温增湿效应的动态变化规律。

5　结论

不同群落结构的降温率与增湿率较为一致，均为乔灌草型>乔灌型>乔草型>灌草型，证实了群落垂直结构复杂度与其微气候调节能力呈正相关，为城市绿地建设中优先构建复层群落结构提

供了理论依据。三维绿量与植物群落降温率、增湿率均呈极显著正相关关系。当三维绿量密度达5~6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$时，植物群落降温增湿效应最明显，这表明在城市绿地有限空间内，将绿地植物群落的三维绿量控制在5~6.25 $m^3 \cdot m^{-2}$可实现降温增湿效益最优化。因此，要充分发挥植物群落的降温增湿功能，应综合考虑植物群落的结构类型与三维绿量等因素，采取合理措施优化植物群落配置，促进城市绿地生态效益的协同发挥与可持续发展。

参考文献

[1] GRIMM N B, FAETH S H, GOLUBIEWSKI N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. Science, 2008, 319(5864): 756-760.

[2] KOLOKOTRONI M, REN X, DAVIES M, et al. London's urban heat island: impact on current and future energy consumption in office buildings[J]. Energy and Buildings, 2012, 47: 302-311.

[3] TAN J G, ZHENG Y F, TANG X, et al. The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai[J]. International Journal of Biometeorology, 2010, 54(1): 75-84.

[4] 周廷刚，罗红霞，郭达志. 基于遥感影像的城市空间三维绿量(绿化三维量)定量研究[J]. 生态学报，2005，25(3)：415-420.

[5] 武小钢，蔺银鼎，闫海冰，等. 城市绿地降温增湿效应与其结构特征相关性研究[J]. 中国生态农业学报，2008，16(6)：1469-1473.

[6] 徐欣，张兴，高飞，等. 城市公园绿地植被群落郁闭度与三维绿量对夏季降温增湿效应的影响[J]. 中国城市林业，2024，22(2)：10-16.

[7] KONG F H, YAN W J, ZHENG G, et al. Retrieval of three-dimensional tree canopy and shade using terrestrial laser scanning (TLS) data to analyze the cooling effect of vegetation[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 217: 22-34.

[8] 陈俊，何荣晓，曹凌仪，等. 街道环境因素对夏季人行空间热舒适的影响[J]. 中国城市林业，2023，21(1)：37-42，49.

[9] 寇思勇. 城市绿地固碳释氧和降温增湿功能研究进展[J]. 资源节约与环保，2016(5)：156-157，163.

[10] BEHERA S K, BEHERA M D, TULI R. An indirect method of estimating leaf area index in a tropical deciduous forest of India[J]. Ecological Indicators, 2015, 58: 356-364.

[11] 刘常富，商瑜，赵桂玲. 基于类型与影响因子的城市森林三维绿量量化差异分析[J]. 西北林学院学报，2013，28(4)：55-60.

[12] 芮文娟，阚丽艳，靳思佳，等. 上海社区不同类型绿地植物群落结构特征与绿量相关性研究：以瑞金社区、莘城社区、方松社区为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版)，2015，33(4)：77-87，96.

[13] 郑俊鸣，方笑，朱雪平，等. 福州沙滩公园植物群落与绿量相关性分析[J]. 中国城市林业，2016，14(2)：48-52.

[14] 郑俊鸣，朱丹丹，蒋梦莹，等. 福州市3个山地公园三维绿量与其影响因子特征研究[J]. 中国园林，2018，34(2)：89-93.

[15] 陈华，刘锐兵，黎淑霞，等. 康复医院人工绿地郁闭度与三维绿量的研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学)，2018，32(8)：121-129.

[16] EDWARDS P. An apparatus for the culture of benthic marine algae under varying regimes of temperature and light-intensity[J]. Botanica Marina, 1970, 13(1): 42-43.

[17] DAVIS J, PAVLOVA A, THOMPSON R, et al. Evolutionary refugia and ecological refuges: key concepts for conserving Australian arid zone freshwater biodiversity under climate change[J]. Global Change Biology, 2013, 19(7): 1970-1984.

[18] HARDIN P J, JENSEN RR. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a Terre Haute case study[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2007, 6(2): 63-72.

[19] NGAO J, CÁRDENAS M L, Améglio T, et al. Implications of urban land management on the cooling properties of urban trees: citizen science and laboratory analysis[J]. Sustainability, 2021, 13(24): 13656.

[20] 刘立民，刘明. 绿量：城市绿化评估的新概念[J]. 中国园林，2000，16(5)：32-34.

[21] 董艳杰，万福绪. 基于三维绿量的林分生态效益测算与分析：以上海浦江郊野公园为例[J]. 水土保持研究，2019，26(3)：347-352.

[22] 武梦婷. 基于机载LiDAR数据的不同绿地LAI绿量和LVV绿量关系研究[D]. 武汉：华中农业大学，2023.

[23] 周坚华，孙天纵. 三维绿色生物量的遥感模式研究与绿化环境效益估算[J]. 环境遥感，1995(3)：162-174.

[24] 高吉喜，宋婷，张彪，等. 北京城市绿地群落结构对降温增湿功能的影响[J]. 资源科学，2016，38(6)：1028-1038.

[25] 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(2)[J]. 中国园林，1998，14(2)：51-54.

[26] 唐雪海. 北京市城六区三维绿量估算与分析研究[D]. 北京：北京林业大学，2011.

[27] 陈小祥，李嘉诚，徐雅莉. 基于LiDAR点云数据的城市三维绿量分层测算方法研究[J]. 测绘工程，2018，27(9)：40-45.

[28] 周小成，廖鸿燕，崔雅君，等. 无人机遥感估算绿化园林三维绿量：以福州大学旗山校区为例[J]. 福州大学学报(自然科学版)，2020，48(6)：699-705.