

春季不同类型城市滨水绿地的微气候与人体舒适度研究

王嘉琦,王 睿,王得祥*

(西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100)

摘要:采取实地监测法研究城市滨水绿地的郁闭度以及平均树高对微气候和人体舒适度的影响。在2019年春季(4月),对宝鸡市渭河公园和渭河生态园的9种滨水绿地和1个空地对照进行微气候指标监测,包括温度、相对湿度和风速,人体舒适度采用温湿指数来评价。结果表明,在观测期间各样地的温度先增长后下降,在12:00—14:00期间出现最大值;风速则出现多个峰值。具有中郁闭度配置的滨水绿地的温度值和风速值较高,其中具有高平均树高的滨水绿地的平均温度最高,为14.7℃;具有中平均树高的滨水绿地的平均风速最高,为 $2.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;相对湿度先降低后增长,其中具有中郁闭度高平均树高配置的滨水绿地的平均相对湿度最高,为61.6%。各样地的人体舒适度均在上午时段出现明显的增长,随后趋于平稳。显著性分析发现具有中郁闭度及中、高平均树高的滨水绿地产生的降温、增湿以及防风的作用显著优于其他配置的滨水绿地,其中具有中郁闭度、高平均树高的滨水绿地的降温、增湿以及削减风速的作用最显著,效率分别为12.19%、39.58%、20.40%,全天的人体舒适度评级为“冷”。综上,具有中郁闭度、高平均树高的滨水绿地可以更高效地改善微环境,更适宜春季居民的日常游憩。

关键词:滨水绿地;微气候;舒适度;郁闭度;树高

中图分类号:S731.9

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2020)03-0231-06

Effects of Different Urban Waterfront Green Spaces on the Microclimate and Comfort Degree of Humanbeing in Spring

WANG Jia-qi, WANG Rui, WANG De-xiang*

(College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Situ monitoring method was adopted to examine the effects of different canopy closures and tree heights on the microclimate and human comfort degree in waterfront green spaces. The study was carried out in 9 different types of waterfront green spaces and one vacant land in the Weihe Park and Weihe Ecological Park in Baoji City, Shaanxi Province in the spring (April) of 2019, in which the temperature, relative humidity and wind speed were monitored during the observation, and the temperature and humidity index were used to evaluate human comfort. It was observed that the diurnal temperature increased first, and then decreased, the maximum temperature appeared between 12:00—14:00. The wind speed appeared several peak values. The green spaces with medium-canopy closure had the highest average temperature and wind speed, in which the green space with high tree height had the highest average temperature (14.7℃) and the green space with medium tree height had the highest average wind speed (2.8 m/s). The relative humidity of all sites showed a significant downward trend and then rose up lately. The green space with medium-canopy and high tree height had the highest relative humidity (61.6%). The human comfort degree in all sites showed a significant increase trend in the morning, and then stabilized in the afternoon. In addition, the va-

收稿日期:2019-07-30 修回日期:2019-09-03

基金项目:国家科技支撑计划“环境友好型城镇景观林构建技术与示范”(2015BAD07B06)。

作者简介:王嘉琦。研究方向:城市生态。E-mail:1281788674@qq.com

*通信作者:王得祥,教授,博士生导师。研究方向:城市生态、森林生态与森林可持续经营。E-mail:Wangdx66@126.com

riance significance analysis demonstrated that the green land with medium-canopy and high tree height and the green area with medium-canopy and medium tree height had better effects in cooling, humidification and wind blocking, which were significantly better than others. To be specific, the green land with medium-canopy and high tree height was the best, with the effective rates of cooling, humidification and wind-shielding were 12.19%, 39.58%, and 20.40%, respectively, and its daily climate comfort-index was "cold". In general, green spaces with medium-canopy and high tree height could improve the local air environment more efficiently, and they maybe more suitable for residents' outdoor recreation in spring.

Key words: waterfront green space; microclimate; comfort degree; canopy closure; tree height

随着城市化进程的加快和社会经济的快速发展,我国城市环境污染问题日益突出,许多城市都出现了“热岛效应”^[1],而城市滨水绿地的改善环境、人体保健等多种功能已被证实^[2]。通过城市自身合理空间配置来缓解城市空气环境问题,也已经被国内外学者证明是保障城市空气环境非常有效的途径之一^[3-4]。大量研究表明,滨水绿地具有提供新鲜空气^[5]、缓解热岛效应^[6]、改善城市小气候^[7-8]等重要作用,并且不同配置的滨水绿地产生的生态效益是不同的:层次丰富的植物群落比单一结构的植物群能更好地改善环境,如乔-灌-草型配置模式对温、湿度的改善作用较大,生态效益较好^[9];大面积的植物群落对改善城市环境的效果比小面积的植物群落更佳^[8];四季中绿地和水体均有增湿作用,夏季的增湿作用最强,冬季的增湿作用较弱^[7]。近些年来,我国许多地区越来越重视城市内滨水绿化的设计,不少学者提出应增加植物的多样性,增加软地面和植被覆盖率,种植高大乔木,以提供遮阴和减少热辐射^[10],改变风速与温湿度等,继而形成微气候。还有一些学者提出滨水带内的绿地面积越大,植被对空气温度和空气相对湿度的改善效果越好^[11],并且不同的空间布局对微环境的影响也存在显著差异^[12]。因此,需要在具体的城市环境中对滨水绿地的环境效益进行细致的探讨。通过实际监测的方法,比较分析不同配置滨水绿地的气象要素和人体舒适度的日变化规律,初步探索出更优的绿化配置模式,为优化我国城市大型滨水区的构建提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

宝鸡市位于陕西省关中平原西部,其南、西、北三面环山。气候属于暖温带半湿润类型,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,春季升温迅速且多变少雨,秋季降温迅速又多阴雨。渭河宝鸡段境内流域全长 200.11 km^[13]。其上游段以退耕还林、天然林保护为重点^[14-15],目前生态治理取得了一定的成效^[16]。

本研究所选的渭河公园、渭河生态园均位于宝鸡市城区沿渭河核心带状区域内,公园周围多为居住区和学校等,无工厂等明显污染物排放源,区域内含有多种不同植物配置的滨水绿地。

1.2 研究方法

1.2.1 样地选择 将样地的郁闭度共分成 3 个梯度,即高(>0.7)、中(0.4~0.7)、低(0.2~0.4);并将样地内主要树种的平均树高共分成 3 个梯度,即高(>9 m)、中(5~9 m)、低(<5 m)。在距离河岸平均 500 m 范围内具有代表性的乔-灌-草模式的 9 个样地。另外选择一处无植被覆盖的空旷地为对照。本研究共 10 个样地,每个样地的大小为 20 m × 20 m,样地间距离 >300 m,附近无密集的车流及高大建筑物。

所选样地内的乔木植物包括女贞 (*Ligustrum lucidum*)、棕榈 (*Trachycarpus fortunei*)、枇杷 (*Eriobotrya japonica*)、木瓜 (*Chaenomeles sinensis*)、榆树 (*Ulmus pumila*)、垂柳 (*Salix babylonica*)等;典型的灌木植物包括:圆柏 (*Sabina chinensis*)、黄杨 (*Buxus sinica*)、火棘 (*Pyracantha fortuneana*)、迎春花 (*Jasminum nudiflorum*)、石楠 (*Photinia serrulata*)、南天竹 (*Nandina domestica*)、金叶女贞 (*Ligustrum × vicaryi*)、重瓣棣棠花 (*Kerria japonica f. pleniflora*)、卫矛 (*Euonymus alatus*)等;草本植物种类十分丰富,且种植密度较高,包括:婆婆纳 (*Veronica didyma*)、车轴草 (*Galium odoratum*)、沿阶草 (*Ophiopogon bodinieri*)、繁缕 (*Stellaria media*)、萱草 (*Hemerocallis fulva*)、阿拉伯婆婆纳 (*Veronica persica*)、鸢尾 (*Iris tectorum*)、酢浆草 (*Oxalis corniculata*)等。样地的基本信息见表 1。

1.2.2 测定方法 在 2019 年 4 月的晴朗天气进行监测,在 9 个样地和对照点的中心位置同步观测,采样高度为距离地表 1.5 m 处,与人体平均呼吸高度基本一致,监测时间为 7:00—19:00,即居民的日常游憩时间,采用便携式风速气象测定仪 Kestrel 4500 Pocket Weather tracker 测定温度、相对湿度

和风速。每隔 10 min 读 1 次数据,并且按不同方向重复测量 3 次,取平均值为该时段的实际观测值。

1.3 数据处理

使用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,并用最小显著差数法(LSD)检验数据之间的差异性,使用 Origin 软件进行绘图。

表 1 样地的基本信息

Table 1 Description of observation sites

样地类型	样地编号	主要树种	郁闭度	主要树种的 平均树高 /m	主要树种的 平均胸径 /cm	主要树种的 平均冠幅 /m	草地 覆盖率 /%
低树高、高郁闭度	LH	女贞、圆柏	0.75	4.6	10.5	2.6	82
低树高、低郁闭度	LL	女贞、毛桉	0.28	4.4	9.8	2.5	72
高树高、低郁闭度	HL	枇杷、垂柳、槭树	0.36	9.5	15.1	3.5	75
低树高、中郁闭度	LM	垂柳、木瓜、玉兰、樱花	0.48	4.4	10.2	2.8	85
高树高、中郁闭度	HM	榆树、棕榈、垂柳、紫叶李	0.61	9.7	15.6	4.3	80
中树高、中郁闭度	MM	垂柳、龙爪槐、枫杨、柳树	0.55	6.8	14.8	4.0	84
中树、低郁闭度	ML	刺槐、紫叶李、雪松、荷花玉兰	0.33	6.4	12.2	3.7	78
中树高、高郁闭度	MH	女贞、樱花、紫叶李、枇杷	0.81	7.2	18.9	4.2	74
高树高、高郁闭度	HH	雪松、垂柳、荷花玉兰	0.86	11.9	21.1	5.3	65

表 2 人体舒适度等级划分

Table 2 Grade division of the comfort degree

等级	感觉程度	温湿指数 I	健康人群感觉的描述
1	寒冷	<14.0	感觉很冷,不舒服
2	冷	$14.0\sim16.9$	偏冷,较不舒服
3	舒适	$17.0\sim25.4$	感觉舒适
4	热	$25.5\sim27.5$	有热感,较不舒服
5	闷热	>27.5	闷热难受,不舒服

2 结果与分析

2.1 不同类型的滨水绿地气象要素的日变化特征

2.1.1 温度的日变化特征 由图 1 可见,各样地的温度变化趋势均相似,在上午均出现明显上升并且上升速率较快,12:00—14:00 达到最大值,而在下午呈现下降的趋势,但下降速率较缓。

具有低郁闭度的 3 个样地 LL、ML、HL 在 10:00 之后的平均温度 $>$ 其他样地,其中具有低平均树高的样地 LL 在 14:00 达到最高温度(34.3°C),因为其内部绿色植物的平均高度最低,无法有效阻挡太阳辐射,使得它对温度的调节能力差。而中郁闭度的样地日间平均温度较低且变化幅度较小,其中具有高平均树高的样地 HM 在观测期间温度的变化速率较低,并且在全天始终维持在较低的范围(11.1°C~18.2°C),说明它能够起到明显的调控温度的作用。除了样地 LL,其他样地在 15:00 至观测结束期间的温度均 $>$ CK,可能是因为 CK 位于开阔地带,可以借助一定强度的风来带走地表的能量^[1],并且地面辐射的热量也易于向四周扩散,使其近地

人体舒适度评价采用的是温湿指数(I),根据国家人居环境气候舒适度评价标准^[17](表 2)进行计算:

$$I = T - 0.55(1 - RH)(T - 14.4) \quad (1)$$

式中: I 为温湿指数; T 为某一评价时段的平均温度/°C; RH 为某一评价时段的平均空气相对湿度/%。

面的温度维持在较低的水平^[18]。

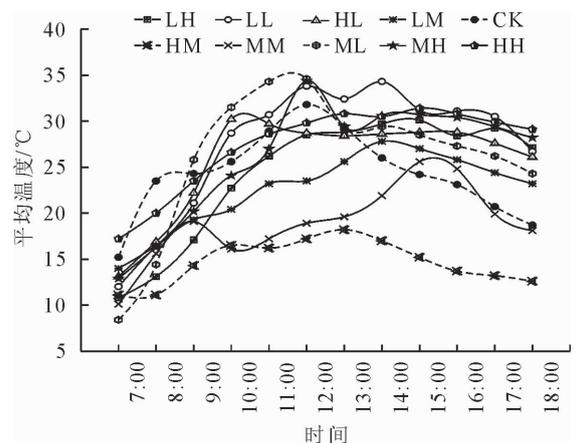


图 1 样地的平均温度日变化

Fig. 1 Diurnal variation of average temperature at different observation sites

2.1.2 相对湿度的日变化特征 由图 2 可见,所有样地空气相对湿度在 7:00—12:00 均经历了不同速率的下降,上午阶段的变化幅度均 $>$ 12:00—16:00。但各样地的空气相对湿度在傍晚(18:00—19:00)发生了小幅度上升,可能是晚间回潮的原因,导致近地表水汽出现了小幅的增加。

对于平均树高及郁闭度均较高的样地,其内部空气相对湿度较高,并且在下午阶段变化幅度均较小,其中具有高平均树高和高郁闭度的样地 HH 的相对湿度在下午时段稳定在 37%~39%。相反,郁闭度较低的样地在各时段的空气相对湿度均较低,其中具有中平均树高的样地 ML 和具有低平均树高的样地 LL 的最低值分别仅有 25.1% 及 16.9%。

分析原因可能是样地 ML 及 LL 的郁闭度低且平均树高较低导致整体的绿量较少,叶片蒸腾散失的水汽少,无法高效地为局部空气进行增湿。值得注意的是,样地 CK 的相对湿度在 7:00—10:00 较高,最高可达 84%。原因很可能是该样地四周的道路上配置了平均树高较高(>10 m)的法桐、国槐,这些行道树通过蒸腾产生的水汽在风的作用下飘逸过来间接地为空地增湿^[19],导致其相对湿度值维持在较高的水平。

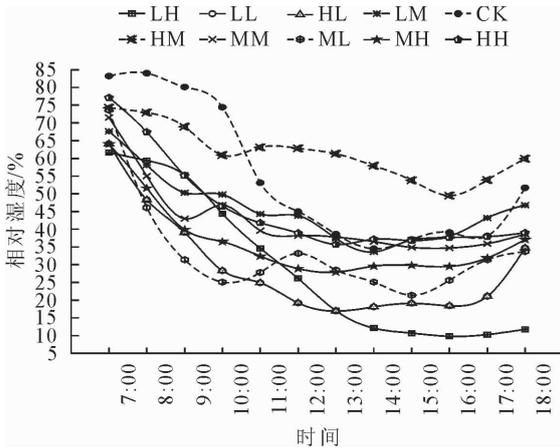


图 2 样地的相对湿度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of relative humidity at different observation sites

2.1.3 风速的日变化特征 由图 3 可见,在观测时段内不同样地的风速差异显著,每个样地均出现了多个峰值,大多数样地在 11:00—14:00 和 17:00—18:00 出现高值,15:00 出现低值。其中,样地 MM 在上午的平均风速显著 > 下午,在 12:00 时达到最大值($4.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),并且显著 > 其他样地,由此可见该样地削减风速的效果不显著。而具有高郁闭度的样地的风速在观测时段内变化幅度较小,分析原因是内部绿色植物的郁闭度最高,并且拥有较大的树冠,因此具有很强的防风作用。其中具有高平均树高的样地 HM 在下午削减风速的效果较好,在 12:00—16:00 的风速一直维持在 $0.7 \sim 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过比较可以看出郁闭度和平均树高均较高的滨水绿地降低风速的能力较强。

2.2 不同类型的滨水绿地的人体舒适度的日变化特征

人体舒适度能直接反映居民在游园时的舒适状况,可以用来评估环境状况的变化。由图 4 可知,9 种配置类型的滨水绿地与对照空地的人体舒适度变化趋势基本一致。7:00—9:00 大部分样地的人体舒适度均处于“寒冷”的范围,随后各样地的人体舒适度值都经历了不同速率的上升,10:00—14:00 均

达到了“舒适”的程度,说明此时段比较适合居民进行休闲娱乐等活动。随后下午时段大部分样地的人体舒适度出现了小幅的下降,但仍处于“舒适”的范围。

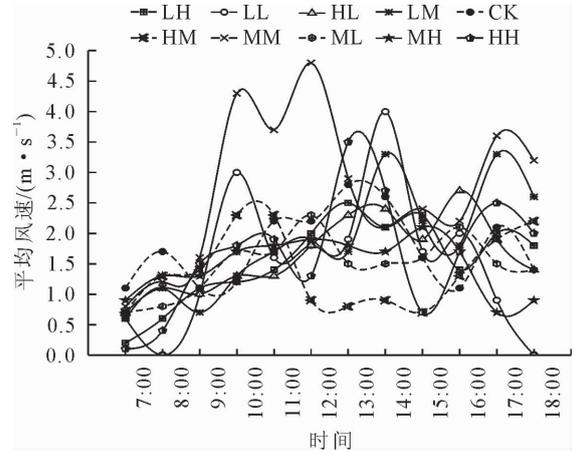


图 3 样地的平均风速日变化

Fig. 3 Diurnal variation of average wind speed at different observation sites

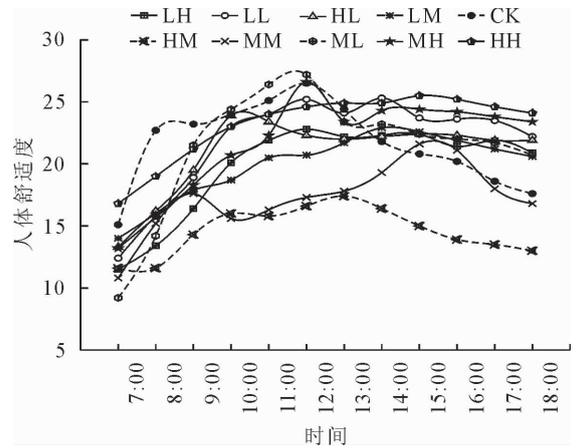


图 4 样地的人体舒适度日变化

Fig. 4 Diurnal variation of human comfort index at different observation sites

由图 4 可知,具有中郁闭度样地的人体舒适度值较低,其中具有高平均树高的样地 HM 在大部分观测时段的舒适度均是最低值,并且在 7:00—9:00 处于“冷”的范围,原因可能是该样地绿色植物的郁闭度较高,乔木平均高度值和冠幅均较大,对内部的遮阴隔热效果比较好^[20-21]。而低郁闭度样地的人体舒适度值则较高,其中具有中平均树高的样地 ML 在 12:00 可高达 27.2,但仍处于“舒适”的程度,这与春季本身较舒适的大气背景温度有关。除此之外,样地在整个观测时间内都处于较舒适的程度范围,并且在上午的大部分时段舒适度值均 > 其余样地。分析原因是其周围有高大的行道树如法桐、国槐,可以借助其对微环境的调控功能^[20-22]来间接改变样地内的温度和湿度。

2.3 不同类型的滨水绿地的春季微气候效应与人体舒适度的差异性比较

根据表3,具有较高郁闭度和平均树高的样地在降温增湿方面的效果比较明显,其中具有中郁闭度及高平均树高的样地HM对样地内部的遮阴、隔热效果最为显著,其增湿效率、降温效率以及风速削减率分别达12.19%、39.58%、20.40%。比较得知,具有低郁闭度及平均树高的样地对局部空气的增湿、降温效果均很差,但是削减风速的能力却比较好,该结果与大部分研究森林防风能力的研究结果^[3,19]不同,可能是因为该样地靠近了密植高大雪松、国槐等乔木的滨水绿地,这些乔木高大的树冠形成了天然屏障,使得到达该样地中心处的风力被大大削弱。

表3 滨水绿地的春季微气候要素与人体舒适度的变化情况

Table 3 Effects of microclimate factors and climate comfort-index in different kinds of waterfront green fields in Spring %

样地类型	平均温度 削减率	相对湿度 日增长率	平均风速 削减率	人体舒适度 日增长率
LH	-7.86	-46.41	11.70	-8.70
LL	-12.88	-46.54	11.62	0.72
HL	-6.03	-46.54	5.38	-3.30
LM	7.24	-16.51	-5.30	-8.16
HM	39.58	12.19	20.40	-32.70
MM	22.17	-22.21	-55.02	-20.22
ML	-7.69	-38.87	14.31	-1.39
MH	-7.63	-33.37	15.57	0.20
HH	-12.56	-16.38	5.14	6.92

通过显著性分析可以发现在增湿、降温、降低风速3个方面,具有中郁闭度及高平均树高的样地HM的改善能力显著优于其他类型的样地(表4)。但是在改善人体舒适度方面,该样地的平均评级结果为“冷”,其余样地均处于“舒适”范围内,可能是因为它内部绿色植物的郁闭度及平均高度较高、平均冠幅也比较大,导致降温增湿效应明显,在本来就不“热”的春季环境下,容易使得林内的人感觉“冷”。

3 结论与讨论

本研究发现,在观测时段内具有中郁闭度及中、高平均树高的滨水绿地产生的降温、增湿以及防风作用显著,其中具有中郁闭度、高平均树高的滨水绿地的效果极显著优于其他滨水绿地,其降温、增湿以及削减风速风的效率分别为12.19%、39.58%、20.40%,全天的舒适度评级为“冷”。这个结果也再次证实了绿色植物能够显著的改善热环境,为人们带来清凉^[23-24]。因此,建议在城市滨水区多配置

表4 滨水绿地的春季微气候效应与人体舒适度的均值及差异显著性

Table 4 The means and the the significance of difference of microclimate factors and climate comfort-index in different kinds of waterfront green field in spring

样地类型	相对湿度/%	平均温度/℃	平均风速/(m·s ⁻¹)	人体舒适度
LH	29.4a	24.3d	1.6ab	19.8c
LL	31.6ab	27.4g	1.6abc	21.8f
HL	31.6ab	25.7e	1.7bcd	21.0d
LM	45.8d	22.5c	1.9d	19.9c
CK	54.9e	24.3d	1.8cd	21.7e
HM	61.6f	14.7a	1.4a	14.6a
MM	42.7d	18.9b	2.7de	17.3b
ML	33.6bc	26.1f	1.5ab	21.4d
MH	36.6c	26.1f	1.5ab	21.7e
HH	45.9d	27.3g	1.7bcd	23.2g

注:小写字母表示显著水平 $P<0.05$ 。

具有中郁闭度和高平均树高的滨水绿地,更好地改善微环境,方便居民进行日常游憩活动。

近些年来对城市森林、城市绿地生态效益的众多研究均证明,在城市中配置具有复杂乔-灌-草模式的绿地可以显著改善微气候^[9,25-26],绿地的生物量越高、配置模式越复杂,越能够高效发挥绿色植物遮阴、隔热和改变风速的作用。本研究也证实了具有低等郁闭度的滨水绿地是各项环境效益差,原因是其内部缺乏绿色植物,难以利用植物的蒸腾作用进行显著的降温,并且当绿地的平均树高较低时,无法借助高大的树冠吸收截留太阳辐射来遮阴、降温^[7],因此对微气候的调节能力较差。此外,本研究中空地的平均相对湿度较高,达54.9%,这可能得益于该样地周围密植有高大的行道树,可以利用大面积水体及周围绿色植物的共同作用来间接增湿^[19]。一些对城市滨水绿地的环境效益的研究也表明在大范围内,大面积水体与周围植物环境相互影响,可以形成良好的循环效应来改善微环境^[26-27]。但是这种间接调节作用在炎热的夏季和寒冷的冬季是否显著,则需进一步研究。

由于条件限制,本研究只对春季滨水绿地的配置进行研究,对其他季节的改善微环境的作用并未涉及,并且缺乏对滨水绿地其他生态功能的定量研究,建议未来对多种配置类型的滨水绿地产生的综合环境效益进行更系统的研究。

参考文献:

- [1] 冯维波. 试论山地城市人居环境的生态建设[J]. 水土保持研究, 2006, 13(1): 26-27, 34.
FENG W B. On the ecological construction of hilly urban human settlement[J]. Research of Soil and Water Conservation,

- 2006,13(1):26-27,34. (in Chinese)
- [2] 刘亚. 北京市滨水林外景观质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [3] NISHIMURA N, NOMURA T, IYOTA H, *et al.* Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology [J]. *Solar Energy*, 1998, 64: 197-207.
- [4] HART M A, SAILOR D J. Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2009, 95(3): 397-406.
- [5] 刘端, 白志强, 韩燕梁. 喀纳斯国家级森林公园景区夏秋季空气负离子浓度变化特征[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(3): 253-257.
LIU D, BAI Z Q, HAN Y L. Comparison on air anion concentration at the scenic spots of Kanas national forest park[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(3): 253-257. (in Chinese)
- [6] 张清杉, 贺延梅, 赵建民, 等. 森林公园小气候空气负离子保健浓度分级评价[J]. *西北林学院学报*, 2006, 21(3): 48-49.
ZHANG Q S, HE Y M, ZHAO J M, *et al.* Grading assessment of aeroanion concentration the microclimate of forest park[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006, 21(3): 48-49. (in Chinese)
- [7] 杨欢. 郑州市东风渠滨河绿地植物群落结构分析及对空气质量的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2006.
- [8] 张迪, 李柏峰, 李青山, 等. 金丝河负离子分布及旅游资源引力分析[J]. *林业世界*, 2013(2): 17-23.
ZHANG D, LI B F, LI Q S, *et al.* River gold anion distribution and tourist resources gravity analysis [J]. *World Journal of Forestry*, 2013(2): 17-23. (in Chinese)
- [9] 苏丹. 徐州市故黄河滨水绿地乔-灌-草型、乔-草型植物配植的环境效应分析[J]. *绿色科技*, 2018(13): 155-157, 160.
SU D. Analysis on the plant arrangement and environmental effect of arbor-shrub-herb type, arbor-herb type riverside green of the old yellow river in Xuzhou[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 2018(13): 155-157, 160. (in Chinese)
- [10] 叶素琼. 浅析滨水游憩绿地景观设计[J]. *现代园艺*, 2018(15): 167-168.
- [11] 李书严, 轩春怡, 李伟, 等. 城市中水体的微气候效应研究[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 552-560.
LI S Y, XUAN C Y, LI W, *et al.* Analysis of microclimate effects of water body in a city[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(3): 552-560. (in Chinese)
- [12] 李留振, 郑俊霞, 毕丽华, 等. 黄河故道滩地不同植被的湿地效应分析[J]. *江苏农业科学*, 2010(4): 390-392.
- [13] 邱玲, 刘芳, 张祥, 等. 城市公园不同植被结构绿地削减空气颗粒物浓度研究[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1685-1694.
QIU L, LIU F, ZHANG X, *et al.* Reducing effect of air particulate matter concentration by green spaces with different vegetation structure in city parks[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1685-1694. (in Chinese)
- [14] 杨阳, 王睿, 滕青林, 等. 宝鸡市城镇(郊)陡坡及人工立面景观林树种三维绿量及生态效益研究[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(3): 266-271.
YANG Y, WANG R, TENG Q L, *et al.* Living vegetation volume and ecological benefit of the landscaping tree species on steep slope and artificial elevation in urban and suburban area of Baoji[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(3): 266-271. (in Chinese)
- [15] 陈海平, 李晓华. 宝鸡市绿地中的地被植物应用现状及发展对策[J]. *陕西林业科技*, 2007(4): 92-93, 105.
- [16] 刘锦国, 赵宗林. 宝鸡市渭河流域绿化治理探讨[J]. *陕西林业科技*, 2012(4): 92-94, 105.
- [17] GB/T 27963-2011. 人居环境气候舒适度[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [18] 崔丽娟, 康晓明, 赵欣胜, 等. 北京典型城市湿地小气候效应时空变化特征[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 212-218.
CUI L J, KANG X M, ZHAO X S, *et al.* Spatiotemporal variation in the microclimate effects of typical urban wetland in Beijing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(1): 212-218. (in Chinese)
- [19] SAARONI H, ZIV B. The impact of a small lake on heat stress in a Mediterranean urban park; the case of Tel Aviv Israel[J]. *International Journal of Biometeorology*, 2003, 47(3): 156-165.
- [20] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 等. 城市绿地的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7287-7300.
SU Y X, HUANG G Q, CHEN X Y, *et al.* Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7287-7300. (in Chinese)
- [21] 张健, 章新平, 王晓云, 等. 北京地区气温多尺度分析和热岛影响[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(1): 51-58
- [22] 阳文锐, 李锋, 何永. 2003-2011年夏季北京城市热景观变化特征[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4390-4399.
YANG W R, LI F, HE Y. Characteristic change and analysis of urban heat island in Beijing, China, Summer, 2003-2011[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7287-7300. (in Chinese)
- [23] WEBB B, ZHANG Y. Spatial and seasonal variability in the components of the river heat budget[J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(1): 79-101.
- [24] FEYISA G L, DONS K, MEILBY H. Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect; an example from Addis Ababa[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 123: 87-95.
- [25] 刘勇洪, 轩春怡, 权维俊. 基于卫星资料的北京陆表水体的热环境效应分析[J]. *湖泊科学*, 2013, 5(1): 73-81.
LIU Y H, XUAN C Y, QUAN W J. Thermal environment effect of land surface water bodies in Beijing based on satellite data[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2013, 5(1): 73-81. (in Chinese)
- [26] 王昕璐. 长春市公共空间植物配植设计适宜度研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2017.
- [27] 董立民, 辛继红, 窦彬生, 等. 火地塘林场小气候效应对增进人体舒适感影响的研究[J]. *西北林学院学报*, 1994, 9(3): 17-20.
DONG L M, XIN J H, DOU B S, *et al.* Effect of microclimate in Houditang experimental forest station on the improvement of the human sense of comfort[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 1994, 9(3): 17-20. (in Chinese)