

校园绿地冬季白天小气候效应分析

——以西北农林科技大学南校区为例

王利鑫,弓弼*,申依宁,谷宁

(西北农林科技大学 风景园林艺术学院,陕西 杨陵 712100)

摘 要: 园林绿地在调节环境温湿度方面发挥着重要作用。选择不同植物种类组成的校园绿地作为研究对象,结合其对人体舒适度的影响,将绿地对校园小气候的改善作用进行定量化研究。2015年1月14—23日,每天8:00—18:00,每2 h 1次分别对西北农林科技大学南校区校园内具有代表性的6处样地的温度、相对湿度和风速进行同步测定。结果表明:校园绿地相对于无绿化地面均表现出增湿效应,在温度调节方面表现为减小温度的变化幅度,并对人体舒适度均有一定的改善。将晴朗天气14:00的温湿度进行多重比较(Bonferroni's 多重分析, $p < 0.05$)分析发现,冬季常绿植物构成的校园绿地对校园小气候的调节和人体舒适度的改善具有较为明显的作用。

关键词: 校园绿地;温度;相对湿度;人体舒适度

中图分类号: S731.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-7461(2016)01-0292-06

Microclimate Effects of Campus Green Space in Winter Day——
A Case Study of the South Campus of Northwest A&F University

WANG Li-xin, GONG Bi*, SHEN Yi-ning, GU Ning

(College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Green spaces play important roles in regulating the environment temperature and humidity. Taking the green spaces that were composed of different plant species in the south campus of Northwest A&F University as research objects, combining with degrees of human comfort, a quantitative study was conducted on the improvement of campus microclimate by the green spaces. Six typical sites were selected, in which the temperature, relative humidity and wind speed synchronously measured once every two hours from 8:00 to 18:00 every day on January 14 to 23, 2015. The results showed that the campus green spaces could increase atmospheric humidity, reduce the scope of temperature variation, and improve human comfort. Multiple comparison analysis of the data of temperature and humidity recorded at the time of 14:00 in sunny days showed that evergreen species in the campus significantly adjusted the microclimate and improved human comfort.

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

园林绿地作为城市系统中的自然生产力主体,在改善空气质量、调节局部小气候方面发挥着一定的作用^[1-2]。近年来,不少学者对城市绿地的生态效益进行研究,尤其在城市绿地的降温增湿效益方

面^[3-6],而在以往的相关研究中,主要体现在高温夏季给周边环境带来的降温增湿效益,而在冬季较长的北方城市相关的定量化研究较少^[7-8],而园林绿地科学、合理的植物配置是其发挥生态效益的关键^[9]。

本文试图通过研究不同植物种类构成的绿地所发挥的温湿效益的定量化研究,比较其对小气候的调节和人体舒适度的改善作用,为构建更为舒适宜人的校园环境提供一定的理论依据。

1 试验样地与研究方法

1.1 试验样地选择

本试验选择享有“生态式园林学府”美誉的西北农林科技大学南校区校园。根据研究目标,以不同植物种类组成的绿地为依据,在校园内选取 5 处具有较好代表性的绿地,分别是科研主楼西侧的草坪

(样地 2)、农科大楼东侧以灌木为主的绿地(样地 3)、3 号教学楼西侧以落叶乔木为主的“经济树木园”(样地 4)、行政主楼东侧以常绿树木为主的绿地(样地 5)和林学院实验楼西侧的“百竹园”(样地 6,以下简称“竹林”),并以无植物覆盖的操场(样地 1)为对照。绿地中植物种类为本地区常见的乡土植物,植物的生长状况良好。所选试验地的面积相似,绿化覆盖率均在 80%左右,且周边都为交通道路或建筑,实现了绿地之间的可比性,在一定程度上保证了所选试验样地的代表性。试验地的植物种类及现状见表 1。

表 1 试验地基本信息
Table 1 Basic information of the sample plots

样地编号	植物种类	植物组成	类型特点
1	铺装	无植被覆盖	操场活动场地,水泥地面
2	草坪	早熟禾	地形平坦,草坪满铺,仅边缘有数棵水蜡
3	灌木	连翘,红瑞木,贴梗海棠,红王子锦带,木槿	有微地形,植物种植密度适中
4	落叶乔木	山茱萸,桃,柿树,榆树,山楂	多为经济类树木,各类植物分类种植,种植密度为 0.039 株·m ⁻²
5	常绿乔木	白皮松,雪松,油松,云杉,红叶石楠,桂花	多为针叶树,不规则式种植,种植密度较大,为 0.032 株·m ⁻²
6	竹类	早竹,淡竹,毛竹,紫竹,阔叶箬竹	较为封闭的自然式种植,生态环境良好

1.2 测试内容与方法

试验时间为冬季气候特征较为明显的 2015 年 1 月 14 日至 2015 年 1 月 23 日,其中 16、18、20、21、22 日 5 d 为晴天,多云天气为 14、17、19 日 3 d,另外 2 d 为多云转阴。按照对角线布点法从样地中心开始分别设置 5~7 个样点,对所选定样点的温湿度进行连续 10 d 的同步观测,观测具体时间为 8:00—18:00,每 2 h 观测 1 次。观测采用 DHM2A 型通风干湿表(6 台),测试高度设置在人体对温湿度最敏感的 1.5 m 处。此外,在周围无遮挡物的操场,使用 QDF-6 数字风速仪进行同步的风速观测。对所得数据使用 Microsoft Excel 2007 进行统计,采用 SPSS 22.0 软件进行多重比较分析。

1.3 人体舒适度

人体舒适度以人体与周围环境之间热量平衡原理为基础,从气象环境角度来评价人体在不同外在环境下舒适程度的生物气象指标。其中风速、温度和相对湿度是人对环境感受因素中影响人体舒适感的重要因子^[10-11]。关于人体舒适度的预报公式有多种,选择人体舒适度指数(DI)作为评价指标,其等级划分是按照中国气象局规定的统一标准,本文截取冬季环境的等级划分标准如表 2 所示。

人体舒适度指数(目前天津气象局采用)公式为^[12]: $DI=1.8\times T+0.55\times(1-RH)+32-3.2\times V^{0.5}$,式中, T 为气温(℃), RH 为相对湿度(%), V 为风速(m·s⁻¹)。

表 2 人体舒适度指数等级划分

Table 2 Grades of huan comfort

人体舒适度指数	级别	热感觉
61~70	0 级	舒适
51~60	1 级	凉爽,人体感觉较舒适
41~50	2 级	凉,人体感觉不舒适
20~40	3 级	冷,人体感觉很不舒适,体温稍有下降
<20	4 级	寒冷,人体感觉极不适应,冷得发抖

2 结果与分析

2.1 温度效应

2.1.1 总体趋势 将连续 10 d 的数据进行对比分析发现,无论是晴天还是多云天气,在 10:00—16:00 时间段,相对于无植被覆盖的操场,5 块绿地均存在不同程度的降温作用,在温度最高的时刻呈现:样地 1>样地 2>样地 3>样地 4>样地 5>样地 6 的温度顺序;而在 8:00—18:00,各试验样地的温度顺序呈相反的趋势,此时操场的温度最低,而竹林的温度最高。尽管绿地在冬季低温时段所发挥的对温度的调节作用不如夏季显著,但所测数据仍呈现出了一定的规律性,从温度变化的折线图可以看出,各类绿地都在一定程度上减缓了温度的变化幅度,即在冬季 8:00—18:00 这一时间段里,各类绿地的温差都相对于无植被覆盖的操场小,此外,在冬季的高温时段,绿地仍表现出一定的降温作用。

2.1.2 温度日变化 将日平均风速<0.5 m·s⁻¹

的晴朗天气各时间段的温度进行平均得出,在晴朗天气的温度日变化中,不同类型绿地平均温度随气温的变化而变化(图 1)。在所测时间段里,8:00是各样地温度的最低点,此时的温度顺序为:样地 1 (-2.3°C)<样地 2(-1.9°C)<样地 3(-1.5°C)<样地 4(-1.4°C)<样地 5(-1.2°C)<样地 6 (-1.1°C),以操场(-2.3°C)的温度作为对照,竹林 (-1.1°C)的温度比其高 1.2°C ;16:00 各样地的温度较为相近,温度呈现样地 1(13.8°C)>样地 2 (13.5°C)>样地 3(13.0°C)>样地 4(12.8°C)>样地 5(12.7°C)>样地 6(12.5°C),此时操场的温度最高,而竹林的温度最低,两者之间的差值为 1.3°C 。在 10:00 和 14:00 的时候,各样地之间的温度差值比较大,分别为 2.2°C 和 2.3°C 。

2.1.3 不同天气条件下的温度变化 在连续观测的 10 d 里,由于不同天气状况的日照时间不同,温度变化相应具有一定的差异性,现将多云、晴天两种天气的温度变化进行比较。晴朗天气的温度变化较为显著的时间段在 8:00—12:00,其余时间温度变化相对不明显,其快速升温时段在 8:00—12:00,这

一时间段的升温速率可达 $4^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$;在 12:00—16:00 这段时间温度呈缓慢的上升趋势,升温速率降为 $0.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$,并在 14:00 达到 1 d 的最高温度;温度在 16:00—18:00 这一时段开始逐渐降低。多云天气状况下的温度变化较为显著的时间段在 10:00—14:00 和 16:00—18:00,其余时间温度变化较为缓慢,其温度呈上升趋势的时间段在 8:00—16:00,并在 16:00 达到一天中的最高值;温度在 16:00 之后开始以 $2.5^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速率下降。不同天气状况的温度变化见表 3、图 2、图 3。

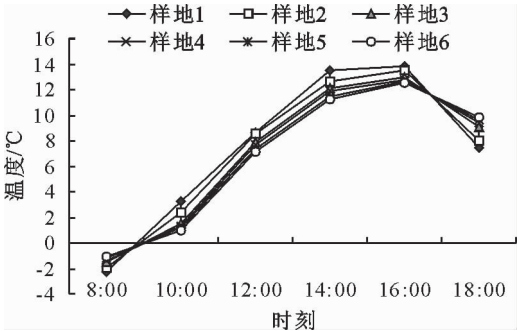


图 1 各样点温度日变化

Fig. 1 Temperature diurnal variations of the sample plots

表 3 不同天气温度最值与平均值

Table 3 Maximum and minimum temperatures of different weather conditions

天气状况	温度值	样地 1	样地 2	样地 3	样地 4	样地 5	样地 6
多云	最低温度	-3.7	-3.2	-3.0	-2.9	-2.7	-2.1
	最高温度	7.6	7.5	7.3	7.2	7.1	7.0
晴天	最低温度	-2.4	-1.4	-1.1	-0.8	-0.3	0.3
	最高温度	15.3	15.1	14.9	14.7	13.8	13.6

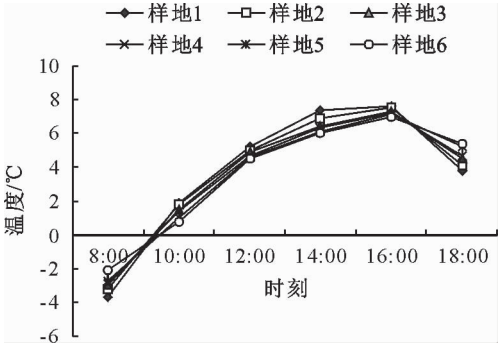


图 2 多云天气温度日变化

Fig. 2 The temperature change of the cloudy weather

2.1.4 多重比较与分析 以晴朗天气各样地14:00 的温度进行多重比较分析,得出不同植物种类绿地调节温度作用的差异见表 4。以操场为对照,除草坪外各类型绿地的降温效果都达到显著水平 ($p<0.05$),而与草坪的温度差异未达到显著水平;竹林仅与操场和草坪的降温效果达到差异显著水平。

通过比较发现,样地 1 与样地 2、样地 3 与样地 4、样地 5 与样地 6 的温度变化较为相似,这是由于草坪相对空旷,其热量的流动及交换较快,以致其温

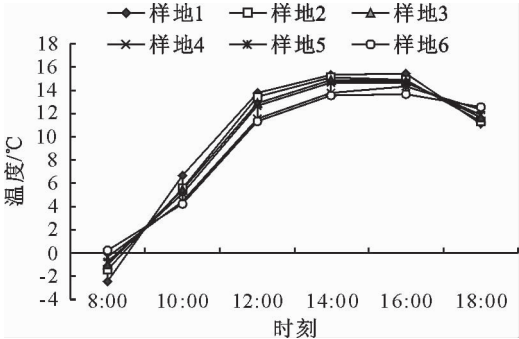


图 3 晴朗天气温度日变化

Fig. 3 The temperature change of the fine weather

度变化比较大。其他绿地都有一定量的植物枝、干、叶的遮盖,从一定程度上减少了辐射平衡及乱流热交换量,因而对于覆盖率较高的竹林和以常绿乔木为主的绿地来说,即使在白天日照强度较大的时候增温并不多,此外,绿色植物除能反射、遮挡部分太阳辐射外,还能通过光合作用吸收部分的太阳能,从而能使到达树冠下面的太阳辐射减少,以减缓绿地的增温速率^[13-14]。对于落叶植物构成的绿地来说,尽管冬季已落叶,只剩稀疏的枝干,但仍可以减少小

表 4 晴朗天气 14:00 温度多重比较分析					
Table 4 Multiple comparison of temperature at 14:00 in sunny day					
Bonferroni 法			因变数:最高温度		
(I)	(J)	平均差异 (I-J)	显著性	95% 信赖区间	
				下限	上限
操场	草坪	0.200 00	0.782	−0.138 5	0.538 5
	灌木	0.473 33 *	0.004	0.134 8	0.811 9
	树木	0.480 00 *	0.003	0.141 5	0.818 5
	常绿	0.753 33 *	0.000	0.414 8	1.091 9
	竹林	0.746 67 *	0.000	0.408 1	1.085 2
草坪	操场	−0.200 00	0.782	−0.538 5	0.138 5
	灌木	0.273 33	0.183	−0.065 2	0.611 9
	树木	0.280 00	0.161	−0.058 5	0.618 5
	常绿	0.553 33 *	0.001	0.214 8	0.891 9
	竹林	0.546 67 *	0.001	0.208 1	0.885 2
灌木	操场	−0.473 33 *	0.004	−0.811 9	−0.134 8
	草坪	−0.273 33	0.183	−0.611 9	0.065 2
	树木	0.006 67	1.000	−0.331 9	0.345 2
	常绿	0.280 00	0.161	−0.058 5	0.618 5
	竹林	0.273 33	0.183	−0.065 2	0.611 9
树木	操场	−0.480 00 *	0.003	−0.818 5	−0.141 5
	草坪	−0.280 00	0.161	−0.618 5	0.058 5
	灌木	−0.006 67	1.000	−0.345 2	0.331 9
	常绿	0.273 33	0.183	−0.065 2	0.611 9
	竹林	0.266 67	0.210	−0.071 9	0.605 2
常绿	操场	−0.753 33 *	0.000	−1.091 9	−0.414 8
	草坪	−0.553 33 *	0.001	−0.891 9	−0.214 8
	灌木	−0.280 00	0.161	−0.618 5	0.058 5
	树木	−0.273 33	0.183	−0.611 9	0.065 2
	竹林	−0.006 67	1.000	−0.345 2	0.331 9
竹林	操场	−0.746 67 *	0.000	−1.085 2	−0.408 1
	草坪	−0.546 67 *	0.001	−0.885 2	−0.208 1
	灌木	−0.273 33	0.183	−0.611 9	0.065 2
	树木	−0.266 67	0.210	−0.605 2	0.071 9
	常绿	0.006 67	1.00 0	−0.331 9	0.345 2

注: * 平均值差异在 0.05 等级显著。表 5 同。

部分的太阳辐射,并在一定程度上减少了乱流热交换量,且植物的光合作用虽微弱但仍在持续,因而此类绿地也在小幅度上减缓了温度变化的幅度。

2.2 湿度效应

2.2.1 总体趋势 通过对数据的整理分析,发现相对湿度的变化在很大程度上是受温度变化的影响。冬季早晨空气中的温度较低而相对湿度较大,随着白天温度的逐渐增高,相对湿度呈逐渐下降的趋势,当温度达到白天最高值时,所对应的相对湿度值是最低的。

将连续 10 d 的数据进行对比得出,在所测时间段内,各类型绿地均存在不同程度的增湿作用,在白天相对湿度最低的时刻呈现:样地 1<样地 2<样地 3<样地 4<样地 5<样地 6 的湿度顺序;在各样地白天温度相近的时刻,其相对湿度值也达到最接近的程度。尽管不同植物种类的绿地在冬季低温时段所表现的增湿效应较为微弱,但是相对于无植被覆盖的操场,均表现出相应的增湿效应。晴朗天气的

温度变化较为显著的时刻在 10:00 和 14:00,而这 2 个时刻同时也是各样地之间相对湿度差值最大的时刻,另外,8:00 和 12:00 是各样地温度和相对湿度都比较接近的时刻。晴朗天气的相对湿度变化见图 4。

2.2.2 相对湿度日变化 将连续 3 d 晴朗天气各时间段的相对湿度进行平均得出,在晴朗天气的湿度日变化中,不同类型绿地平均相对湿度随温度的升高而降低(图 4)。在所测时间段里,8:00 是各样地相对湿度的最高点,其相对湿度分别为:75%(样地 1)、77%(样地 2)、79%(样地 3)、80%(样地 4)、81%(样地 5)、82%(样地 6),其他时刻所呈现的相对湿度顺序也与之相同;16:00 各样地的相对湿度达到白天最低点。在 8:00、12:00 和 16:00 各样地之间的相对湿度值最为相近,其差值分别为 7%、10%和 8%;而 14:00 是各样地相对湿度差值最大的时刻,此时以操场(29%)的相对湿度作为对照,竹林(45%)的相对湿度比其高 16%。

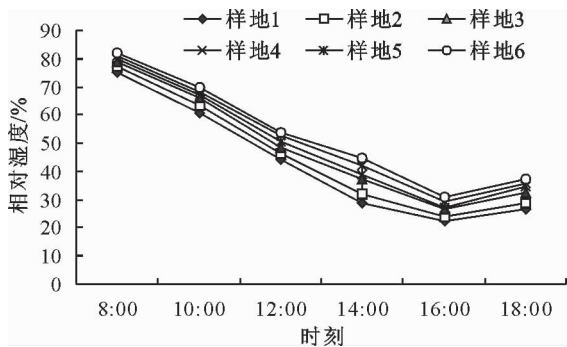


图 4 各样点相对湿度日变化

Fig. 4 Relative humidity diurnal variations of the sample plots

2.2.3 多重比较与分析 以各样地 14:00 的相对湿度进行多重比较分析,得出不同植物种类绿地调节湿度作用的差异如表 5。以操场作为对照,除草坪外与其他各绿地的相对湿度均达到显著水平($p<0.05$)。

通过比较发现,各样地的相对湿度变化较为规律,都是随温度的升高而降低;不同植物种类绿地的相对湿度都比对照样地高,其中自然环境条件较好的竹林与无植被覆盖的操场的相对湿度差异最大。这主要是由于植物的光合、呼吸、蒸腾作用,使得绿地的相对湿度较大,在冬季白天高温时段,常绿植物可以通过蒸腾作用增加空气中的水分含量,从而使该绿地的相对湿度较大^[15]。尽管在北方冬季,落叶乔、灌木的生理活动很微弱,草坪也几近休眠期,但相对于水泥地面的操场,绿地尤其是常绿树种构成的绿地对周围环境的干热状况具有较好的缓解作用。

2.3 舒适度比较

根据人体舒适度指数(DI)的计算公式,对晴朗天气各样地的平均舒适度指数进行对比分析,各样地在所测时间段内舒适度等级的分布情况如图 5。各时间段的 DI 反映了一天中不同时间的舒适度情

表 5 晴朗天气 14:00 湿度多重比较分析

Table 5 Multiple comparison of humidity at 14:00 in sunny day

Bonferroni 法			因变数:最低湿度		
(I)	(J)	平均差异 (I-J)	显著性	95% 信赖区间	
				下限	上限
操场	草坪	-2.866 67	0.183	-6.416 9	0.683 6
	灌木	-8.600 00 *	0.000	-12.150 3	-5.049 7
	树木	-11.000 00 *	0.000	-14.550 3	-7.449 7
	常绿	-13.900 00 *	0.000	-17.450 3	-10.349 7
	竹林	-15.900 00 *	0.000	-19.450 3	-12.349 7
草坪	操场	2.866 67	0.183	-0.683 6	6.416 9
	灌木	-5.733 33 *	0.001	-9.283 6	-2.183 1
	树木	-8.133 33 *	0.000	-11.683 6	-4.583 1
	常绿	-11.033 33 *	0.000	-14.583 6	-7.483 1
	竹林	-13.033 33 *	0.000	-16.583 6	-9.483 1
灌木	操场	8.600 00 *	0.000	5.049 7	12.150 3
	草坪	5.733 33 *	0.001	2.183 1	9.283 6
	树木	-2.400 00	0.445	-5.950 3	1.150 3
	常绿	-5.300 00 *	0.002	-8.850 3	-1.749 7
	竹林	-7.300 00 *	0.000	-10.850 3	-3.749 7
树木	操场	11.000 00 *	0.000	7.449 7	14.550 3
	草坪	8.133 33 *	0.000	4.583 1	11.683 6
	灌木	2.400 00	0.445	-1.150 3	5.950 3
	常绿	-2.900 00	0.172	-6.450 3	0.650 3
	竹林	-4.900 00 *	0.004	-8.450 3	-1.349 7
常绿	操场	13.900 00 *	0.000	10.349 7	17.450 3
	草坪	11.033 33 *	0.000	7.483 1	14.583 6
	灌木	5.300 00 *	0.002	1.749 7	8.850 3
	树木	2.900 00	0.172	-0.650 3	6.450 3
	竹林	-2.000 00	0.934	-5.550 3	1.550 3
竹林	操场	15.900 00 *	0.000	12.349 7	19.450 3
	草坪	13.033 33 *	0.000	9.483 1	16.583 6
	灌木	7.300 00 *	0.000	3.749 7	10.850 3
	树木	4.900 00 *	0.004	1.349 7	8.450 3
	常绿	2.000 00	0.934	-1.550 3	5.550 3

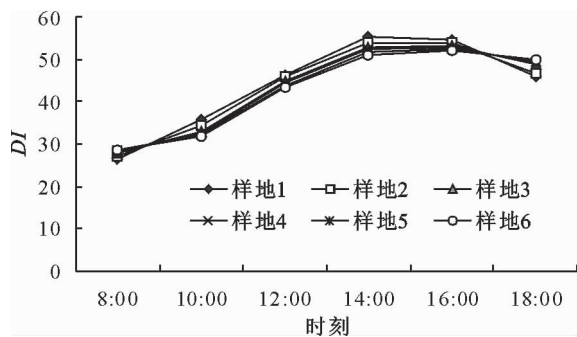


图 5 各样点舒适度等级分布情况

Fig. 5 Grade distribution of comfort degree for the sample plots

况,可以看出一天中人体感觉最为舒适的时间是 14:00 和 16:00,此时的舒适度等级为 1 级,人体感觉凉爽且较为舒适;其次是 12:00 和 18:00 这 2 个时间段为 2 级,人体感觉不舒适;8:00 和 10:00 达到 3 级,人体感觉很不舒适且体温稍有下降。通过各样地舒适度指数的比较发现,绿地对人体舒适性的改善程度不如对温湿度的调节作用显著。在冬季的 8:00 和 18:00,常绿植物组成的绿地是人体感觉最舒适的,即绿地在干冷冬季的低温时段能够提高人体舒适感。

3 结论与讨论

植物由自身生理活动所产生的温湿效益对城市具有很重要的意义^[16]。通过对不同植物种类组成的校园绿地在冬季所产生的温湿效应进行研究得出,绿地在冬季仍然具有调节温湿度和改善人体舒适度的作用。在冬季白天的高温时段,绿地具有降温增湿的作用,有常绿植物组成的绿地能够发挥较大的温湿效益;而在低温时段,虽然绿地仍体现出明显的增湿效应,但对温度的调节表现为增温效应。对所测时间段的温度变化进一步分析发现,绿地在冬季所表现出的对温度的调节作用为减少温度的变化幅度,使绿地内的温差有明显降低的趋势。园林绿地对温湿度的调节作用不仅可以改善城市冬季的干旱状况,还可以在低温时段提高人们在室外环境中的舒适感。

在城市环境状况日益下降的情况下,园林绿地所带来的生态效益也越来越受到人们的重视,因而在注重景观艺术性的同时更需要强调植物配置的科学性。要使园林绿地发挥更大的综合效益,需要遵循生态学原理,以植物群落的构建为绿地结构单位来构建复合群落。目前,校园绿地大多群落层次单一且过于人工化,因而在一定程度上限制其真正发挥生态效益。

北方城市四季分明,应用不同类型的园林植物营造不同季节的景观特色,落叶植物挺拔的枝干与

常绿植物宜人的色彩形成了北方城市的主调景观,但作为主体的常绿植物,其配置比例应适度,在考虑绿地生态效益的基础上避免过多使用而造成景观的沉闷。此外,还有部分植物在冬季显露出彩色的枝条、美丽的叶形、鲜亮的果实、独特的冬芽和沁人的花香,这给北方城市的冬季景观增添了不少的生机与活力。因此,相关工作者应根据不同的景观功能要求,选择适宜的植物材料,构建舒适的校园景观。

参考文献:

[1] 祝宁,李敏,柴一新. 哈尔滨市绿地系统生态功能分析[J]. 应用生态学报,2002,13(9):1117-1120.
ZHU N,LI M,CHAI Y X. Ecological functions of green land system in Harbin[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002,13(9):1117-1120. (in Chinese)

[2] 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[J]. Building and Environment,2011,46:2186-2194.

[3] HAMADA S,OHATA T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas[J]. Urban Forestry and Urban Greening,2010,9(1):15-24.

[4] 蔺银鼎. 城市绿地生态效应研究[J]. 中国园林,2003(11):36-38.
LIN Y D. Studies on the ecological effect of urban greens[J]. Chinese Landscape Architecture, 2003(11):36-38. (in Chinese)

[5] 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[J]. International Journal of Climatology,2006,26:1695-1711.

[6] 刘娇妹,李树华,吴菲,等. 纯林、混交林型园林绿地的生态效益[J]. 生态学报,2007,27(2):674-684.
LIU J M,LI S H,WU F,et al. The ecological effects between pure woodland and mixed of urban green space[J]. Acta Ecologica Sinica,2007,27(2):674-684. (in Chinese)

[7] 康博文,王得祥,刘建军,等. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报,2005,20(2):54-56.
KANG B W,WANG D X,LIU J J,et al. The effects of reducing temperature and increasing humidity by different Greenland in urban area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005,20(2):54-56. (in Chinese)

[8] 刘娇妹,李树华,杨志峰. 北京公园绿地夏季温湿效应[J]. 生态学杂志,2008,27(11):1972-1978.
LIU J M,LI S H,YANG Z F. Temperature and humidity effect of urban green spaces in Beijing in summer[J]. Chinese Journal of Ecology,2008,27(11):1972-1978. (in Chinese)

[9] 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[J]. 中国园林,2004(3):38-40.
DA L J,YANG Y C,CHEN M. The method of ecological greening and its application in the construction of the approaching nature plant community in Shanghai[J]. Chinese Landscape Architecture,2004(3):38-40. (in Chinese)

[3] 夏继红,严忠民,蒋传丰. 河岸带生态系统综合评价指标体系研究[J]. 水科学进展,2005,16(8):345-348.

[4] 关春曼,张桂荣,程大鹏,等. 中小河流生态护岸技术发展趋势与热点问题[J]. 水利水运工程学报,2014(4):75-81.

[5] 刘梅,于波. 人体舒适度研究现状及其开发应用前景[J]. 气象科技,2002,30(2):11-14,18.

[6] 蓝振江. 九寨沟陆生植物群落的生物量和生产力研究[D]. 成都:四川大学,2004.

[7] 杨同辉. 浙江天童国家森林公园常绿阔叶林生物量研究[D]. 上海:华东师范大学,2005.

[8] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报,2007,18(4):895-904.
XIONG Y M,XIA H P,LI Z A,*et al.* Effects and mechanisms of plant roots on slope reinforcement and soil erosion resistance [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 895-904. (in Chinese)

[9] 查轩,唐克丽,张科利,等. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响研究[J]. 水土保持学报,1992,6(2):52-58.
CHA X,TANG K L,ZHANG K L,*et al.* The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation,1992,6(2):52-58. (in Chinese)

[10] 吴彦,刘世全,付秀琴,等. 植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.

[11] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):93-96.

[12] REUBENS B,POESEN J,DANJON F,*et al.* The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review trees structure and function[J]. Trees,2007(21):385-402.

[13] ZUAZO V H D,PLEGUEZUELO C R R. Soil erosion and runoff prevention by plant covers:a review[J]. Agronomy for Sustainable Development,2008,28:65-86.

[14] 杜钦,杨淑慧,任文玲,等. 植物根系固岸抗蚀作用研究进展[J]. 生态学杂志 2010,29(5):1014-1020.

[15] 吕晶. 京郊河溪生态护岸水土保持效应及其健康评价[D]. 北京:北京林业大学,2009.

[16] 刘瑛,王芳,高甲荣. 晋西黄土高原虎榛子根系分布特征[J]. 西北林学院学报,2009,24(1):31-34.
LIU Y,WANG F,GAO J R. Root distribution chareacters of *Osryopisis dacidiana* on different sites in the Loess Plateau of western Shanxi[J]. Journal of Northeast Forestry University,2009,24 (1):31-34. (in Chinese)

(上接第 297 页)

[10] NEVINS R. Effect of change in ambient temperature and level of humidity on comfort and thermal sensation [J]. Ashrae Transactions. 1975,81(1):64-77.

[11] 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[J]. 生态学报,2007,27(7):2964-2970.
WU F,LI S H,LIU J M. The effects of greening none-greening square and lawn on temperature, humidity and human comfort[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(7): 2964-2970. (in Chinese)

[12] 吴兑,邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报[J]. 气象,2000,26(8):3-5.
WU D,DENG X J. Environmental meteorology and special meteorological forecasts[J]. Meteorological Monthly,2000,26(8):3-5. (in Chinese)

[13] 周立晨,施文戔,薛文杰,等. 上海园林绿地植被结构与温、湿度关系浅析[J]. 生态学杂志,2005,24(9):1102-1105.
ZHOU L C,SHI W Y,XUE W J,*et al.* Relationship between vegetation structure and the temperature and relative humidity in urban green spaces of Shanghai[J]. Chinese Journal of Ecology,2005,24(9):1102-1105. (in Chinese)

[14] CHANG C R,LI M H,CHANG S D. A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei City parks[J]. Landscape and Urban Planning,2007,80:386-395.

[15] 纪鹏,朱春阳,李树华. 河流廊道绿带结构的温湿效应[J]. 林业科学,2012,48(3):58-65.
JI P,ZHU C Y,LI S H. Effects of the different structures of green belts on the temperature and humidity in river corridors [J]. Scientia Silvae Sinicae,2012,48(3):58-65. (in Chinese)

[16] 吴菲,朱春阳,李树华. 北京市 6 种下垫面不同季节温湿度变化特征[J]. 西北林学院学报,2013,28(1):207-213.
WU F,ZHU C Y,LI S H. Seasonal changes of temperature and humidity of six urban underlying surfaces in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(1):207-213. (in Chinese)