宁夏大学校园不同绿地类型夏季小气候效应*

马 圆 朱 荣 杨 荣 刘佳嘉

宁夏大学林业与草业学院 银川 750021

摘要：以宁夏大学校园内绿地作为研究对象，利用小尺度定量测定的方法，对乔灌草、乔草、草地 3 种绿地类型以及无植被覆盖的对照样地 CK（温度、湿度、太阳辐射、空气负离子和 $PM_{2.5}$）进行测量，研究其对校园小气候的调节作用，并构建出具有较强生态效益的植物配置模式。结果表明：与对照（广场）相比，不同植物配置模式均对校园小气候具有降温增湿、调节太阳辐射、增加空气负离子浓度以及消减 $PM_{2.5}$ 等作用，其中以乔灌草样地对微环境温度调节作用最好，乔草样地次之，最后为草地；各样地增湿强弱和削弱太阳辐射与降温效应较为相似；乔灌草和乔草配置模式消减 $PM_{2.5}$ 效果最佳，而草地对 $PM_{2.5}$ 的消减效果不明显。综合上可知，不同植物配置模式调节夏季小气候的效果从强到弱依次为：乔灌草>乔草>草地>CK。

关键词：植物配置模式；降温增湿；太阳辐射；小气候

DOI：10.12169/zgcsly.2022.09.24.0002

Microclimate Effect of Green Spaces of Different Types in Ningxia University Campus in Summer

Ma Yuan Zhu Rong Yang Rong Liu Jiajia

(College of Forestry and Grassland, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: This paper takes the green spaces on the campus of Ningxia University to measure temperature, humidity, solar radiation, air negative oxygen ions and $PM_{2.5}$ at the three types of green space including arbor-shrub-grass green spaces, arbor-grass green spaces and lawn as well as the control plot using the method of small-scale quantitative measurement in order to analyze their adjustment functions for campus microclimate and come up with the plant configuration patterns of better ecological benefits. The results show that compared with the control plot (the square), all plant configuration patterns have effects on the campus microclimate, including cooling and humidification, regulation of solar radiation, increase in air negative ion concentration, and $PM_{2.5}$ reduction. Among them, the arbor-shrub-grass green spaces have the best temperature regulation effect on the microenvironment, followed by the arbor-grass green spaces and lawns. The three types of green spaces all have the similar effects in humidification, solar radiation reduction and cooling. The configuration patterns of arbor-shrub-grass and arbor-grass have the best effect on reducing $PM_{2.5}$, while the lawns have no significant effect on $PM_{2.5}$ reduction. It is concluded that the effects of the three plant configuration patterns on regulating summer microclimate are ranked as arbor-shrub-grass > arbor-grass> lawn > CK.

Keywords: vegetation configuration pattern; cooling and humidification; solar radiation; microclimate

收稿日期：2022-09-24

* 基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划“宁夏沿黄城市带城市林业系统主要生态功能研究与示范”（2019BFG02024）

第一作者：马圆（2000- ），女，硕士生，研究方向为森林培育。Email：1985069472@qq.com

通信作者：刘佳嘉（1990- ），女，博士，副教授。研究方向为森林培育。Email：liujiajia@nxu.edu.cn

城市绿地是城市生态系统重要组成部分[1-2]。校园也属于城市绿地，是学生的第一个家园，校园小气候对学生的生活有很大的影响。同时，校园绿地还可以起到降温、增湿、遮荫、防风、除尘以及减轻城市热岛效应等作用，这也受到了学术界的广泛关注[3]。小气候指的是在近地面几米处的气层内、土壤表层和植被层内的气候，即因为下垫面的特性，以及人类和生物的活动而造成的一种比较小范围内的特殊气候。在构建微气候的过程中，最重要的因素就是植物配置，通过对植物进行合理的配置，能够对微气候进行改善，从而减轻因强风、强光照、高温高湿所带来的不适[4]。

不同植物配置模式对微环境小气候调节主要表现在降温增湿、削弱光照强度以及消减大气颗粒物等方面。植物可以利用自己的繁枝绿叶，为绿地构建出一个遮盖空间，吸收并反射太阳辐射，同时还可以利用呼吸、蒸腾等作用，提高小气候中的相对湿度，并利用蒸散作用，使空气温度下降，从而对城市小气候产生明显的调节和改善作用[5-9]。当前，国内外关于城市下垫面气候效应的研究主要集中在温度指数的测量上，而针对校园不同类型下垫面的研究较少。因此，本文通过测定宁夏大学中卫校区夏季不同样地内及其对照区的小气候特征，研究不同植物配置模式对降温增湿和调节太阳辐射等方面的作用，比较不同植物配置模式对样地内及其对照区内小气候的调节功能，构建中卫校区具有较强生态效益的植物优化配置模式，为师生提供一个舒适、休闲活动空间，以期为校园绿地的后期规划提供理论参考。

1　研究方法

1.1　样地选择

试验样地位于宁夏大学中卫校区（104°17′E，36°09′N），海拔 1 225 m。通过实地踏查和群落现状分析，选择校园内 3 种不同植物配置模式的绿地作为试验样地，硬质铺装的广场作为对照样地（表 1）。

在样地内设置 400 m^2 的样方，每个样方选取 3 个点调查植被群落的类型、树种组成、空间结构，测定乔木和灌木的高度、冠幅和郁闭度。乔木层是指具有显著主干的木本植物层，其高度在 3 m 以上，分叉点在 1.2 m 以上；灌木层没有显著主干或者有许多主干，高度在 3 m 以下，分叉点在 1.2 m 以下；草地指茎叶柔软、植株矮小的草本植物层，高度在 0~90 cm [10]。

表 1　宁夏大学中卫校区不同植物配置模式样地的基本特征

样地	样地位置	绿地结构	植被类型	植物组成	郁闭度	样地特点
A1	广场东南侧	乔灌草	常绿乔木与落叶阔叶乔木混交	白蜡 *Fraxinus chinensis*；河北杨 *Populus* × *hopeiensis*；金叶榆 *Ulmus pumila*；碧桃 *Prunus persica*；油松 *Pinus tabuliformis*	0.76	边缘高大乔木合理密植，半封闭式，受人为影响较小
A2	广场东侧	乔草	针阔混交	国槐 *Sophora japonica*；刺柏 *Juniperus formosana*；河北杨 *Populus* × *hopeiensis*	0.64	针阔混交，靠近主路，地形平坦，以乔木为主
A3	草地	草地	草地	早熟禾 *Poa annua*	100%（盖度）	地形平坦，草地铺满，仅绿地边缘有数棵白蜡
CK	广场	铺装	硬质铺装	无植被覆盖	0	学生活动场地

1.2　数据监测

利用小尺度定量测定方法，采用乐控甲醛检测仪测定 $PM_{2.5}$；利用台湾泰仕公司的高精密太阳辐射计（TES-1333R）测量太阳光强度；利用手持气候观测站的凯斯特雷尔（NK5500）进行温、湿观测；利用 KEC900+II 型空气负离子检测仪对大气负氧离子及其他微气候要素进行测量。各小气候因子进行同步测定，记录不同样地同一时间下距离地面 1.5 m 处温度、湿度以及太阳辐射等气象因子指标，测定时间分别为 2020 年 6 月 15 日、7 月 18 日、8 月 15 日 8：00—18：00，每次测量时间间隔 2 h，每个样方重复 3 次。

1.3　数据处理

数据处理采用 Excel、Origin、SPSS 软件分别进行数据统计、单因素方差分析、并应用 LSD 方法检测不同样地对小气候调控效果的显著性以及采用主成分分析法对绿地小气候进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同植物配置模式对夏季空气温度的影响

2.1.1 不同植物配置模式下夏季空气温度的变化趋势

由图 1 可知，2020 年 6—8 月，各样地的温度日变化规律基本一致，均呈先上升后下降的趋势，其中 8：00—14：00 呈急速上升的趋势，14：00—18：00 趋于平缓。6、8 月份在 12：00 达到峰值；7 月份在 14：00 达到峰值。6—8 月份最低温度皆出现在乔灌草样地内，说明乔灌草配置模式降温效果最好。与其他样地相比，CK 温度始终较高，这是因为 CK 为空白样地，四周没有植物覆盖，进一步说明其他样地对温度均有降低作用。

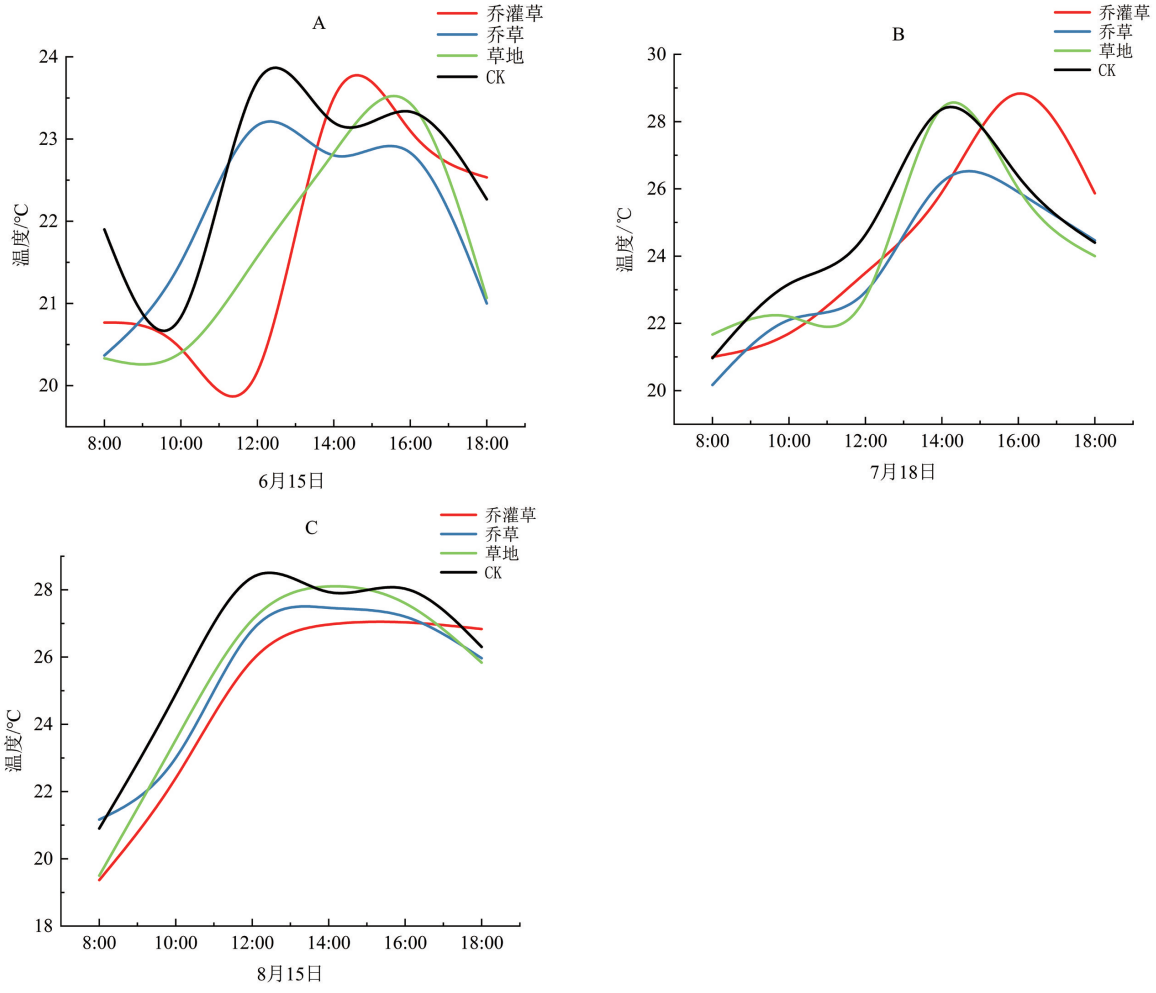


图 1 各样地夏季温度日变化趋势

2.1.2 不同植物配置模式对夏季空气温度的影响差异

对 6—8 月所有样地温度进行显著性分析（表 2）发现，6 月份 8：00 各样地分别与 CK 温度具有显著差异（$P<0.05$），但各样地之间却未表现出差异性。7 月份除 8：00、14：00 以外，其他时间段各样地相对于乔灌草样地均具有显著差异（$P<0.05$）。8 月份 10：00、12：00、18：00 各样地均与乔灌草样地具有显著差异性（$P<0.05$）。

2.2 不同植物配置模式对夏季空气湿度的影响

2.2.1 不同植物配置模式下夏季空气湿度的变化趋势

由图 2 可知，2020 年 6—8 月，各样地的湿度日变化规律基本一致，均呈先下降后上升的趋势，其中 8：00—16：00 呈快速下降的趋势，在 16：00 到达低谷后开始逐渐上升，且 8：00 为各月湿度最大值。与 CK 相比，各样地内乔灌草配置模式湿度值相对较高，这说明乔灌草配置模式的增湿效果相对较强。

表 2　各样地温度 LSD 多重差异比较（2020 年 6—8 月）

时间	样地	8：00	10：00	12：00	14：00	16：00	18：00
6 月 15 日	乔灌草	20. 7±0. 26b	20. 4±0. 05b	20. 1±0. 12b	22. 7±0. 58a	23. 1±0. 18ab	22. 5±0. 20a
	乔草	20. 4±0. 16b	21. 5±0. 49a	23. 1±1. 12a	21. 9±0. 35a	22. 8±0. 24b	21. 0±0. 20a
	草地	20. 3±0. 30b	20. 4±0. 14b	21. 6±0. 28ab	22. 8±0. 09a	23. 4±0. 16a	21. 1±0. 12a
	CK	21. 9±0. 45a	20. 0±0. 26ab	23. 7±1. 98a	22. 2±0. 35a	23. 3±0. 23ab	22. 3±0. 12a
7 月 18 日	乔灌草	20. 9±0. 28b	21. 6±0. 74b	23. 5±0. 32b	25. 9±0. 42b	28. 8±0. 57a	25. 8±0. 16a
	乔草	20. 2±0. 41c	22. 1±0. 37ab	22. 9±0. 30bc	26. 2±0. 40b	25. 9±0. 08b	24. 4±0. 16b
	草地	21. 6±0. 20a	22. 2±0. 28ab	22. 7±0. 16c	28. 4±0. 90a	26. 0±0. 14b	24. 0±0. 08c
	CK	20. 9±0. 20b	23. 1±0. 47a	24. 6±0. 30a	28. 3±0. 97a	26. 3±0. 12b	24. 4±0. 16b
8 月 15 日	乔灌草	19. 3±0. 81b	22. 4±0. 29c	25. 9±0. 28bc	27. 9±1. 48a	28. 0±0. 44a	26. 8±0. 54a
	乔草	21. 1±0. 04a	23. 0±0. 08bc	25. 0±0. 63c	27. 4±0. 09a	27. 2±0. 37a	25. 9±0. 24b
	草地	19. 5±0. 29b	23. 5±0. 28b	26. 8±0. 28b	27. 1±0. 49a	27. 6±0. 50a	25. 8±0. 04b
	CK	20. 9±0. 29a	24. 9±0. 64a	28. 3±0. 77a	27. 9±0. 66a	28. 0±0. 75a	26. 3±0. 24ab

注：同一月中，同一列不同字母表示不同样地在 0. 05 水平差异显著，下同。

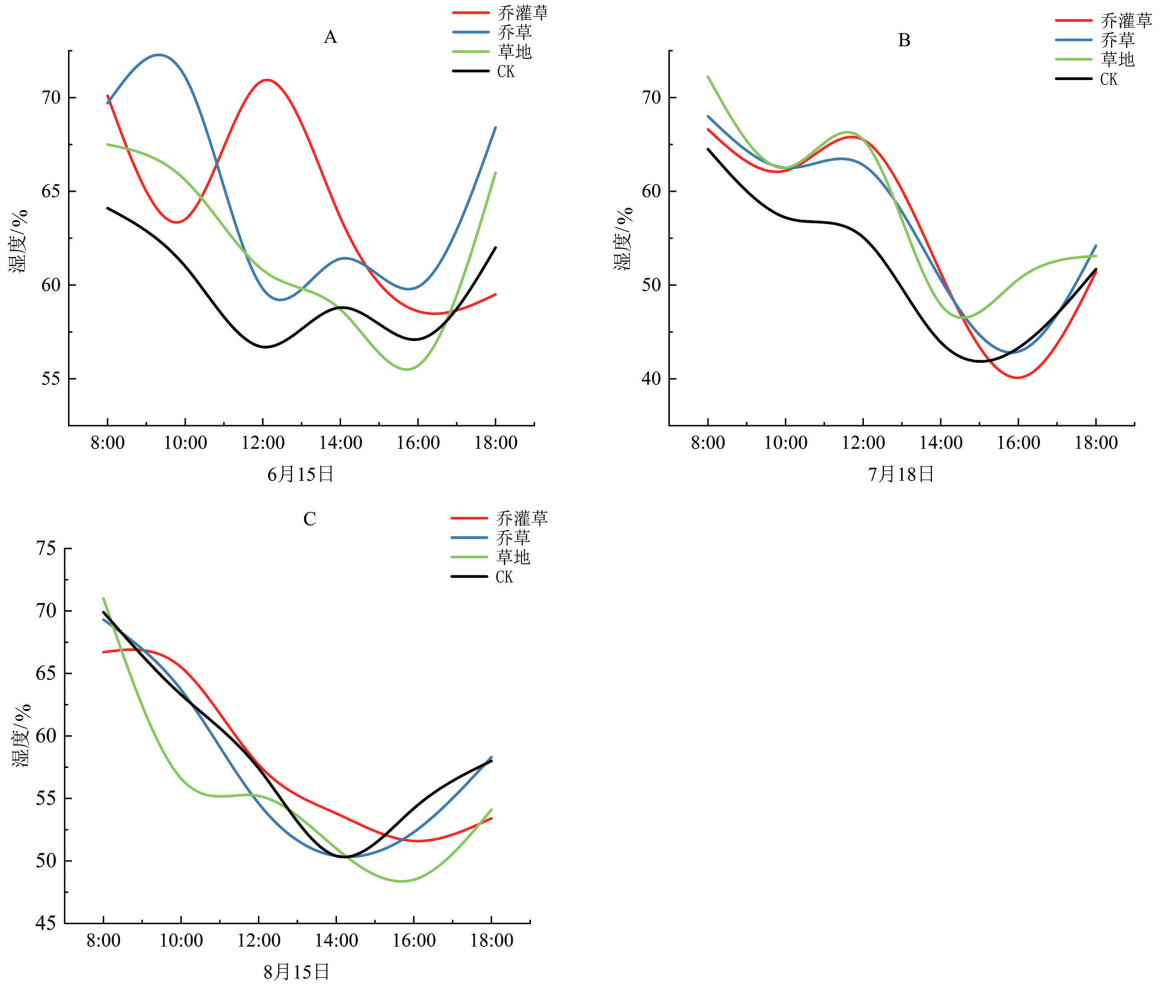


图 2　各样地夏季湿度日变化趋势

2. 2. 2　不同植物配置模式对夏季空气湿度的影响差异

由表 3 可知：6 月份 8：00、10：00 和18：00 各样地湿度之间均有显著差异（P<0. 05）；相对于乔灌草样地，12：00 时，其他样地在这一时刻达到显著水平（P<0. 05）。7 月份 12：00 各样地之间具有显著差异（P<0. 05），其他时间段各样地分别与 CK 表现出显著差异（P<0. 05）。8 月份 10：00、16：00 各样地分别与草地样地表现出显著差异（P<0. 05），其他时间段各样地无差异。

表 3 各样地湿度 LSD 多重差异比较（2020 年 6—8 月）

时间	样地	8：00	10：00	12：00	14：00	16：00	18：00
6 月 15 日	乔灌草	70. 1±0. 59a	63. 5±1. 3bc	70. 9±1. 04a	63. 6±2. 01a	58. 6±0. 6ab	59. 5±0. 80a
	乔草	69. 7±1. 5ab	71. 1±2. 30a	59. 8±2. 26b	61. 4±0. 69a	59. 9±1. 76b	68. 4±0. 66d
	草地	67. 5±0. 85b	65. 6±0. 66b	60. 8±0. 58b	58. 7±0. 57b	55. 7±1. 14a	66. 0±0. 73c
	CK	64. 1±0. 77c	61. 0±0. 90c	56. 7±0. 53c	58. 8±0. 19b	57. 1±1. 8ab	62. 0±0. 22b
7 月 18 日	乔灌草	66. 6±2. 0b	62. 2±0. 41a	65. 5±0. 45d	51. 3±0. 94a	40. 1±0. 75a	51. 4±1. 0a
	乔草	68. 0±0. 79ab	62. 5±0. 37a	62. 8±0. 22c	50. 6±2. 65a	42. 9±0. 70b	54. 2±0. 81b
	草地	72. 2±3. 28a	62. 5±0. 49a	57. 9±0. 62b	47. 9±0. 75a	50. 6±1. 86c	53. 1±0. 8ab
	CK	64. 5±0. 95b	57. 2±1. 39b	55. 1±0. 76a	43. 9±0. 65b	43. 3±0. 60b	51. 7±0. 29a
8 月 15 日	乔灌草	66. 7±1. 8a	65. 5±0. 58a	57. 7±2. 75a	53. 8±1. 14a	51. 6±0. 33a	53. 4±1. 31b
	乔草	69. 3±1. 76a	63. 7±1. 53a	54. 6±1. 47a	50. 4±1. 19a	52. 3±0. 98a	58. 3±1. 10a
	草地	71. 0±0. 96a	56. 6±1. 01b	55. 2±1. 76a	51. 0±0. 57a	48. 5±0. 42b	54. 1±0. 33b
	CK	69. 9±1. 79a	63. 3±0. 04a	57. 4±0. 24a	50. 3±0. 26a	54. 2±1. 23a	58. 0±0. 66a

2.3 不同植物配置模式对夏季太阳辐射的影响

2.3.1 不同植物配置模式下夏季太阳辐射的变化趋势

由图 3 可知，2020 年 6—8 月，样地内各月的太阳辐射（平均光照强度）变化有所波动，但整体变化规律基本呈现先上升后下降的趋势。在 12：00—14：00 达到最大值后开始逐渐下降，CK 样地与其他不同植被配置模式绿地相比，太阳辐射强度始终处于最大，说明其他样地对太阳辐射强度均有减弱的作用。其中乔灌草模式的太阳辐射值相对其他样地较低，说明乔灌草模式对太阳辐射的减弱能力最强。

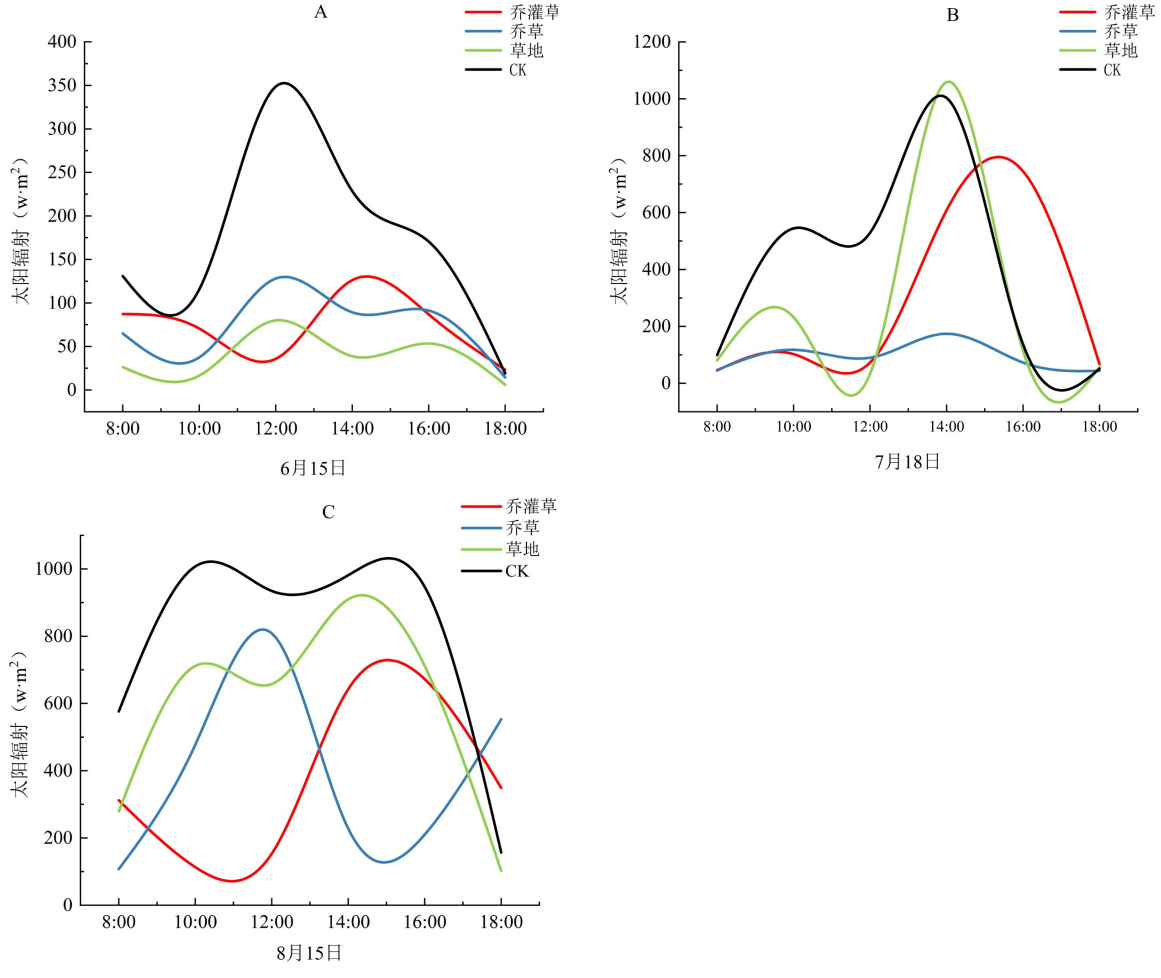


图 3 各样地夏季太阳辐射日变化趋势

2.3.2　不同植物配置模式对夏季太阳辐射的影响差异

根据表 4 可知：6 月份 10：00、14：00、18：00 各样地之间太阳辐射差异显著（$P<0.05$）；12：00 各样地均与 CK 表现出显著差异（$P<0.05$）。7 月份 18：00 各样地之间太阳辐射无显著差异（$P>0.05$）；16：00 乔灌草样地分别与其他样地呈显著差异（$P<0.05$）。8 月份 10：00 各样地之间太阳辐射达到极显著差异（$P<0.01$）；12：00 各样地均与 CK 表现出显著差异（$P<0.05$）。

表 4　各样地太阳辐射 LSD 多重显著差异比较（2020 年 6—8 月）

时间	样地	8：00	10：00	12：00	14：00	16：00	18：00
6 月 15 日	乔灌草	87.2±12.77b	70.6±3.96c	35.8±1.08a	126.2±1.47c	86.8±13.49b	23.2±3.79c
	乔草	64.9±17.17b	37.4±3.62b	128.0±93.52a	89.3±13.52b	91.3±16.30b	14.5±1.76a
	草地	26.3±2.96c	16.5±0.69a	80.0±1.13a	38.8±1.60a	53.5±4.62a	6.1±0.34b
	CK	130.8±8.64a	115.4±2.33d	348.7±14.95b	228.7±12.80d	170.6±5.69c	19.0±0.78bc
7 月 18 日	乔灌草	45.2±13.23a	102.2±18.95a	72.8±10.54a	608.1±51.50b	745.1±381.06b	67.1±11.63a
	乔草	46.8±9.12a	117.9±14.91a	89.9±19.27a	174.1±28.01a	72.9±12.50a	43.8±15.16a
	草地	80.2±2.29b	232.1±12.74b	33.0±0.57a	1 058.8±108.22c	113.9±5.34a	56.6±2.05a
	CK	99.4±0.70c	544.4±37.32c	529.2±87.26b	1 003.1±25.41c	136.5±4.29a	51.7±6.04a
8 月 15 日	乔灌草	311.0±304.16a	113.2±3.36a	153.0±22.8a	642.0±358ab	672.0±377.5ab	348.0±358.0a
	乔草	107.5±41.73a	477.0±373.0ab	808.0±301.0a	227.0±55.66a	210.2±28.52a	553.0±326.0a
	草地	278.8±281.4a	711.0±6.32bc	657.0±100.0a	909.0±32.98b	711.0±151.06b	102.0±41.1a
	CK	576.6±135.4a	1 007.0±6.02c	934.0±10.0b	981.0±24.7b	947.0±2.42a	156.0±102.0a

2.4　不同植物配置模式对夏季空气负离子浓度的影响

2.4.1　不同植物配置模式下夏季空气负离子浓度的变化趋势

由图 4 可知，2020 年 6—8 月，样地内日空气负离子浓度变化规律一致，均呈先上升再下降的趋势，其中 6 月份在 8：00 达到最大值，7 月份在 12：00 达到最大值，8 月份在 10：00 达到最大值。相对于 CK 来说，其他各配置模式均有一定的增加负氧离子浓度的作用。乔灌草模式的空气负离子浓度相对于其他配置模式较高，说明乔灌草配置模式对增加负氧离子浓度的效果最好。

2.4.2　不同植物配置模式对夏季空气负离子浓度的影响差异

通过表 5 可知，6 月份 8：00、12：00、14：00 以及 18：00 各样地空气负离子差异显著（$P<0.05$）；8：00、12：00 各样地均与乔灌草样地呈显著差异（$P<0.05$）；14：00 各样地分别与 CK 之间达到显著差异（$P<0.05$）。7 月份 8：00、10：00、18：00 各样地空气负离子无显著差异（$P>0.05$）；14：00 乔灌草分别与各样地表现出显著差异（$P<0.05$）。8 月份 14：00、18：00 各样地之间空气负离子无显著差异（$P>0.05$）；8：00、12：00 各样地分别与 CK 空气负离子达到显著差异（$P<0.05$）。

表 5　各样地空气负离子浓度 LSD 多重显著差异比较（2020 年 6—8 月）

时间	样地	8：00	10：00	12：00	14：00	16：00	18：00
6 月 15 日	乔灌草	695.0±127.4b	483.0±117.0a	563.0±208.0b	89.0±2.1a	103.0±6.6a	87.6±2.1a
	乔草	595.3±52.7ab	514.0±110.0a	146.0±40.9a	98.0±10.1a	89.6±5.4a	89.6±4.5a
	草地	380.6±142.5a	458.0±72.2a	267.0±69.1a	137.0±40.0b	108.0±22.2a	246.0±21.3b
	CK	507.0±48.3ab	432.0±109.0a	249.0±69.1a	190.0±54.0ab	149.0±71.1a	229.0±69.6b
7 月 18 日	乔灌草	1 275.0±258.0a	1 429.0±280.0a	1 379.0±211.0a	984.0±127.0b	1 518.0±13.0b	479.0±251.0a
	乔草	1 340.0±224.0a	1 473.0±162.0a	1 189.0±318.0a	517.0±187.4a	761.0±408.1a	322.0±189.0a
	草地	1 461.0±265.0a	1 267.0±378.0a	1 877.0±42.0b	165.0±67.7a	968.0±234.0ab	450.0±163.0a
	CK	1 224.0±553.0a	1 359.0±48.0a	1 915.0±157.0b	385.0±224.2a	1 028.0±78.0ab	542.0±48.9a
8 月 15 日	乔灌草	1 003.0±14.9b	1 093.0±110.0b	763.0±135.0b	91.0±5.25a	569.0±60.5a	408.0±131.0a
	乔草	1 026.0±154.5b	1 013.0±77.0ab	492.0±33.0ab	93.0±8.18a	461.0±85.7a	346.0±59.2a
	草地	749.3±206.0ab	854.0±71.1a	532.0±179.0ab	91.0±5.91a	467.0±148.0a	291.0±74.9a
	CK	749.3±74.2a	900.0±113.0ab	394.0±72.3a	83.0±2.94a	612.0±35.2a	366.0±102.0a

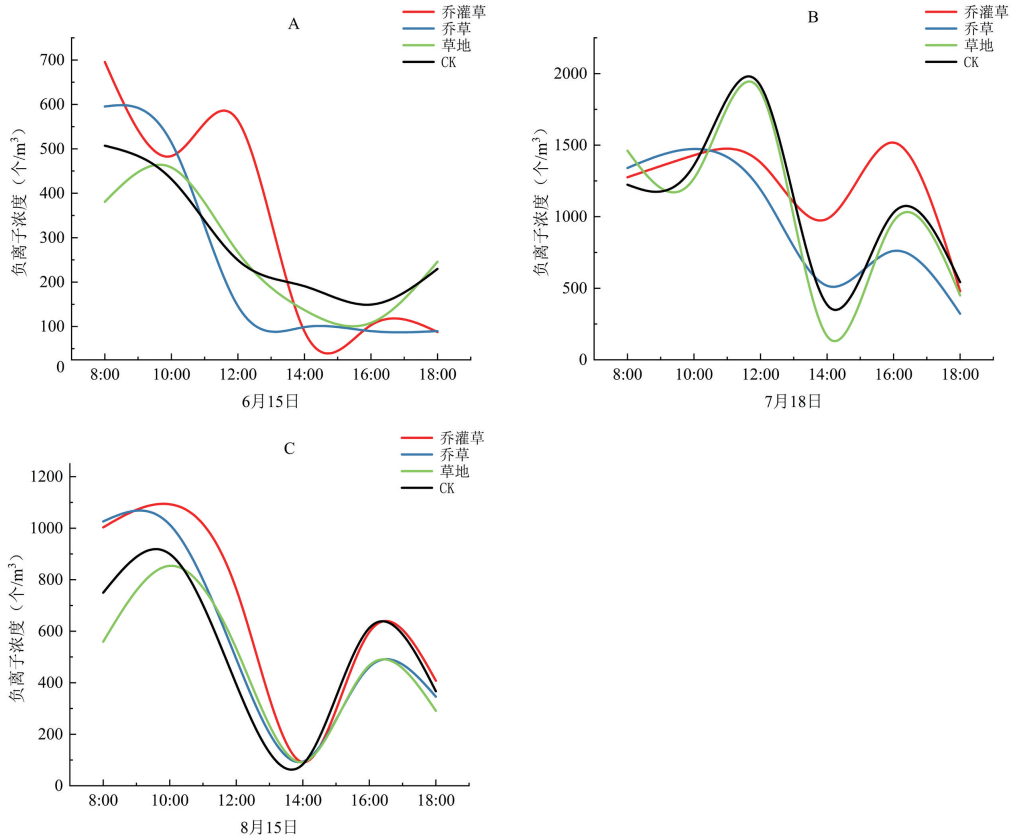


图 4 各样地夏季负离子日变化趋势

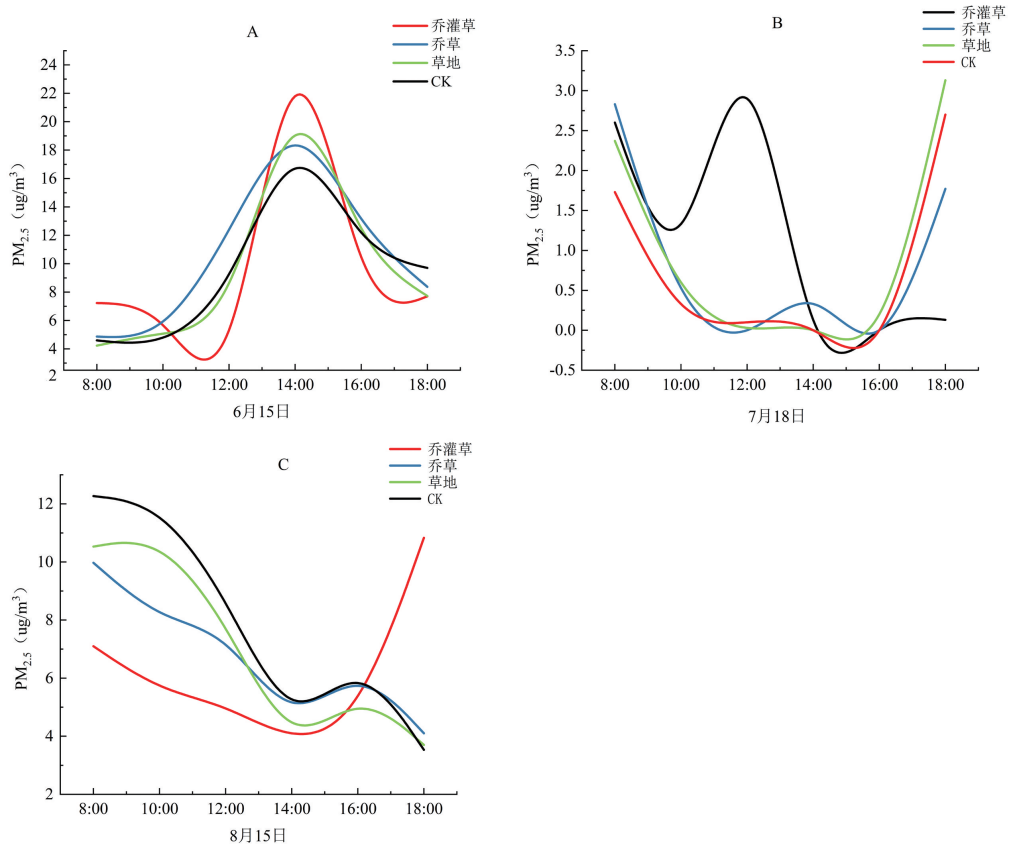


图 5 各样地夏季 $PM_{2.5}$ 日变化趋势

2.5　不同植物配置模式对夏季空气 $PM_{2.5}$ 的影响

2.5.1　不同植物配置模式下夏季空气 $PM_{2.5}$ 的变化趋势

由图 5 可知，2020 年 6—8 月，样地内日 $PM_{2.5}$ 变化无明显规律，其中乔灌草配置模式的 $PM_{2.5}$ 相对于其他样地来说较低，说明乔灌草配置模式对降低空气 $PM_{2.5}$ 的效果最好。

2.5.2　不同植物配置模式对夏季空气 $PM_{2.5}$ 的影响差异

通过表 6 可知，6 月份 8：00—16：00 各样地均与乔灌草样地和 CK 达到显著差异（$P<0.05$）。7 月份 10：00—16：00 各样地之间 $PM_{2.5}$ 未达到显著水平；18：00 各样地之间 $PM_{2.5}$ 达到极显著水平（$P<0.01$）。8 月份 8：00、10：00、12：00 以及 16：00 乔灌草样地分别与各样地之间达显著差异（$P<0.05$），而 14：00、18：00 各样地之间 $PM_{2.5}$ 无显著差异（$P>0.05$）。

表 6　各样地 $PM_{2.5}$ LSD 多重显著差异比较（2020 年 6—8 月）

时间	样地	8：00	10：00	12：00	14：00	16：00	18：00
6 月 15 日	乔灌草	7.23±1.11b	5.67±0.05b	5.33±0.26a	21.80±0.65c	10.47±1.13a	7.10±0.45a
	乔草	4.87±0.50a	5.93±0.31b	12.40±1.07c	18.33±0.70b	13.17±0.68b	8.40±0.3ab
	草地	4.23±0.53a	5.07±0.34a	8.63±1.99b	19.03±0.62b	12.50±0.57ab	7.50±1.09a
	CK	4.60±0.37a	4.80±0.22a	9.00±1.47bc	16.70±0.57a	12.20±0.83ab	9.60±0.36b
7 月 18 日	乔灌草	2.60±0.33b	1.33±0.62a	2.90±2.52a	0.13±0.12a	0.00±0.00a	0.13±0.19a
	乔草	2.83±0.45b	0.53±0.42a	0.00±0.00a	0.33±0.47a	0.00±0.00a	1.77±0.17b
	草地	2.30±0.25ab	0.60±0.22a	0.03±0.05a	0.00±0.00a	0.20±0.28a	7.73±1.09c
	CK	1.73±0.21a	0.33±0.26a	0.10±0.14a	0.00±0.00a	0.00±0.00a	2.70±0.75bc
8 月 15 日	乔灌草	7.10±0.22a	5.57±0.52a	5.00±0.28a	3.77±0.59a	4.43±0.53a	10.00±9.7a
	乔草	9.97±2.00b	8.00±0.51b	7.00±0.37b	4.20±0.43a	6.53±1.31b	4.00±0.08a
	草地	10.50±0.21b	10.90±0.51c	8.00±0.14b	3.30±0.22a	5.67±0.41ab	3.00±0.22a
	CK	12.20±0.86b	12.00±0.45c	8.00±0.97b	3.97±0.76a	6.87±0.17b	3.00±0.21a

2.6　不同植物配置模式对夏季小气候影响综合评价

根据主成分分析结果（表 7）：第 1 主成分特征值为 2.384，方差解释率为 47.684%；第 2 主成分方差解释率为 30.374%，累积方差解释率为 78.057%。

表 7　各成分特征向量、特征值和方差解释率

指标	主成分 1	主成分 2
温度	0.617	0.036
湿度	0.580	0.021
太阳辐射	0.483	0.022
空气负离子	0.120	0.720
PM2.5	−0.190	0.693
特征值	2.384	1.519
方差解释率%	47.684	30.374
累积解释率%	47.684	78.057

将 2 个主成分所对应的方差解释率作为权重，计算得出不同植物配置模式的综合得分，分值越高，代表调节夏季小气候的效果越好。由表 8 可知，对照样地 CK 及 3 种不同植物配置模式调节夏季小气候的综合评价结果从高到低依次为：乔灌草>乔草>草地>CK。

表 8　不同植物配置模式对小气候影响的综合评价

配置模式	F1	F2	综合得分	综合排名
乔灌草	0.95	0.88	0.72	1
乔草	0.97	0.77	0.70	2
草地	0.85	0.72	0.62	3
CK	0.81	0.70	0.59	4

3　讨论与结论

3.1　讨论

夏季阳光充足时，以硬质铺装下垫面为主的 CK 作为对照样地，其他各类型样地对微环境的小气候效应都有一定的调节效果。与 CK 相比，采用不同植物配置方式的其他 3 种校园绿地均具有较好的降温效果。其中，在 12：00 时乔灌草配置模式对微环境温度的调节作用最明显，乔草次之，最后为草地，这与宋明辉[11]的研究结果一致，出现这一顺序的原因是乔灌草配置模式的植物种类

以乔木为主，而阔叶乔木类植物在炎热的夏季多形成浓荫效果，起到遮阳降温的作用。除此之外，植物自身的光合、蒸腾作用等生命活动也对环境中的温度起着调节作用。由于草地无枝无叶，空间开阔，对光照和热量的吸收较多，且与周围环境的热量交换较快，因此草地对温度的调节作用相比其他几种植物配置模式较差。将不同植物配置模式内部环境的相对湿度数据与无植被覆盖的广场样地作比较，可以发现各植物配置模式增湿效应的强弱与其降温效应较为相似，增湿效果最佳的依然是乔灌草，造成这一现象的原因是植物自身的蒸腾作用，能够在一定程度上提高环境内部的水汽含量。与此同时，茂盛的枝叶的遮挡，能够降低绿地环境内部水汽的蒸发，还能使环境内部的温度低于外界的空气温度，从而能够更好地提高环境内部的相对湿度，这与徐云蕾等[12]的研究结果一致。温度和湿度是人体对外部环境舒适程度的一项主要评价指标。不同的植物配置模式，可以通过改变太阳辐射的平衡，从而对温度和湿度产生影响。在具有较大的植被覆盖率、物种种类较多的地区，其小气候比较稳定[13]。通过对样地白天各时段的太阳辐射数据进行实地测量发现，与 CK 相比较，在 12∶00 时，乔灌草内部微环境对太阳辐射的减弱效果最为明显，这主要表现在植被的不同构造对阳光的吸收和反射，特别是在炎热的夏季，阳光相对强烈时，乔灌草能够显著降低绿地内的光照强度，这与曾小平等[14]的研究结果一致。

空气负离子是大气中带负电荷的单个气体分子和氢离子团的统称[15]。它可以用于评估空气质量和环境舒适度，并有广泛的生理生化效应和功能[16-17]。本文中，乔灌草内部微环境对空气负离子的增加作用最明显，这主要是由于乔灌草复层结构单位面积上的绿量较高，光合作用强，各种树木的树冠、枝叶的尖端放电、光合作用过程的光电效应促使空气电解，产生大量的空气负离子[18]，而 CK 缺少植被覆盖，扬尘可能会削弱空气负离子浓度。

对大气 $PM_{2.5}$ 的消减作用，总体表现出乔灌草、乔草配置模式优于草地和 CK。7 月乔灌草配置模式 $PM_{2.5}$ 含量较高，乔草 $PM_{2.5}$ 含量较低，这与张新献等[19]的乔灌草样地内空气颗粒物浓度最低的研究结果不一致。这原因可能与乔灌草植物密度较高，枝下高偏低，灌木数量多而使林内阴湿、通风条件不好，不利于颗粒物的输送与扩散有关，且外界又不断有颗粒物输入，导致颗粒物浓度居高不下。但是而群落骨干树种突出的 1~2 层的乔草结构，乔木枝下高较高，乔木规格较大，对 $PM_{2.5}$ 的消减较为明显[20-21]。

相关研究表明，绿地下垫面对环境小气候的调节受很多因素的影响，如郁闭度对绿地的降温增湿功能有显著影响，绿地的自然环境、绿地形状、绿地面积、种植形式及结构布局等都会影响到绿地的温湿效应[22-26]。一般来说，一个影响因素只有在特定的临界点才会表现出一些明显的效果。所以本研究的结果可能受到绿地周围自然环境以及其他人为因素的影响。

3.2 结论

在夏季，除对照样地（广场）之外，其他样地（乔灌草样地、乔草样地、草地样地）均表现出一定程度的降温增湿效应，其中以乔灌草为主的配置模式降温增湿效果最佳，乔草为主的配置模式次之。

削弱太阳辐射的作用中，乔灌草配置模式表现最好，其次为乔草配置模式。

在 3 种不同植物配置模式中，乔灌草配置模式和乔草配置模式消减 $PM_{2.5}$ 效果最佳，而草地和 CK 对 $PM_{2.5}$ 的消减效果不明显。

乔灌草配置模式在校园绿地调节小气候中降温增湿、减弱光照强度、增加空气负离子浓度以及消减 $PM_{2.5}$ 效果最强。因此，在校园绿化建设中应该推荐高大乔木、林下灌木和草本植物 3 者在垂直结构上进行合理配置。

参考文献

[1] MEMON R A, LEUNG D Y C, CHUNHO L. A review on the generation, determination and mitigation of urban heat island[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(1): 120-128.

[2] YU Z W, XU S B, ZHANG Y H, et al. Strong contributions of local background climate to the cooling effect of urban green vegetation[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6798.

[3] 朱春阳，李树华，纪鹏. 城市带状绿地结构类型与温湿效应的关系[J]. 应用生态学报，2011，22(5)：1255-1260.

[4]傅抱璞.小气候学[M].北京：气象出版社，1994.
[5]贾晨凯，王小德.城市公园不同绿地植物群落结构对夏季小气候的影响[J].浙江林业科技，2021，41(4)：39-44.
[6]苏晓蕾.南京城市广场温湿度研究[D].南京：南京农业大学，2017.
[7]胡海辉，刘帅，张思琪.城市公园植物群落小气候效应及人体热舒适度：以哈尔滨三座公园为例[J].科学技术与工程，2021，21(23)：10021-10028.
[8]郝又佳，陈岚，谭林，等.基于局地气候分区的成都街道空间冬季热舒适研究[J].中国城市林业，2023，21(1)：27-36.
[9]潘剑彬，李佳妮，李树华，等.城市绿地植物群落与空气负离子空间分异特征相关关系研究：以北京奥林匹克森林公园为例[J].中国园林，2022，38(6)：57-62.
[10]陈朱，陈方敏，朱飞鸽，等.面积与植物群落结构对城市公园气温的影响[J].生态学杂志，2011，30(11)：2590-2596.
[11]宋明辉.城市绿地植物群落绿量结构特征及微气候效应研究[D].河南：河南科技学院，2022.
[12]徐云蕾，曾馥平，宋同清，等.喀斯特峰丛洼地次生林小气候特征研究[J].农业现代化研究，2012，33(2)：239-244.
[13]赵西平，许亘昱，吴扬，等.南宁市夏季住区室外公共空间小气候对居民活动的影响研究[J].建筑科学，2018，34(8)：18-24.
[14]曾小平，赵平，饶兴权，等.鹤山丘陵 3 种人工林叶面积指数的测定及其季节变化[J].北京林业大学学报，2008，30(5)：33-38.
[15]金琪，严婧.湖北空气负氧离子浓度等级划分及适应性研究[J].环境科学与技术，2017，40(5)：194-199.
[16]熊丽君，王卿，龚静香，等.城市 2 种用地空气负离子与污染因子的关联性[J].环境科学与技术，2019，42(S1)：163-172.
[17]袁相洋，孙迎雪，田媛，等.北京市不同功能区空气负氧离子及影响因素研究[J].环境科学与技术，2014，37(6)：97-102.
[18]施光耀，桑玉强，张劲松，等.不同光照强度下植物电信号变化特征及其与空气负离子的关系[J].应用生态学报，2022，33(2)：439-447.
[19]张新献，古润泽，陈自新，等.北京城市居住区绿地的滞尘效益[J].北京林业大学学报，1997，19(4)：14-19.
[20]陈红，何瑞珍，郭煜琛，等.校园不同绿色空间的小气候特征及其人体舒适度[J].地域研究与开发，2018，37(3)：126-131，137.
[21]王波，闫晓云，侯秀娟，等.夏季干旱半干旱城市公园不同植被配置环境效应评价研究[J].西北林学院学报，2022，37(2)：248-255.
[19]张新献，古润泽，陈自新，等.北京城市居住区绿地的滞尘效益[J].北京林业大学学报，1997，19(4)：12-17.
[22]王行，王月容，段敏杰.北京城市副中心绿地降温增湿效应评价[J].北京农学院学报，2022，37(1)：103-110.
[23]智颖，况达.澳门历史街区议事厅前地夏季热舒适度模拟及提升策略[J].中国城市林业，2023，21(4)：135-143.
[24]朱蕊蕊，张晓彤，刘亦斌，等.城市人居环境小气候研究综述：基于 Web of Science 文献的知识图谱分析[J].中国城市林业，2021，19(4)：36-41.
[25]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.
[26]商茹，李嘉乐，李薇，等.北京城市绿地不同下垫面对环境微气候影响研究[J].中国农学通报，2019，35(22)：77-83.