

文章编号:2095-6134(2020)05-0606-13

# 城市河岸带的斑块组成和空间分布对小气候的影响 ——以北京永定河河岸带为例\*

王昕<sup>1</sup>, 张娜<sup>1,2†</sup>, 乐荣武<sup>1</sup>, 郑潇柔<sup>1,3</sup>

(1 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408; 2 燕山地球关键带与地表通量观测研究站, 北京 101408;

3 中国科学院深圳先进技术研究院空间信息研究中心, 广东 深圳 518055)

(2019 年 3 月 22 日收稿; 2019 年 5 月 8 日收修改稿)

Wang X, Zhang N, Yue R W, et al. Effects of composition and spatial distribution of patches on microclimate in the urban riparian zone : a case study of riparian zone along Yongding River in Beijing [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(5) :606-618.

**摘 要** 为探讨河岸带斑块组成与空间分布对小气候的影响,以修复后的北京永定河门城湖—莲石湖段河岸带为研究区,于 2017 年 8 月,选择晴朗天气,分别在早晨、中午和傍晚实测每个植被斑块的地温(LST)、气温(TP)和相对湿度(RH),获取斑块指数。运用冗余度分析和逐步回归分析,探讨影响植被斑块小气候的因素。结果表明:与道路相比,植被可显著降低斑块内部的 LST 和 TP,增大 RH;但不同类型植被斑块之间的差异并不显著。夏季白天不同时刻植被斑块的 LST、TP 和 RH 均会受到斑块及其邻近斑块特征的共同影响,但不同类型斑块小气候所受影响不尽相同。中午时,草本植物高度增加 0.1 m, LST 降低 5.11%;灌木覆盖度增加 10%, TP 降低 2.50%, RH 增加 10.82%;邻域乔木面积增加 10%,草阔和草本植物斑块 LST 分别降低 8.26% 和 44.98%;邻域道路面积增加 10%,草阔斑块 LST 最大增加 6.00%;距河距离减少 10 m,草本植物和灌木斑块 RH 最大分别增加 9.32% 和 2.01%。不同斑块指数之间的交互或加和作用对小气候的影响通常比单个指数更显著。

**关键词** 城市河岸带;地表温度;气温;相对湿度;斑块组成;空间分布;邻近斑块

**中图分类号:** TU986 **文献标志码:** A **doi:** 10.7523/j.issn.2095-6134.2020.05.005

## Effects of composition and spatial distribution of patches on microclimate in the urban riparian zone: a case study of riparian zone along Yongding River in Beijing

WANG Xin<sup>1</sup>, ZHANG Na<sup>1,2</sup>, YUE Rongwu<sup>1</sup>, ZHENG Xiaorou<sup>1,3</sup>

(1 College of Resource and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

2 Yanshan Mountains Earth Critical Zone and Surface Flux Research Station, Beijing 101408, China;

3 Center for Geospatial Information, Shenzhen Institutes of Advanced Technology,

Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong, China)

**Abstract** We discuss the effects of composition and spatial distribution of patches on microclimate

\* 北京市自然科学基金(8181001,8132045)资助

† 通信作者, E-mail: zhangna@ucas.ac.cn

in the riparian zone from Mencheng Lake to Lianshi Lake along Yongding River in Beijing. In August 2017, we measured the three microclimate indexes, land surface temperature (LST), air temperature (TP), and relative humidity (RH), within each vegetation patch in the morning, at noon, and at dusk, respectively, on the same sunny days. Redundancy analysis and stepwise regression analysis are used to determine the main factors affecting the three microclimate indexes for different vegetation patch types and how they affect. The results show that, compared with roads, plants significantly reduce LST and TP and increase RH within the vegetation patches. However, the differences among the three vegetation patch types are not significant. LST, TP, and RH at the three times are affected by the characteristics of both vegetation patches themselves and their adjacent patches. However, these relationships at the same time are not always the same for different vegetation patch types. At noon, as the height of herb increases by 0.1 m, LST within herb patches reduces by 5.11%. As the shrub coverage increases by 10%, TP within shrub patches reduces by 2.50% and RH increases by 10.82%. As the adjacent tree coverage increases by 10%, LST within the mixed herb and broad-leaved patches and the herb patches reduces by 8.26% and 44.98%, respectively. As the adjacent road area increases by 10%, LST within the mixed herb and broad-leaved patches increases by up to 6.00%. As the distance from the river decreases by 10 m, RH within herb patches and shrub patches increases by up to 9.32% and 2.01%, respectively. In general, the index interactions or additions among different patches have more significant influence on microclimate than single patch index. The results provide useful information for ecological restoration of riparian zone and landscape design and planning.

**Keywords** urban riparian zone; land surface temperature; air temperature; relative humidity; patch composition; spatial distribution; adjacent patch

近年来,随着全球气候变化和快速城市化进程,很多城市高温天气现象的出现日益频繁。根据北京市近40年气温的统计结果可知:7月和8月的平均气温和平均最高气温均呈逐年上升趋势;7月最高气温超过38℃和8月最高气温超过36℃的年份分别占22.5%和17.5%。高温天气会严重影响人们正常的工作和生活,增加人们中暑的几率,以及与热相关疾病的发病率和死亡率<sup>[1-4]</sup>。因此,热环境的变化成为影响城市环境质量的重要因素,受到众多学者和社会公众的高度关注<sup>[5-6]</sup>。

城市下垫面以硬化地表和建筑物为主,这是城市气温较高、湿度较低的重要原因。绿地作为斑块分布于硬化基质中,其面积虽小,但因其具有明显的降温增湿作用,可在一定程度上缓解大范围热环境带来的负效应<sup>[7-9]</sup>,对人们的生活和健康产生积极影响<sup>[10]</sup>。而城市河岸带是一类特殊的城市用地,其中的绿地和水体均可在调节小气候方面发挥作用<sup>[11-12]</sup>。尽管国内外对城市绿地的小气候调节效应研究较多,但对城市河岸带的相关研究还很少。

国内外学者对城市下垫面组成的小气候调节效应做了大量研究,包括下垫面类型、绿地的垂直配置结构和植物数量。通过比较不同下垫面类型发现,绿地(包括河岸植被)和水体具有较好的降温增湿效果<sup>[12-17]</sup>。一些研究发现,河岸植被的垂直结构会显著影响小气候<sup>[18-19]</sup>,复层乔-草型和乔-灌-草型绿地的降温效果比单层结构绿地更为明显<sup>[20-22]</sup>,其中,草地的降温效果不显著<sup>[22]</sup>。对于植物数量的影响,较多研究探讨植被覆盖度的温湿效应<sup>[18, 23-27]</sup>,但对植物高度和乔木叶生物量的温湿效应研究还较少。而且,大多数研究考虑的是绿地斑块本身植被组成的温湿效应,而对邻近斑块组成的温湿效应研究还较少。除斑块组成,一些研究探讨绿地斑块的面积<sup>[28-29]</sup>、周长<sup>[30]</sup>和形状<sup>[31-32]</sup>这些空间构型特征对小气候的影响。然而,绿地斑块的空间位置、其邻域或周边其他下垫面类型(如道路和河流)的位置和数量对绿地斑块产生的小气候效应研究还较少,而对河岸带植被的相关研究则更少。

在小气候指标与斑块指数关系的研究上,目前主要考虑的是单个斑块指数的影响。但我们研

究发现,由于两者的复杂非线性关系,某些情况下,小气候指标与某单个斑块指数的关系并不显著,但这并不能表明该指数一定对小气候没有影响,因为该指数与其他指数组合而成的新指数对小气候的影响可能非常显著。但目前研究对组合指数的考虑很少。另外,大多数研究从区域或景观尺度上探讨城市绿地、公园在不同季节、不同气候条件下的降温增湿效应,通过连续测量 8—18 时不同时刻的小气候指标<sup>[33]</sup>,研究日均降温增湿幅度<sup>[24, 34-36]</sup>;而在斑块尺度上,分别对一天中早晨、中午、傍晚不同时刻绿地的小气候调节效应的研究还很少。

研究区位于北京市西郊的莲石湖公园,包括恢复通水之后的永定河河道和河岸带。岸边种植了一定数量的乔木、灌木和草本植物,形成从护坡到河漫滩的有层次的绿化带<sup>[37]</sup>;同时,修建了贯穿整个河岸带的硬化道路。该公园一经建成即成为人们(尤其是附近居民)进行休闲娱乐和文化活动的重要场所。然而,在整个公园中,并不是任何时刻、任何位置均适于人们休闲或活动。在夏季的早晨、中午和傍晚,人们在哪些空间位置上感觉小气候更为舒适,而哪些空间位置又不适于长时间驻足?河岸带景观建设者所设计的不同类型植被斑块的哪些组成或空间分布特征可对不同时刻的小气候有重要的调节作用,从而有效缓解夏季酷暑带来的不适感?不同斑块特征对不同小气候指标均有不同程度的影响,但对哪个小气候指标的影响会更大?周围其他类型斑块的组成和空间布局是否也对植被斑块的小气候有影响,主要通过影响哪个小气候指标影响人们的舒适感?

针对这些问题,本研究在对河岸带斑块进行划分的基础上,提出一些斑块指数,以量化植被斑块及其邻近斑块的植被组成(包括类型、垂直结构、植物数量)、植被斑块与其周围异质斑块(道路和河流)的空间分布关系;并探讨斑块组成及斑块之间的空间关系是如何影响不同时刻的小气候的。研究结果有助于提出合理的植被建设方案,以改善河岸带景观的小气候调节服务和文化服务。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

永定河全长约 747 km,其中北京段约 170 km,流经门头沟区、石景山区、丰台区、房山区

和大兴区。研究区位于近郊石景山区西部和门头沟区东部的门城湖—莲石湖段。门城湖区段位于门头沟区,河段全长 5.24 km,平均宽度 294 m,总面积 172 hm<sup>2</sup>,其中水体面积占 39.0%<sup>[38]</sup>。莲石湖区段位于石景山区,河段全长 5.8 km,平均宽度 376 m,总面积 226 hm<sup>2</sup>,其中水体面积占 46.5%<sup>[39]</sup>。该区域属于暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥;年平均气温为 10~12℃,年平均降水量约 500~700 mm,降雨主要集中在 6—8 月份(图 1(a),1(b))。

20 世纪中后期,永定河成为北京地区的主要泄洪河流之一;但由于忽视了它的其他生态功能,结果造成一系列环境问题<sup>[40]</sup>。2009 年以来,随着“四湖一线”生态修复工程的实施,莲石湖和门城湖的河道和护岸得以修复<sup>[41]</sup>,并建设亲水乐园区和运动健身区<sup>[38]</sup>。2011 年修复完成之后,成为开放的城市河岸带公园(图 1(c))。

### 1.2 河岸带斑块的识别

基于 2013 年 9 月 18 日的 WorldView-2 遥感影像(空间分辨率 0.5 m×0.5 m),使用 ArcGIS 软件对研究区斑块进行目视解译,最后得到 369 个植被斑块,47 个道路(混凝土、沥青和塑胶)斑块,39 个人工设施斑块,以及 76 个水体斑块。然后通过实地调查对所有斑块的具体信息进行逐一核实和校正。

根据植被垂直配置结构,将河岸带植被斑块分为 8 大类:草本类、灌木类、乔木类、草灌类、草乔类、灌乔类、草灌乔类、混合类;并在此基础上进一步划分,如草乔类包括草阔类、草针类和草阔针类,乔木类包括阔叶类、针叶类、阔针类等。

### 1.3 小气候指标的测定

于 2017 年 8 月,选择相邻的晴天或少云天,分别在 7—9 时、12—14 时、17—19 时 3 个时段内,测定每个斑块内部的小气候。用便携式气象仪 Kestrel 4000,每间隔 10 s 自动记录一次气温、相对湿度和风速;用 MI-210 红外温度计,每间隔 30 s 手动测定一次地表温度;测量高度均为 1 m。对每个斑块,根据其大小,测定 3~36 个不等的样点,样点均匀分布于整个斑块。

要比较不同植被斑块的小气候,需要确保不同植被斑块小气候指标的测定时间一致,由此排除时间差对小气候的影响。为了避免在早晨、中午和傍晚 2 h 内因测定时间的先后而造成的温湿度差异,在测定每个植被斑块内的小气候指标的

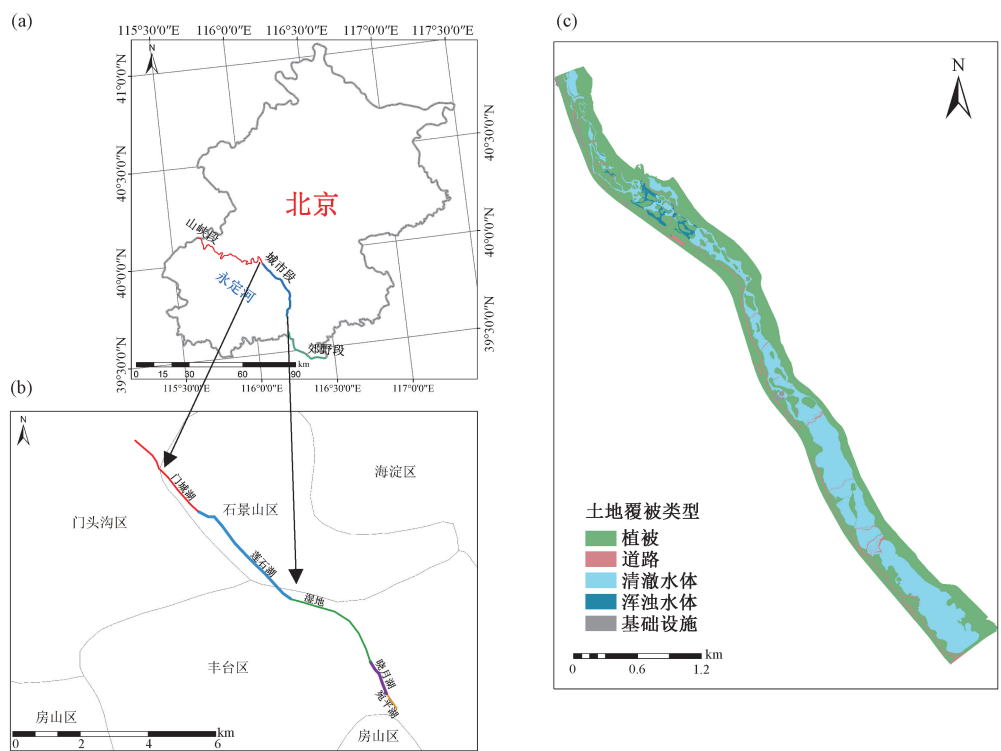


图 1 研究区位置图  
Fig. 1 Location of the study area

同时,也测定邻近水泥道路的相应指标。水泥道路本身的理化特征完全相同,故可认为,不同时刻不同段道路小气候的差异主要源于时间差,而与不同段道路的下垫面特征无关。因此,我们用 2 h 内邻近道路小气候指标的变动系数来校正这 2 h 内因测定时间差异而造成的植被斑块之间的小气候差异,以确保不同斑块小气候的可比性,探讨影响植被斑块内部小气候的斑块特征因素。本研究最终将 7—9 时、12—14 时和 17—19 时 3 个时段内的小气候分别校正到 7 时、12 时和 17 时,并分别代表早晨、中午和傍晚的小气候状况。

1.4 斑块指数

选取 3 类可能对植被斑块的小气候有较大影响的指数。其中,中心斑块的植被组成指数主要反映中心斑块的植被类型和植物数量或生长状况,包括植被垂直配置类型,草灌层覆盖度和高度,乔冠层密度、高度、胸径、叶生物量、冠幅等。与中心斑块邻近的斑块的植被组成指数主要反映缓冲区内邻近斑块的植被类型和植物数量或生长状况,包括邻近草灌层面积比例、乔冠层面积比例等。中心斑块与其周围斑块的空间分布指数主要量化缓冲区内非植被斑块的面积比例或中心斑块

与周围斑块的空间距离,包括距河距离、邻近道路面积比例(表 1)。这里,中心斑块指植被斑块,邻近斑块指中心斑块周围 20 m 宽度缓冲区内的斑块(包括道路)。

在测定斑块内小气候指标的同时测定植被斑块指数。在每个植被斑块内部,随机选取 3~5 个 1 m×1 m 大小的样方,测定草本植物高度和覆盖度、低矮灌木(如砂地柏(*Sabina vulgaris*))高度和覆盖度。对于较高灌木(如连翘(*Forsythia suspensa*)),随机选取 3~5 个 4 m×4 m 样方,测定高度和覆盖度。对于乔木,随机选取代表不同生长状况的 3~5 株乔木,测定从树干中心到树冠边缘的距离,获得冠幅半径及乔冠层面积。使用 Vertex IV 超声波测高测距仪测定选取乔木的高度,同时测定胸径;利用华北地区常见树种的异速生长模型<sup>[41-43]</sup>,通过乔木高度和胸径估算乔木叶生物量。植被斑块的指数值为该斑块内多个样方的平均值。

2 统计分析

鉴于统计样本数量的要求,本文选取数量较大的 3 类植被斑块:草阔类(39 个)、草本植物类(37 个)和灌木类(23 个)进行统计分析。

表 1 中心植被斑块及其邻近斑块指数

Table 1 Indexes for central vegetation patches and their adjacent patches

指数分类	指数	全称(简写)	公式	描述
中心斑块的 植被组成 指数	1. 草本植物覆盖度/%	Herb coverage (HC <sub>CP</sub> )	—	—
	2. 草本植物高度/m	Herb height (HH <sub>CP</sub> )	—	—
	3. 灌木覆盖度/%	Shrub coverage (SC <sub>CP</sub> )	—	—
	4. 灌木高度/m	Shrub height (SH <sub>CP</sub> )	—	—
	5. 乔冠层密度/%	Density of tree crown (DTC <sub>CP</sub> )	$\frac{N_i \times \pi C_i^2}{A_i}$	$N_i$ 为植被斑块 $i$ 中的乔木总株数; $C_i$ 为斑块 $i$ 中的乔木平均冠幅; $A_i$ 为斑块 $i$ 的面积
	6. 乔木高度/m	Tree height (TH <sub>CP</sub> )	—	—
	7. 乔木胸径/m	Diameter at breast height (DBH)	—	—
	8. 乔木冠幅/m	Tree crown breadth (TCB)	—	—
	9. 乔木叶生物量/(kg/m <sup>2</sup> )	Tree leaf biomass (TLB)	$A \times (D_i^2 H_i)^B$	$D_i$ 为植被斑块 $i$ 中的乔木平均胸径, $H_i$ 为斑块 $i$ 中的乔木平均高度; $A$ 和 $B$ 为常数,决定于区域、时间和树种等
邻近斑块的 植被组成 指数	10. 邻近草本植物面积比例/%	Percent adjacent herb coverage (PAHC)	$\frac{\sum_{j=1}^n HC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_{iB}}$	$HC_{iB_j}$ 为植被斑块 $i$ 周围一定范围缓冲区内斑块 $j$ 中的草本植物覆盖度; $A_{iB_j}$ 为斑块 $j$ 的面积; $A_{iB}$ 为该缓冲区的总面积; $n$ 为该缓冲区内斑块的总数
	11. 邻近灌木面积比例/%	Percent adjacent shrub coverage (PASC)	$\frac{\sum_{j=1}^n SC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_{iB}}$	$SC_{iB_j}$ 为植被斑块 $i$ 周围一定范围缓冲区内斑块 $j$ 中的灌木覆盖度
	12. 邻近乔冠层面积比例/%	Percent adjacent tree coverage (PATC)	$\frac{\sum_{j=1}^n TC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_{iB}}$	$TC_{iB_j}$ 为植被斑块 $i$ 周围一定范围缓冲区内斑块 $j$ 中的乔冠层密度
	13. 邻近草本植物面积与中心斑块面积比	Ratio of adjacent herb area to central patch area (RAHACPA)	$\frac{\sum_{j=1}^n HC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_i}$	—
	14. 邻近灌木面积与中心斑块面积比	Ratio of adjacent shrub area to central patch area (RASACPA)	$\frac{\sum_{j=1}^n SC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_i}$	—
	15. 邻近乔冠层面积与中心斑块面积比	Ratio of adjacent tree area to central patch area (RATACPA)	$\frac{\sum_{j=1}^n TC_{iB_j} \times A_{iB_j}}{A_i}$	—
中心斑块与 其周围斑块 的空间分 布指数	16. 距河距离/m	Nearest distance to river (NDR)	—	植被斑块中心到最近河流斑块边缘的距离
	17. 邻近道路面积比例/%	Percent adjacent road (PAR)	$\frac{R_{iB}}{A_{iB}}$	$R_{iB}$ 为植被斑块 $i$ 周围一定范围缓冲区内道路面积; $A_{iB}$ 为该缓冲区的总面积

对不同时刻草阔、草本植物和灌木斑块,以及道路(40个)的LST、TP和RH进行两两独立样本*t*检验,以揭示不同类型植被斑块之间,以及它们与道路之间的小气候指标的差异显著性。

对每类斑块,设表1中斑块指数为解释变量(自变量),分别设早晨、中午和傍晚时相应斑块内部的小气候指标为响应变量(因变量),使用CANOCO 5软件进行冗余度分析(RDA),探讨斑块小气候与斑块指数的关系。

为进一步定量描述小气候与斑块指数的关系,将表1中各指数及不同指数的组合构成的新指数共同作为自变量,使用SPSS 23软件,进行逐

步回归分析,分别获得3类植被斑块小气候指标与单指数和组合指数的定量关系。可根据回归关系式获得斑块指数变化之后小气候指标的改变量。例如,要得到草阔斑块指数*A*变化之后LST的改变量,可能会考虑两种不同的情形。第1种情形中,回归关系式中自变量为单个斑块指数*A*,而无其他指数。这时,以研究区内草阔斑块指数*A*的实际平均值为基准,可直接获得指数*A*变化Δ之后对LST的影响。第2种情形中,回归关系式中自变量为由不同斑块指数乘积或加和所构成的组合指数(如*A*×*B*)。这时,仍然以指数*A*的实际平均值为基准,并假设指数*B*的一系列值(参

考指数  $B$  的实际值(但不一定受限于实际范围)确定);用回归关系式计算得到估计的一系列平均值  $LST1_i$ ;计算当指数  $B$  的一系列值不变,而仅指数  $A$  变化  $\Delta$  之后的一系列  $LST2_i$ ;计算 LST 降低或增加的百分比,即  $|LST2_i - LST1_i|/LST1_i \times 100\%$ ,获得  $A$  变化之后 LST 的变化范围。

3 结果与分析

3.1 不同类型斑块小气候的比较

对不同类型斑块的小气候实测数据进行独立

样本  $t$  检验。结果表明,夏季白天不同时刻植被斑块的 TP 显著低于道路,RH 显著高于道路( $p < 0.05$ );植被斑块的 LST 极显著低于道路( $p < 0.000\ 01$ );其中,中午时差异最大。总的来说,草阔斑块的 LST 和 TP 较草本植物斑块和灌木斑块低,而 RH 较高,中午时差异最大;但  $t$  检验结果表明,3 类植被斑块不同时刻的 LST、TP 和 RH 均无显著差异(图 2)。然而,由于不同类型植被斑块的组成特征不尽相同,我们在分析小气候与斑块特征的关系时,对不同类型植被斑块分别考虑。

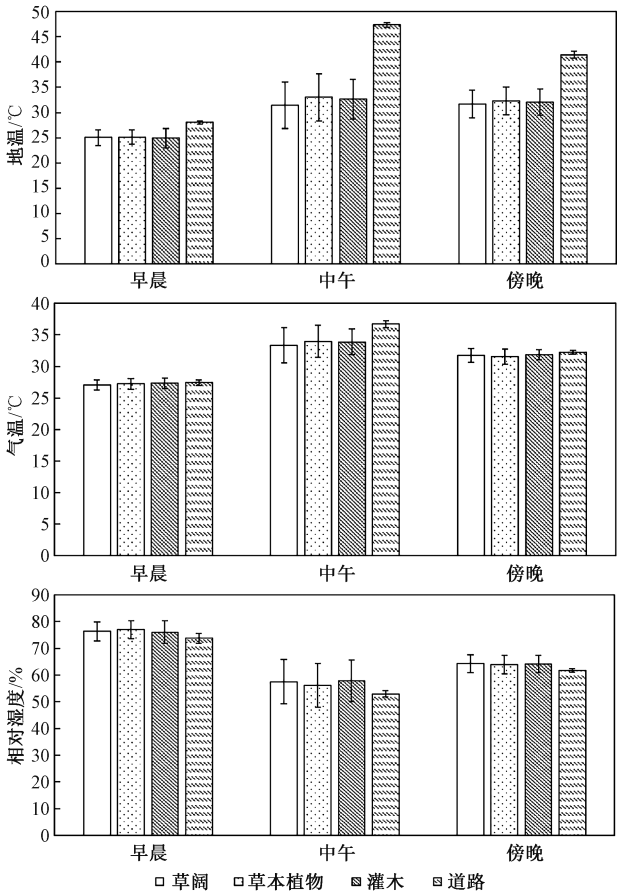


图 2 不同类型斑块不同时刻小气候指标的比较

Fig. 2 Comparison of microclimate indexes among different types of patches in the morning, at noon, and at dusk

3.2 小气候指标与斑块指数的相关性

研究区内 99 个斑块中,草阔斑块的平均乔冠层密度和草本植物覆盖度分别为  $(44.88 \pm 25.13)\%$  和  $(74.17 \pm 23.70)\%$ ;草本植物斑块的平均草本植物覆盖度为  $(76.66 \pm 23.90)\%$ ;灌木斑块的平均灌木覆盖度为  $(81.97 \pm 13.98)\%$ 。草阔、草本植物和灌木斑块中心离河边平均距离分别为  $(62.65 \pm 25.70)$ 、 $(49.93 \pm 28.19)$  和  $(61.92 \pm 31.92)$  m,最近距离分别为 9.33、6.86 和

13.07 m。在草阔、草本植物和灌木斑块周边 20 m 的缓冲区内,道路所占的面积比例平均约为 12% ~ 13%,最大道路比例分别为 42.00%、26.40% 和 25.14%。

RDA 结果表明(图 3),所选斑块指数对草阔斑块、草本植物斑块和灌木斑块 3 个小气候指标变化的解释量分别可达 55.3% ~ 60.4%、33.7% ~ 45.6% 和 50.3% ~ 73.8% ( $p < 0.05$ )。由 RDA 排序图中黑色箭头的长度可见,对不同

类型的斑块,早晨时 RH 受斑块指数的总体影响均最大;中午时 LST 所受影响最大,或与 TP 和 RH 所受影响差异不大(中午时的灌木斑块);不

同时刻 TP 所受影响最小,或与 LST 和 RH 所受影响差异不大(傍晚时的草本斑块和中午时的灌木斑块)。

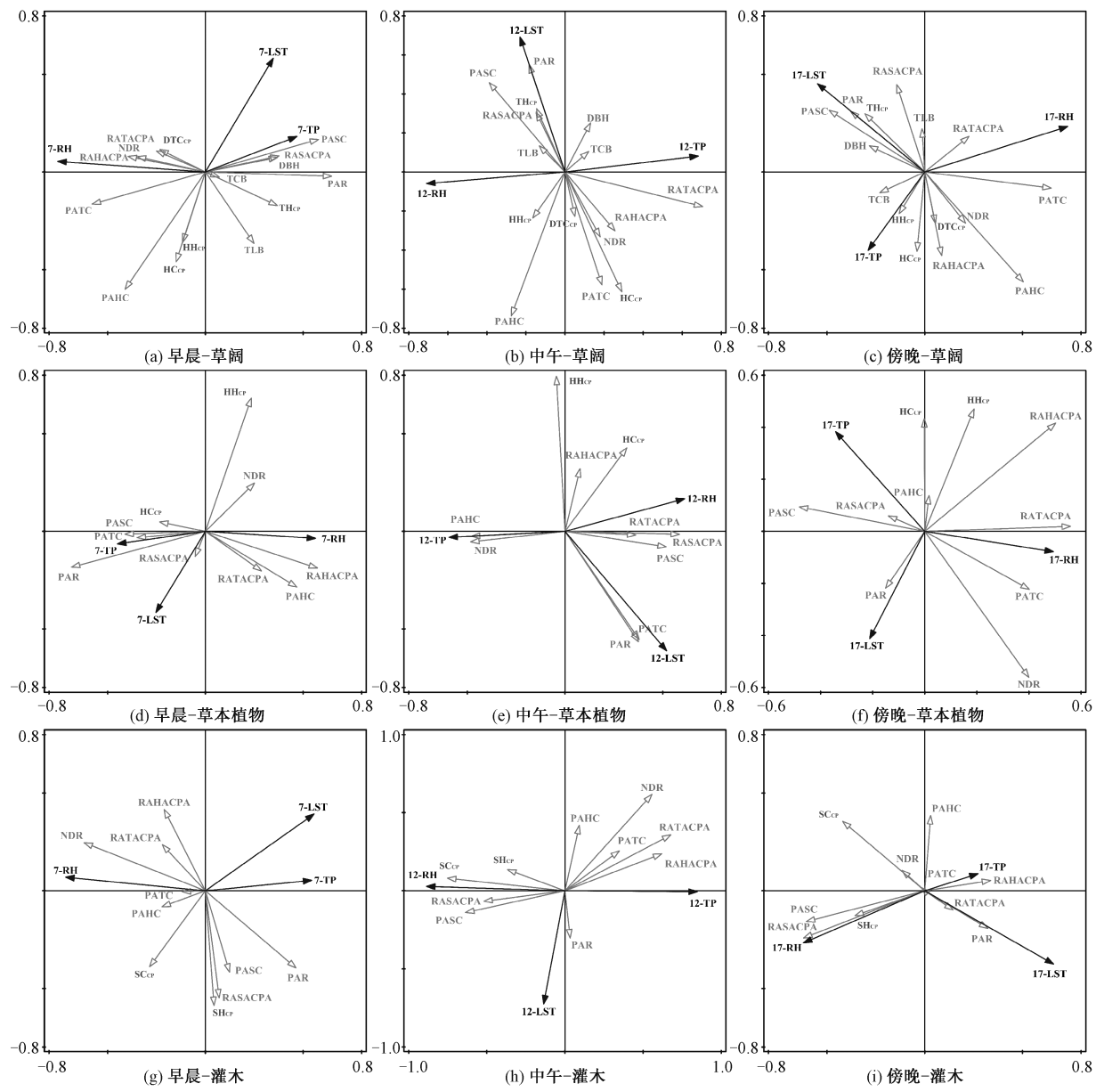


图 3 小气候指标与斑块指数关系的冗余度分析结果

Fig. 3 Redundancy analysis results for relationships between microclimate indexes and patch indexes

3.3 草阔斑块

根据 RDA 排序图中小气候指标与斑块指数的夹角大小可知,草阔斑块及其邻域的乔木数量和生长状况对斑块内部夏季白天的 LST、TP 和 RH 均有较大影响;草本植物的影响与乔木差异不显著,但草本植物对傍晚 TP 和 RH 的影响不大。道路对中午和傍晚 LST、早晨 TP 和 RH 的影响较大(图 3(a)、3(b)和 3(c),表 2)。

逐步回归分析结果表明,影响草阔斑块 LST

的单指数主要是邻域草本植物面积(PAHC),影响 TP 和 RH 的是邻域乔木面积(PATC 或 RATACPA)。尽管大多数单指数对小气候的影响不显著,但有些单指数之间的交互作用可能对小气候有显著影响。例如,与草阔斑块及其邻域草本植物相关的单指数对傍晚 TP 和 RH 的影响不大(RDA 结果),但草阔斑块草本植物与乔木数量和生长状况的交互作用(如  $DTC_{CP}-TH_{CP}-HC_{CP}-HH_{CP}$ )对 RH 影响极显著,邻域草本植物与邻域

灌木或乔木面积的交互作用(如 PAHC-PASC 和 PAHC-PATC)对 TP 和 RH 影响显著。不仅道路面积(PAR),而且道路面积与邻域植被覆盖的交互作用(如 RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr(PAR 的倒数))对小气候的影响也很显著(表 3)。

表 2 小气候指标与斑块指数的冗余度分析结果

Table 2 Redundancy analysis results for relationships between microclimate indexes and patch indexes				
植被斑块类型	时刻	地温(LST)	气温(TP)	相对湿度(RH)
草阔	早晨	PAHC>HC <sub>CP</sub> >HH <sub>CP</sub> >PATC>PAR>TLB	PATC>PAR>RAHACPA>PAHC>RATACPA>DTC <sub>CP</sub> >HC <sub>CP</sub>	PAR > RAHACPA > RATACPA > DTC <sub>CP</sub> >PATC>PAHC
	中午	PAR>PATC>HC <sub>CP</sub> >DTC <sub>CP</sub> >RAHACPA>PAHC>HH <sub>CP</sub> >RATACPA	HH <sub>CP</sub> >TLB>PASC>PAHC	HH <sub>CP</sub> >TLB>PASC>PAHC
	傍晚	PAR>PAHC>PATC>RAHACPA>DTC <sub>CP</sub> >HC <sub>CP</sub>	RATACPA>TLB>PATC>RASACPA	RATACPA>PATC>TLB
草本植物	早晨	HH <sub>CP</sub> >PAR	PAR>RAHACPA>PAHC>RATACPA>HH <sub>CP</sub>	RAHACPA > PAR > PAHC > RATACPA>HH <sub>CP</sub>
	中午	PAR>HH <sub>CP</sub> >RAHACPA>PAHC>HC <sub>CP</sub>	NDR>RASACPA>RATACPA>HC <sub>CP</sub> >PATC>PAR	NDR > RASACPA > RATACPA > HC <sub>CP</sub> >RAHACPA>HH <sub>CP</sub>
	傍晚	HH <sub>CP</sub> >PAR>RAHACPA>HC <sub>CP</sub> >RATACPA>NDR	PATC>RATACPA	RATACPA > PATC > RAHACPA > HH <sub>CP</sub>
灌木	早晨	PAHC>SC <sub>CP</sub> >PATC>SH <sub>CP</sub> >RASACPA	PATC>PAHC>SC <sub>CP</sub> >PAR>RATACPA>SH <sub>CP</sub>	PATC>PAHC > PAR > RATACPA > SC <sub>CP</sub> >RAHACPA
	中午	PAHC>PAR>PATC>RATACPA>RAHACPA	SC <sub>CP</sub> >RASACPA>PASC>SH <sub>CP</sub> >NDR	SC <sub>CP</sub> >RASACPA > PASC > SH <sub>CP</sub> > NDR
	傍晚	PAR>SC <sub>CP</sub> >PASC>SH <sub>CP</sub> >RASACPA	SH <sub>CP</sub> >RASACPA>PASC>PAR>SC <sub>CP</sub>	RASACPA > SH <sub>CP</sub> > PASC > SC <sub>CP</sub> > PAR

在其他指数保持不变的情况下,草阔斑块 HC<sub>CP</sub> 每增加 10%,中午 LST 降低 1.19%~2.74%;PATC 和 PAHC 每增加 10%,中午 LST 最大分别降低 8.26%和 10.72%。RATACPA 每增加 1,中午 TP 降低 11.63%~21.92%,中午 RH 增加 11.12%~20.17%(与平均值相比增加的百分比,下同)。PAR 每增加 10%,中午 LST 增加 4.82%~6.00%,早晨 TP 最大增加 22.32%,早晨 RH 最大降低 13.79%(表 3)。例如,草阔斑块 19 和 10(这些斑块仅为举例说明某些斑块指数对小气候指标的影响,未在图 1(c)中注明其具体位置)的绝大多数指数十分接近,斑块 10 的 LST、TP 分别比斑块 19 低 1.60℃和 0.69℃,RH 高约 3.80%,这与斑块 10 的 PAHC 和 HC<sub>CP</sub> 分别比斑块 19 高约 34.56%和 0.10 m 有关。

3.4 草本斑块

根据 RDA 排序图中小气候指标与斑块指数的夹角大小可知,草本植物斑块及其邻域的草本植物数量和生长状况对斑块内部夏季白天不同时刻的 LST、TP 和 RH 大多有较大影响;邻域乔木对 LST 的影响较小,但对 TP 和 RH 的影响很大,尤其傍晚时影响最大。道路面积对白天不同时刻 LST、早晨 TP 和 RH 的影响较大。距河距离

(NDR)对中午 TP 和 RH 影响最大(图 3(d)、3(e)和 3(f),表 2)。

逐步回归分析结果表明,影响草本植物斑块 LST 的单指数是斑块草本植物生长状况(HH<sub>CP</sub>);影响 TP 和 RH 的分别是邻域乔木和草本植物面积(PATC 和 RAHACPA)。这些对小气候影响显著的单指数与其他指数之间的交互作用对小气候的影响也很显著,如 HC<sub>CP</sub>-HH<sub>CP</sub>,HH<sub>CP</sub>-PAHC, PASC-PATC, HC<sub>CP</sub>-PAHC-PASC-PATC, RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr。同时,尽管有些单指数对小气候的影响不显著,但它们之间的交互作用可能对小气候有显著影响。例如,与邻域乔木和邻域灌木相关的单指数对 LST 的影响不大(RDA 结果),但邻域乔木与邻域灌木面积的交互作用(如 PASC-PATC)对 LST 影响显著。不仅道路面积,道路面积与斑块草本植物数量和生长状况或邻域植被覆盖的加和(如 HC<sub>CP</sub>-HH<sub>CP</sub>与 PAR)或交互作用(如 RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr)对小气候的影响也很显著。除中午单个 NDR 指数的影响,NDR 与斑块草本植物数量和生长状况或邻域植被覆盖的交互作用(如 HC<sub>CP</sub>-HH<sub>CP</sub>-PAHC-PASC-PATC-PAR-NDRr(NDR 的倒数)和 PAHC-PASC-PATC-NDR)对傍晚时的 TP 和 RH 也有显著影响(表 3)。

表 3 小气候指标与斑块指数之间的回归关系

Table 3 Regression relationships between microclimate indexes and patch indexes

植被斑块类型	时间	地温(LST)			气温(TP)			相对湿度(RH)					
		回归关系式	X	R <sup>2</sup>	p	回归关系式	X	R <sup>2</sup>	p	回归关系式	X	R <sup>2</sup>	p
草本植物	中午	LST=26.64-3.43X	PAHC	0.49	***	TP=27.57-5.45X	PAHC-PATC	0.60	***	RH=73.50+1.90X	HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.63	***
		LST=25.78-2.89X	HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.44	**	TP=27.58-0.42X	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.60	***	RH=78.38-16.90X	PAR	0.48	**
		LST=25.67-7.01X	PAHC-PATC	0.38	*	TP=27.39-0.01X	RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr	0.58	***	RH=75.06+0.02X	RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr	0.46	***
		LST=35.23-8.03X <sub>1</sub> +17.61X <sub>2</sub>	HC <sub>CP</sub> , PARS	0.59	***	TP=27.63-3.51X	PATC	0.49	**	RH=74.54+18.59X	PAHC-PATC	0.43	***
草甸	中午	LST=34.10-2.19X	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.53	***	TP=32.36-3.75X	RATACPA	0.48	**	RH=60.55+12.27X	RATACPA	0.49	**
		LST=-24.568X+33.656	PAHC-PATC	0.46	**								
		LST=35.56-8.67X	PAHC	0.43	*								
		LST=33.50-1.24X	HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.53	***	TP=30.55-5.27X <sub>1</sub> +3.14X <sub>2</sub> +3.02X <sub>3</sub>	PATC, PASC, PAHC	0.75	***	RH=64.40+67.44X	DTC <sub>CP</sub> -TH <sub>CP</sub> -HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub>	0.68	***
草本植物	傍晚	LST=34.73-6.39X	PAHC	0.51	**	TP=31.33-7.15X	PAHC-PASC	0.45	**	RH=62.09+12.03X	PATC	0.39	*
		LST=33.11-15.663X	PAHC-PATC	0.47	**					RH=62.66+14.81X	PAHC-PATC	0.51	*
		LST=33.11+10.025X	PAR	0.39	*								
		LST=25.66-2.60X	HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.33	*	TP=26.55+5.59X	PAR	0.37	*	RH=79.38-20.11X	PAR	0.35	*
草本植物	早晨					TP=27.56-1.58X	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub>	0.34	*	RH=76.50+1.01X	RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr	0.34	*
		LST=30.97-5.26X <sub>1</sub> +32.73X <sub>2</sub>	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub> , PAR	0.65	***					RH=76.06+0.29X	RAHACPA	0.33	*
		LST=36.13-14.88X	HH <sub>CP</sub> -PAHC	0.59	***					RH=59.04+13.10X <sub>1</sub> -0.10X <sub>2</sub>	PASC, NDR	0.50	**
		LST=35.53-5.35X	HH <sub>CP</sub>	0.50	**								
草本植物	傍晚	LST=32.48-89.93X	PASC-PATC	0.41	*								
		LST=32.69-2.31X	RAHACPA-RASACPA-RATACPA-PARr	0.35	*	TP=31.33-489.26X	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub> -PAHC-PASC-PATC-PARr-NDRr	0.42	**	RH=64.36+20.29X	PAHC-PASC-PATC-NDRr	0.52	***
						TP=31.11-1.21X	HC <sub>CP</sub> -HH <sub>CP</sub>	0.39	*	RH=64.72+23.49X	PAHC-PASC-PATC-HC <sub>CP</sub>	0.40	*
						TP=32.17-4.44X	PATC	0.33	*				
灌木	早晨					TP=27.58-1.00X	SC <sub>CP</sub> -SH <sub>CP</sub> -PAHC-PASC-PATC-PARr-NDRr	0.42	*				
						TP=40.85-8.49X	SC <sub>CP</sub>	0.60	**	RH=43.84+21.37X <sub>1</sub> +16.87X <sub>2</sub>	SC <sub>CP</sub> -PASC, SC <sub>CP</sub> -SH <sub>CP</sub>	0.71	***
						TP=35.47-5.57X	PASC	0.55	**	RH=27.88+36.49X	SC <sub>CP</sub>	0.67	***
						TP=36.36-1.91X	SC <sub>CP</sub> -SH <sub>CP</sub>	0.47	*	RH=64.83-0.11X	NDR	0.48	*
灌木	中午					TP=32.20+0.03X	NDR	0.44	*				
						TP=35.00-14.55X	PAHC-PASC	0.44	*				
		LST=38.28-7.56X	SC <sub>CP</sub>	0.41	*					RH=62.41+2.42X	SC <sub>CP</sub> -SH <sub>CP</sub> -RASACPA-PASC	0.55	**
										RH=62.27+2.43X	PASC-PATC	0.48	**

注: \*\*\* 表示  $p<0.001$ ; \*\* 表示  $0.01<p<0.05$ 。表中斑块指数含义具体见表 1。PARr 表示 PAR 的倒数, NDRr 表示 NDR 的倒数。

对草本植物斑块,在其他指数保持不变的情况下,HH<sub>CP</sub> 每增加 0.1 m,中午 LST 最大降低 5.11%;PAHC 和 PATC 每增加 10%,中午 LST 最大分别降低 33.61% 和 44.98%;RATACPA、RASACPA 和 RAHACPA 每增加 1,傍晚 LST 最大分别降低 36.89%、29.74% 和 30.86%。PATC 每增加 10%,傍晚 RH 最大增加 23.63%,TP 降低 1.38%~1.57%。PAR 每增加 10%,中午 LST 增加 9.38%~11.73%,傍晚 LST 最大增加 27.67%;NDR 每降低 10 m,中午 RH 增加 7.21%~9.32% (表 3)。例如,草本斑块 623 和 621 的绝大多数指数十分接近,斑块 623 的 LST 和 TP 分别比斑块 621 低约 2.39℃ 和 0.71℃,RH 高约 3.43%,这与斑块 623 的 PAHC 和 PATC 分别比斑块 621 高约 4.91% 和 4.37% 有关。

### 3.5 灌木斑块

根据 RDA 排序图中小气候指标与斑块指数的夹角大小可知,灌木斑块或其邻域灌木数量或生长状况对斑块内部夏季白天的 LST、TP 和 RH 总是有较大影响。除此之外,邻域草本植物和乔木对早晨 LST、TP 和 RH,以及中午 LST,也均有较大影响。道路对中午和傍晚 LST、早晨和傍晚 TP 和 RH 的影响较大。距河距离对中午 TP 和 RH 有影响(图 3(h)、3(i)和 3(g),表 2)。

逐步回归结果表明,影响灌木斑块 LST、TP 和 RH 的单指数是斑块或邻域灌木覆盖(SC<sub>CP</sub> 和 PASC)。对 TP 和 RH 影响显著的单指数与其他指数之间的交互作用对小气候的影响也很显著,如 SC<sub>CP</sub>-SH<sub>CP</sub>,SC<sub>CP</sub>-SH<sub>CP</sub>-RASACPA-PASC,PAHC-PASC,PASC-PATC。从中也可见,尽管有些单指数(如 PAHC 和 PATC)对中午和傍晚 TP 和 RH 的影响不显著(RDA 结果),但它们与邻域灌木覆盖的交互作用(如 PAHC-PASC,PASC-PATC)对中午和傍晚 TP 和 RH 的影响显著。距河距离对中午 TP 和 RH 均有影响;距河距离与灌木斑块及其邻域植物数量和生长状况的交互作用(SC<sub>CP</sub>-SH<sub>CP</sub>-PAHC-PASC-PATC-PARr-NDRr)对早晨的 TP 也有显著影响(表 3)。

对于灌木斑块,在其他指数保持不变的情况下,SC<sub>CP</sub> 每增加 10%,中午和傍晚的 TP 最大降低约 2.50%,中午 RH 最大增加 10.82%。PASC 或 PAHC 每增加 10%,中午 TP 最大降低约 4.50%。RASACPA 每增加 1,傍晚 RH 最大增加 6.42%。NDR 每降低 10 m,中午 RH 增加 1.77%~2.01%

(表 3)。例如,灌木类斑块 613 和 619 的绝大多数指数十分接近,斑块 613 的 LST 和 TP 分别比斑块 619 低约 0.17℃ 和 0.42℃,RH 高约 2.28%,这与斑块 613 的 NDR 比 619 小约 17.22 m 有关。

## 4 讨论

### 4.1 影响植被斑块小气候的因素

研究结果表明,3 类植被斑块内部无论是乔木-草本植物、草本植物,还是灌木,其植物数量和生长状况对夏季白天不同时刻的 LST、TP 和 RH 大多有较大影响。尽管从整个地球表面来看,森林使地球大气的温度降低还是升高尚存在巨大的争议<sup>[44]</sup>,但本研究表明,植被对地面以上 1 m 高度范围内的小气候具有明显的降温增湿效应。与乔木和灌木相比,草本植物具有较高的反射率;并且覆盖率越大,反射率越强;阔叶树和针叶树的反射率较草本植物低,但对太阳辐射的吸收更强<sup>[45-46]</sup>。植物冠层通过吸收和反射太阳辐射,降低地面可接收的辐射量,从而降低 LST 或 TP。除去吸收和反射的太阳辐射,到达叶表面的辐射一部分透过叶表面到达地面;其他的穿过枝叶空隙到达地面。增大植被覆盖度或冠层密度,可降低冠层下光照地面的面积比例,减少冠层下地面可接收的太阳辐射,降低 LST<sup>[45]</sup>。叶片通过蒸腾作用将细胞中的水分散失到大气的过程中需要消耗能量,从而可在增加叶片周围 RH 的同时,降低 TP。

斑块内部的小气候也受到邻域乔木、灌木和草本植物覆盖面积的影响。然而,对不同类型植被斑块内部不同时刻的不同小气候指标,其受邻域植物的影响不尽相同。例如,早晨或傍晚时,TP 和 RH 受邻域乔木的影响较 LST 更大;而中午时,草阔和灌木斑块 LST 受邻域乔木的影响较 TP 和 RH 更大,且草本植物斑块 LST 受斑块内植被(而不是邻域植物)的影响更大。LST 对太阳辐射变化的反应比 TP 更快,中午时太阳辐射最强,地面通过吸收太阳短波辐射使 LST 急剧升高,其变化幅度超过 TP。如果在斑块邻域内有较多的乔木,则邻域气温较低,斑块内外可能形成较大温差,从而产生空气流动;而较冷空气从邻域进入斑块会发生下沉运动,对 LST 产生较大影响<sup>[47-48]</sup>。同时,地面在吸收热量之后,可通过长波辐射将部分热量返回大气;近地面大气对太阳短波辐射的

直接吸收很少,主要吸收来自地面的长波辐射、感热和潜热释放,因此,TP 对太阳辐射变化的反应更慢,且主要发生在以长波辐射为主的早晨和傍晚。中午高温时植物气孔大多关闭,蒸腾作用很弱或者停止,RH 受植被的影响减弱。另外,草本植物斑块的 LST 略高于草阔和灌木斑块,中午时与邻域乔木更易形成较大温差,从而降低草本植物斑块内的 LST;但这种影响不及斑块内高覆被草本植物较高的反射率对 LST 的降低效应。

本文选取的空间分布指数包括道路面积比例和距河距离。夏季白天道路与相邻植被斑块的小气候差异大多极显著。与植被下垫面相比,沥青或混凝土道路具有更低的反射率和更高的辐射吸收率,因此,白天道路的 LST 和 TP 高于相邻的植被斑块,而 RH 则较低。但道路对相邻植被斑块内不同小气候指标的影响不尽相同,LST 受影响较 TP 和 RH 更大,尤其是夏季中午和傍晚时。道路的热容量较低,夏季中午及其之后的强辐射使道路 LST 上升剧烈,道路地表成为一个明显热源,并通过空气的平流影响相邻斑块的 LST<sup>[46]</sup>。

河流对草本和灌木斑块中午的 TP 和 RH 有较大影响。距河距离每缩短 10 m,RH 最大增加 9.32%,TP 最大降低 0.89%。水体的热容量较大,吸收相同的辐射量,温度变化较慢,且温度较低。中午时,气温比较高,河水蒸发可带走一部分热量,从而降低气温、增加湿度。同时,河水易流动,热传导快,与周围区域可进行水分和热量的交换,因此,越靠近河流,TP 越低,RH 越高<sup>[17]</sup>。另外,与有高大乔木的草阔斑块相比,草本植物和灌木斑块上空较为空旷,无高大乔木遮拦,来自附近河流的大气扩散所受阻碍较小,从而可对 TP 和 RH 产生较大影响。

植被斑块的小气候不仅受到植被覆盖、植物数量和生长状况、道路面积和距河距离相关的单指数的影响,还受到这些单指数之间的组合的影响。在很多情况下,后者的影响甚至更大。例如,对草阔斑块 TP 和 RH,尽管 PAHC 单指数对其影响不大,但 PAHC 与 PATC 交互作用的影响却显著;尽管 PATC 单指数对其影响也显著,但其显著性不及 PAHC 与 PATC 的组合指数。由于影响小气候的因素非常复杂,很难说小气候是受某个单因素的影响;相反,不同因素之间的交互作用或加和作用才应成为影响小气候变化的主要方面。因此,如果某个单因素对小气候的影响不显著,可能

并不能得出该因素不影响小气候的结论,因为该因素可能与其他因素以某种非线性的形式共同影响小气候。

## 4.2 生态修复或规划建议

目前的研究区是经过人工修复后的城市河岸带生态公园,其中的修复工程建设多是基于工程技术人员的主观认识,缺少一定的生态学依据。而本文的研究结果可为将来城市河岸带或其他绿地的生态修复或规划提供一些科学依据。例如,本研究从定性和定量两方面均证明,当人们所处的环境周围乔木较多(LST 较低),或者远离道路(LST 较低)、亲近河流(TP 较低,RH 较高)时,可有效提高人们的小气候舒适感,特别是中午酷暑时。据此,可以通过采取一些直接措施(如改变植物覆盖、道路面积、距河距离),改变单个小气候指标,从而改变综合的小气候舒适感。

除直接措施外,从本研究结果也可获得一些生态修复或规划建议。例如,1)构造多层复杂植被垂直结构更有利于降低 LST 和 TP,提高 RH。2)改善某处的小气候不仅要目集于该处,也需同时关注其周边一定范围内对小气候可能产生影响的植被或道路覆盖。例如,草阔斑块周边种植乔木更有利于降低中午的 TP,提高 RH。3)鉴于小气候更多受不同因素的综合交互影响,若受客观条件的限制,无法增加某处的植物数量或面积、改善植物的长势,要提高此处的小气候舒适感,可通过改变其他植被或非植被因素来实现,或考虑周边影响。例如,草本植物高度较低时,可适当增大其种植密度。

特别地,本研究的定量结果可为实现城市环境植被类型和数量的精准配置提供重要的依据。例如,可精准地计算出要满足某处气温降低多少度的目标,需使植被面积、植株密度和高度等植被特征,以及周边植被和非植被特征指数增加或降低多少。这种精准作业可提高目前城市环境管理的效率,也可对未来数字化智慧城市的构建提供数据基础和理论依据。

## 5 结论

本研究选取 3 类斑块指数,量化植被斑块及其周边斑块的组成和空间分布,探讨在夏季早晨、中午和傍晚不同时刻影响草阔、草本植物和灌木斑块小气候的斑块特征因素。研究结果表明,与道路相比,植被斑块在白天不同时刻能显著地降

低 LST 和 TP,增大 RH,改善植被斑块的小气候;但不同类型植被斑块之间的差异不显著。夏季白天大多数时刻植被斑块的 LST、TP 和 RH 会受到斑块自身及其邻近斑块特征的共同影响,但不同时刻不同小气候指标受到的影响也存在差异。中午时,邻域乔木和道路对 LST 影响较大,河流通过影响 TP 和 RH 进而影响小气候舒适感。植被斑块的小气候不仅受到植物数量和生长状况、道路面积和距河距离相关单指数的影响,更受到不同单指数之间的交互或加和作用的影响。

# 参考文献

- [ 1 ] Analitis A, Michelozzi P, D'Ippoliti D, et al. Effects of heat waves on mortality: effect modification and confounding by air pollutants. [J]. Epidemiology, 2014, 25(1):15-22.
- [ 2 ] Tan J, Zheng Y, Song G, et al. Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003 [J]. International Journal of Biometeorology, 2007, 51(3):193-200.
- [ 3 ] Yang J, Yin P, Sun J, et al. Heatwave and mortality in 31 major Chinese cities: definition, vulnerability and implications[J]. Science of The Total Environment, 2019, 649: 695-702.
- [ 4 ] Robine J M, Cheung S L K, Le Roy S, et al. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003[J]. Comptes Rendus Biologies, 2008, 331(2): 171-178.
- [ 5 ] Kong F, Yan W, 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.
- [ 6 ] Bowler D E, Buyung-Ali L, Knight T M, et al. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 97(3): 147-155.
- [ 7 ] Wang Z H, Zhao X, Yang J, et al. Cooling and energy saving potentials of shade trees and urban lawns in a desert city[J]. Applied Energy, 2016, 161: 437-444.
- [ 8 ] Zhao Q, Sailor D J, Wentz E A. Impact of tree locations and arrangements on outdoor microclimates and human thermal comfort in an urban residential environment [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 32: 81-91.
- [ 9 ] Zhao Q, Myint S, Wentz E, et al. Rooftop surface temperature analysis in an urban residential environment[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 12135-12159.
- [ 10 ] Wang Y, Ni Z, Peng Y, et al. Local variation of outdoor thermal comfort in different urban green spaces in Guangzhou, a subtropical city in South China [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 32: 99-112.
- [ 11 ] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality

functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds[J]. Environmental Management, 1997, 21(5): 687-712.

- [ 12 ] 李婉, 张娜, 吴芳芳. 北京转河河岸带生态修复对河流水质的影响[J]. 环境科学, 2011, 32(1):80-87.
- [ 13 ] Ca V T, Asaeda T, Abu E M, et al. Reductions in air conditioning energy caused by a nearby park [J]. Energy & Buildings, 1998, 29(1):83-92.
- [ 14 ] 徐心馨, 李小娟, 孟丹. 北京市不同下垫面类型对热岛效应及人体舒适度的影响[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2013, 34(3):47-52.
- [ 15 ] 张春玲, 余华, 宫鹏, 等. 武汉市地表亮温与植被覆盖关系定量分析[J]. 地理科学, 2009, 29(5):740-744.
- [ 16 ] Olson D H, Anderson P D, Frissell C A, et al. Biodiversity management approaches for stream - riparian areas: perspectives for Pacific Northwest headwater forests, microclimates, and amphibians [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 246(1): 81-107.
- [ 17 ] Rambo T R, North M P. Spatial and temporal variability of canopy microclimate in a Sierra Nevada riparian forest [J]. Northwest Science, 2008, 82(4): 259-269.
- [ 18 ] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(4):439-448.
- [ 19 ] 李留振, 郑俊霞, 毕丽华, 等. 黄河故道滩地不同植被的湿度效应分析[J]. 江苏农业科学, 2010(4):390-392.
- [ 20 ] 刘学全, 唐万鹏, 周志翔, 等. 宜昌市城区不同绿地类型环境效应[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32(5):53-54.
- [ 21 ] 晏海. 城市公园绿地小气候环境效应及其影响因子研究 [D]. 北京:北京林业大学, 2014.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] Buyadi S N A, Mohd W M N W, Misni A. Green spaces growth impact on the urban microclimate[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 105: 547-557.
- [ 24 ] Hamada S, Ohta T. Seasonal variations in the cooling effect of urban green areas on surrounding urban areas [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2010, 9(1): 15-24.
- [ 25 ] Li J, Song C, Cao L, et al. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(12): 3249-3263.
- [ 26 ] Skelhorn C, Lindley S, Levermore G. The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: a fine scale assessment in Manchester, UK [J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 129-140.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Jaganmohan M, Knapp S, Buchmann C M, et al. The bigger, the better? The influence of urban green space design on cooling effects for residential areas [J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(1): 134-145.
- [ 29 ] Shashua-Bar L, Hoffman M E. Quantitative evaluation of

passive cooling of the UCL microclimate in hot regions in summer, case study: urban streets and courtyards with trees [J]. *Building and Environment*, 2004, 39(9): 1087-1099.

[30] 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.

[31] 李海峰. 多源遥感数据支持的中等城市热环境研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.

[32] 王红娟. 石家庄市绿地秋季温湿效应研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2014.

[33] 曹丹, 周立晨, 毛义伟, 等. 上海城市公共开放空间夏季小气候及舒适度[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(8): 1797-1802.

[34] Alexandri E, Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates [J]. *Building and Environment*, 2008, 43(4): 480-493.

[35] Sugawara H. Cool island intensity in a large urban green; seasonal variation and relationship to atmospheric condition [J]. *Meteorological Society of Japan*, 2006, 53(5): 393-404.

[36] 杜万光, 王成, 包红光, 等. 夏季典型天气下公园绿地小气候环境及对人体舒适度的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(4): 349-356.

[37] 朱文星, 邓卓智. 简述永定河城市段的生态修复[J]. *水利科技与经济*, 2012, 18(2): 19-21.

[38] 王紫琦, 张娜, 孙威, 等. 北京永定河河岸带生态修复对河流水质的影响[J]. *中国科学院大学学报*, 2015, 32(4): 498-505.

[39] 梁淑娟, 樊华, 王利军, 等. 永定河生态护岸模式的适宜性观测研究[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 153-158.

[40] 郑潇柔, 张娜. 城市河岸带夏季土壤表层温度的多时间尺度特征及其影响因素 [J]. *中国科学院大学学报*, 2016, 33(6): 758-768.

[41] 郑潇柔. 城市河岸带的美学服务和休闲服务 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.

[42] 陈灵芝, 任继凯, 鲍显诚, 等. 北京西山(卧佛寺附近)人工油松林群落学特性及生物量的研究[J]. *植物生态学报*, 1984, 8(3): 173-181.

[43] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型 [D]. 北京: 中国科学院自然资源综合考察委员会, 1996.

[44] Popkin G. The forest question [J]. *Nature*, 2019, 565(7739): 280-282.

[45] Tan C L, Wong N H, Tan P Y, et al. Impact of plant evapotranspiration rate and shrub albedo on temperature reduction in the tropical outdoor environment [J]. *Building and Environment*, 2015, 94: 206-217.

[46] 曾辉, 陈利顶, 丁圣彦. 景观生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2017.

[47] Lindberg F, Grimmond C S B. The influence of vegetation and building morphology on shadow patterns and mean radiant temperatures in urban areas: model development and evaluation [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 105(3/4): 311-323.

[48] Zhang B, Gao J, Yang Y. The cooling effect of urban green spaces as a contribution to energy-saving and emission-reduction: a case study in Beijing, China [J]. *Building and Environment*, 2014, 76: 37-43.