综述
Review

绿地空间暴露与人群健康效应的研究进展

张丽娜，陈仁杰，孟夏，阚海东

复旦大学公共卫生学院环境卫生学教研室，上海 200032

摘要：

研究发现绿地空间暴露对人群健康有保护作用，但国内相关领域研究开展较少。本文通过土地利用、卫星遥感、街景等不同类型数据来阐述目前主要的绿地空间暴露评估方法、研究设计，同时梳理绿地空间暴露相关的急性、慢性健康效应研究进展。目前的流行病学研究进展具有以下特点：1）多数研究集中在发达国家，发展中国家研究较少；2）绿地空间暴露对妊娠期、婴儿期、青少年期、成年期及老年期等生命周期不同阶段的健康结局可能都具有健康效应；3）绿地空间暴露对增加出生体重和降低死亡率等方面的保护作用结论较一致，但与其他健康结局的关联尚不一致；4）目前绿地空间暴露健康效应的作用机制尚不清晰。

关键词：绿地空间；暴露评估；急性效应；慢性效应

Research progress on exposure and health effects of green space ZHANG Lina, CHEN Renjie, MENG Xia, KAN Haidong (Department of Environmental Health, School of Public Health, Fudan University, Shanghai 200032, China)

Abstract:

Accumulating studies suggest that green space exposure is related to a variety of health benefits; however, limited studies have been conducted in China. We reviewed the methods of exposure assessment, study designs, and main findings of previous studies regarding to green space exposure and its acute and chronic health effects. In the aspect of exposure assessments, different types of indicators were employed in the epidemiological studies, such as land use types of green space, greenness index retrieved from satellite remote sensing data, and green space expsosure data extracted from the images of street view. Epidemiological studies of green space exposure have the following features: 1) The majority of the studies were conducted in developed countries rather than developing ones; 2) Green space exposure was suggested to have potential health effects in various stages of the life cycle from pregnancy, infancy, adolescence, adulthood to senior years; 3) Results were consistent that exposure to green space might improve birth weight and be protective against mortality, whereas failed to be consistent on other health outcomes; 4) The mechanisms of health benefits of green space were still unclear.

Keywords: green space; exposure assessment; acute health effect; chronic health effect

2017年世界人口已高达75亿，约55%的人口居住在城市地区，预计2050年这一数据将增加至68%，新增城市人口主要集中在印度、中国等国家[1]。全球城市化进程的加快，导致城市绿地空间不同程度的丧失[2]。城市环境已被认定为影响人群健康的一个关键因素[3]，也可能是减少健康不平等的关键因素[4]。亲生物假说支持者认为人类具有一种与自然环境联系的本能需求，多位学者提出心理-生理压力减轻理论和注意力修复理论，认为自然环境对人的心理或生理健康具有修复作用[5-7]。国际上开始逐渐重视绿地空间的发展，如世界卫生组织欧洲区成员国承诺，到2020年向每个儿童提供玩耍和运动的绿色空间；联合国可持续发展目标提出，到2030年向所有人提供安全、包容、无障碍、绿色的公共空间。

目前绿地空间尚无统一的定义。城市绿地可以包括具有自然环境的绿地空间，也可以包括特定类型的城市绿地（如行道树），还可能是包括水元素的“蓝

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2021.20386

基金项目
国家自然科学基金项目（91643205）

作者简介
张丽娜（1988—），女，博士生，工程师；
E-mail：19111020024@fudan.edu.cn

通信作者
孟夏，E-mail：mengxia@fudan.edu.cn
阚海东，E-mail：kanh@fudan.edu.cn

伦理审批 不需要
利益冲突 无申报
收稿日期 2020-08-09
录用日期 2020-12-07

文章编号 2095-9982(2021)02-0175-08
中图分类号 R126
文献标志码 A

▸引用
张丽娜，陈仁杰，孟夏，等.绿地空间暴露与人群健康效应的研究进展[J].环境与职业医学，2021，38（2）：175-182.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20386

Funding
This study was funded.

Correspondence to
MENG Xia, E-mail: mengxia@fudan.edu.cn
KAN Haidong, E-mail: kanh@fudan.edu.cn

Ethics approval Not required
Competing interests None declared
Received 2020-08-09
Accepted 2020-12-07

▸To cite
ZHANG Lina, CHEN Renjie, MENG Xia, et al. Research progress on exposure and health effects of green space[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(2): 175-182.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2021.20386

色空间”。欧洲城市地图集[8]将绿地空间定义为主要用于休闲娱乐的公共绿地，如花园、动物园、公园、自然保护区和森林。美国国家环境保护局在环境地图集中，将绿地空间定义为所有植被覆盖的区域，包括耕地、草地、林地、湿地和公园[9]。狭义的绿地空间定义中并没有纳入水体。

许多研究发现绿地暴露对人群健康有保护作用[10-16]，主要通过降低空气污染、热、噪声，减轻精神和生理上的压力，增加锻炼和社交等作用机制来改善健康结局[17]。绿地空间也可能引起致病效应，如触发过敏、哮喘等疾病，增加杀虫剂和除草剂的暴露及媒介传播疾病风险等[18]。此外，绿地空间还可能增加房地产价值，吸引投资，减少空气污染及极端天气等影响[19-20]。

尽管大多研究表明绿地空间暴露与健康效应存在关联，但多数研究集中在欧美等发达国家，国内相关研究较少。因此，本文主要回顾及总结绿地空间暴露评价方法，及其相关的急性、慢性健康效应，为今后我国开展相关研究提供理论参考。

1 绿地空间暴露评估进展

本部分旨在总结现有研究中使用的不同绿地空间暴露评价指标以及定量评估方法。

1.1 绿地空间暴露评价指标

早期开展的绿地空间健康效应评估主要是基于土地利用类型[21-22]，包括耕地、林地、城市绿地等。如瑞士国家队列研究中，以耕地、林地、公园等用地分类在缓冲区（以家庭住址为中心，以一定距离为半径的区域）内的面积占比作为暴露评价指标[23]。

随着卫星遥感技术的发展，越来越多研究利用卫星遥感数据反演区域内绿色植被覆盖情况作为绿地空间的暴露评价指标。如搭载在Terra和Aqua卫星的中分辨率成像光谱仪反演的归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）具有中等水平的空间分辨率（250 m或1 000 m），适合国家等大尺度研究[10, 24]；美国陆地卫星Landsat 8搭载的陆地成像仪计算的NDVI具有较高的空间分辨率（30 m），适合城市等小尺度研究[25-29]。志愿者与最近绿地空间的距离亦可以作为一项暴露指标[30-31]。人工智能的快速发展使得机器学习在绿地空间暴露评估中成为可能，如北京、香港等地利用街景数据提取人视线范围内绿地空间暴露数据[32-33]。

综上，土地利用数据获取周期长、不规律、可比性差；遥感卫星数据易得、数据源统一、可比性强，目前研究大多基于此暴露数据。未来可结合多类型指标来反映城市、区域、国家等不同尺度上绿地空间暴露的特异性。

1.2 绿地空间暴露评价方法

目前大多数研究都是基于家庭地址等固定位置量化研究对象暴露于绿地空间的强度，如美国国家前瞻性护士队列基于志愿者家庭地址的暴露评估[10]。该方法简单易行，但是忽视了研究对象在不同空间位置的绿地空间暴露变异性。目前已有研究考虑了这种暴露差异，如Dadvand等[34]在对小学生认知功能评价中，通过分别计算学校、家、通勤不同空间位置的绿地暴露，并假定各位置的暴露时间，来加权总的绿地空间暴露；进一步通过全球定位系统、手机等便携式仪器记录个体运动轨迹，通过计算研究对象在分钟水平上各个位置的绿地空间暴露，可以提高个体暴露评估的准确性，该绿地空间暴露评估方法匹配精度高，能够有效降低个体暴露的错分[35-36]，但是对人力财力的要求较高，限制了其在流行病学研究中的广泛应用。

1.3 绿地空间暴露评价指标与环境变量的关系

自然绿地环境中往往空气质量好、噪声少，很多研究也表明绿地空间暴露评价指标与空气污染、交通噪声等呈负相关关系[21, 37-38]。荷兰全国调查研究发现，绿地空间暴露与NO_2和交通噪声等污染暴露呈中等程度负相关，与$PM_{2.5}$呈微弱负相关[39]；在西班牙巴塞罗那的一项研究中也发现，$PM_{2.5}$和NO_2与绿地空间暴露评价指标NDVI呈负相关关系[38]。绿地可能以沉降或净化的方式降低空气污染物水平[19, 40-41]。

2 流行病学研究进展

绿地空间暴露的健康效应研究正逐渐成为公共卫生与环境科学等多学科交叉的一个新研究热点，本部分旨在总结绿地空间暴露相关的急性、慢性健康效应研究进展。

2.1 急性健康效应

目前开展的绿地空间暴露相关的急性健康效应研究多为基于真实自然环境的研究，如随机对照试验等；还有一些是基于模拟室外环境的室内暴露研究，可操作性更强，如利用虚拟现实技术等。

2.1.1 自然绿地空间 Grazuleviciene等[42]在立陶宛冠心病患者中开展随机对照研究，随机安排研究对象在

公园和城市街道每天步行30 min，连续7 d；与基线值相比，第7天，公园组研究对象在运动后3 h血压降低，心率恢复率增加，而城市街道组中并未发现其间的关联。Triguero-Mas等[43]在西班牙巴塞罗那地区开展随机病例交叉试验，探索有心理困扰迹象的人群暴露于不同环境（公园、海滩、城市）后心理、生理指标变化；与城市环境暴露相比，暴露于公园环境的研究对象唾液皮质醇水平和总情绪干扰得分均降低。我国也有类似研究。北京大学在健康人群（游客）中开展的自身前后对照研究中发现，短期暴露于森林公园能够明显改善人体心肺及心理健康指标[44]。上述研究结果表明，短期暴露于自然绿地环境可有效改善人体生理及心理指标。目前此类随机对照试验多集中于发达国家，在发展中国家开展较少，因此未来可在不同国家、地区和不同人群中广泛开展，以验证短期暴露于自然绿地空间的急性健康效应的一致性。

2.1.2 虚拟绿地空间　有研究对比了短期暴露于真实绿地环境及虚拟绿地环境产生的急性健康效应，发现两种暴露情况的健康效应相似，即暴露于虚拟绿地空间也可以改善人体心理及生理指标[45-47]。但是基于虚拟绿地空间的暴露研究并没有考虑空气污染、体育锻炼和社交等中介因素的间接影响，因此利用虚拟环境观察到的健康效应的改善或许不能完全反映真实绿地暴露对健康的影响。

一项研究利用虚拟现实技术记录北京7种不同类型的森林休息环境，对比受试者观看视频前后的血压、心率、唾液淀粉酶和情绪状态等生理和心理指标，发现不同类型的森林都具有减压作用，但程度不尽相同[48]。然而其他利用虚拟现实技术的研究发现，观看不同绿地类型的全景照片后，除消极情绪外，未发现不同景观类型间研究对象的其他生理和心理指标有差异[49]。目前虚拟现实技术市场发展尚不成熟，大多试验采用的虚拟自然环境为全景照片等静态图像，缺乏志愿者沉浸式体验描述，横向可比性差，因此未来可增加动态全景影像的对比，增加对志愿者观感评价，也建议将研究视频作为数据资料分享。

目前绿地空间暴露的急性效应研究较少，且多为绿地空间暴露与人群生理、心理健康效应关联性研究，结论尚不一致。关于绿地空间暴露急性效应因果作用机制的研究较少，仍需进一步探索和验证。

2.2 慢性健康效应

近十年绿地空间暴露的慢性健康效应研究逐渐增加，生态学研究是采用的主要研究方式之一。队列研究的逐渐增多为探索绿地空间的保护作用提供了更强的因果推断证据。

2.2.1 生态学研究　多数绿地空间暴露与人群健康效应的生态学研究发现绿地暴露与健康结局相关，也有部分研究结果未发现二者具有相关性。英国一项基于人口普查数据的横断面研究发现，增加绿地空间面积与良好的健康状况相关，且该关联受该地区的城市化水平和收入水平影响[22]。英国生物样本库队列的基线研究纳入了英国22个城市的94 879名志愿者，研究发现随着绿地空间暴露增加，抑郁症患病风险降低[50]。美国马萨诸塞州出生登记数据研究表明，绿地空间暴露增加与低出生体重及小于胎龄儿发生风险降低相关[51]。基于德国出生队列数据的一项横断面研究在慕尼黑（城市）和韦瑟尔（农村）两地对10岁儿童的血压进行分析，发现绿地高暴露区儿童血压低于中低暴露区，而且这一关联在城市地区有统计学意义，在农村地区无统计学意义[52]。基于立陶宛考纳斯市孕妇队列的横断面研究发现，只有当母亲受教育程度较低时，儿童的心理健康才与绿地空间暴露呈正相关关系[30]。

国内开展的横断面研究主要有东北十四城市系列研究，研究发现绿地空间暴露的增加与代谢综合征、高血压、高血脂、糖尿病等疾病患病风险降低相关[27, 53-55]，并且研究分析了空气污染、体育锻炼和体重指数在其中的中介效应。如在糖尿病与绿地暴露关联研究[53]中，作者根据已有证据假设空气污染是糖尿病的危险因素，而绿地空间的空气污染浓度较低，因此绿地对糖尿病的保护作用可能一部分是由于较低的室外空气污染暴露导致的，即空气污染可能中介了部分绿地暴露对糖尿病的效应，进一步的分析发现空气污染中介了6.9%~51.1%的绿地暴露与糖尿病及葡萄糖稳态标志物的关联，体重指数中介了8.6%~78.8%的上述关联，没有发现体育锻炼在其中的中介作用。此外，在东北七个城市开展的横断面研究发现，绿地空间能够明显降低研究对象的血压[56]，改善儿童的注意缺陷多动障碍[57]。

绿地空间往往伴随着较低的空气污染和噪声水平，有研究对单一暴露和混合暴露下绿地空间的健康效应进行了探索。如在荷兰全国调查研究中，分别分析了单一暴露及混合暴露于绿地空间、空气污染和噪声与不良健康状态（差/非常差）之间的关联，发现混

合暴露的健康效应估计值高于单一暴露[39]。在另一项荷兰全国心理健康与综合暴露关联研究中也得到类似结论，对于这些相关的暴露因素，单一暴露研究可能高估了这一暴露因素对不良心理健康结局的影响，同时低估了综合暴露因素的影响[58]。

横断面研究主要探索绿地空间暴露与不同健康结局的关联，但是目前国家尺度的相关研究较少。未来可探索多城市、多国家等不同尺度下绿地空间暴露的健康效应。另外，绿地空间、空气污染和噪声等混合暴露的健康效应也值得探索。

2.2.2 队列研究 绿地空间暴露对妊娠期、婴儿期、青少年、成年、老年等生命周期不同阶段的健康结局都会产生影响，而且童年及成年时期绿地空间暴露更多，可能会减缓研究对象在老年期认知功能下降的速度[59]。

基于出生队列关注妊娠期、婴儿期、青少年等阶段的健康结局的研究较多，且大多在欧美等发达国家开展。西班牙四个城市的出生队列研究发现，绿地空间暴露增加与胎儿出生体重和头围增加相关，在调整缓冲区、季节暴露窗口和地域后，结论仍然稳健，但对于孕周影响无统计学意义[60]。在加拿大和德国开展的出生队列研究也发现，绿地空间暴露增加与出生体重增加相关[61-62]。然而，另一项基于医院出生队列的研究发现，绿地空间暴露与出生体重和孕周无关，但对孕妇的教育水平进行分层分析时发现，未受过教育的孕妇绿地空间暴露增加与婴儿出生体重增加相关[11]。西班牙超细颗粒物与小学生大脑发展队列（Brain Development and Air Pollution Ultrafine Particles in School Children，BREATH）的一个子队列对36所小学生认知行为进行研究发现，绿地空间高暴露有助于提高记忆，其中交通相关的空气污染物起到一定的中介效应[34]。BREATH队列的另一个子队列基于3岁儿童的3D磁共振成像，探索儿童自出生以来住宅绿地空间暴露与大脑容量（灰质和白质体积）的关联，研究发现绿地暴露与灰质、白质体积呈正相关，作者推断绿地空间暴露通过增加大脑容量来影响大脑认知[63]。德国婴儿营养干预与环境和基因对过敏影响的研究（German Infant Study on the Influence of Nutrition Intervention plus Environmental and Genetic Influences on Allergy Development，GINIplus）以及生活方式与交通尾气排放和基因对免疫系统发育和过敏影响的研究（Influence of Life-Style Factors on the Development of the Immune System and Allergies in East and West Germany plus the Influence of Traffic Emissions and Genetics，LISAplus）发现，距离绿地远的儿童比近的儿童有更多的行为问题，如多动症、注意力不集中等，但是基于卫星反演的植被指数却未发现上述关联[31]。在这两个出生队列的儿童随访中，未发现绿地空间暴露与血脂水平相关联[64]。在这两个出生队列招募的青少年中，同时考虑空气污染及绿地空间时，高绿地空间暴露致低胰岛素抵抗稳态模式可能归因于NO_2的低暴露[37]。在一项包含多个国家总计7个出生队列研究的荟萃分析中，并未发现绿地空间暴露与过敏性鼻炎和空气过敏原致敏的关联，其中在瑞典和德国南部队列中绿地空间暴露与过敏性鼻炎呈正相关，而在荷兰和德国北部队列中两者呈负相关，在加拿大队列中并没有观察到两者间的关联[65]。国内目前只有武汉开展了关注绿地空间暴露的出生队列研究，研究发现绿地空间高暴露增加2岁儿童神经发育指标得分[66]，并且随着绿地空间暴露的增加，妊娠期血糖耐受量及糖尿病的发病风险降低[67]。总体而言，基于出生队列的绿地健康效应研究多集中于欧美等发达国家，发展中国家开展较少，且不同国家、地区结论尚不一致。

已有的成年队列研究主要关注死亡率和心血管疾病的健康结局。在一项基于死亡率与绿地空间暴露关联队列的荟萃分析中发现，植被指数每升高0.1，全因死亡率下降4%[68]。在美国国家前瞻性护士队列中发现，随着绿地空间暴露升高，死亡率（尤其是呼吸道疾病和癌症死亡率）下降[10]。瑞士国家队列结果表明，绿地空间暴露独立影响死亡率，降低自然死因、呼吸系统和心脑血管系统疾病死亡率[23]。加拿大和罗马的队列研究也发现了类似结果[69-70]。

老年队列研究中关注的健康结局除了死亡率和患病率外，还包括老年认知功能衰退。如英国公务员队列研究发现，在绿地空间高暴露人群中认知功能衰退速度更慢，代谢综合征患病风险降低[28, 71]。美国医保队列研究发现，在65岁以上人群中绿地空间暴露指标NDVI每增加0.1，糖尿病、高血压和高脂血症的患病风险分别下降8%、7%和6%，并且低收入老年人群中的关联高于高收入老年人群[72]。中国老年人健康长寿队列研究发现，与同期最低暴露组相比，最高绿地暴露组死亡率降低27%[24]。中国香港的老年人队列发现，绿地空间高暴露可以降低全因死亡率、循环系统疾病引起的死亡率及中风引起的死亡率[73]。随

着我国人口老龄化及其慢病负担的急剧增加，绿地对老年人口的健康效应研究具有非常重要的现实意义。

队列研究发现绿地空间暴露对出生体重、死亡率具有保护作用的结论较一致，但其他健康结局效应尚不一致。关注儿童和老年人等特殊人群的绿地空间暴露健康效应的研究较多。但是目前大多研究主要关注绿地空间暴露与健康结局的关联性，潜在的机制通路仍不清晰。

3 总结及展望

目前，大多数绿地空间暴露与人群健康效应的流行病学研究都集中在发达国家，发展中国家的研究处于起步阶段。暴露方面，单一指标暴露评价较多，如仅仅利用卫星植被指数数据或土地利用数据；多指标暴露综合评价较少，如结合遥感卫星植被指数数据、土地利用数据、街景数据等。另外，多数研究都是基于研究对象的家庭地址等单一环境进行绿地空间暴露评价，但是只有少数研究考虑了不同空间位置时间加权的精确暴露评估方法。健康效应方面，大量研究表明绿地空间暴露对妊娠期到老年整个生命周期不同阶段的健康结局均有影响，如对出生结局、神经发育、行为问题、心理健康、患病、死亡等健康结局可能具有保护作用，尤其是在增加出生体重、降低死亡率等方面研究结论较一致。机制方面，目前主要认为绿地空间暴露可以通过降低空气污染，增强体育锻炼及社交活动来改善健康结局。大多数研究都在探索绿地空间暴露与不同健康结局的关联，而两者是否具有因果关系仍须深入研究。

未来流行病学研究中可考虑采用综合指标对绿地暴露进行暴露评价，例如依托遥感卫星和人工智能信息技术手段对绿地空间质量（如植被丰富度等）和类型（如植被类型等）进行综合的定性及定量评估；借助实验性研究或前瞻性队列研究等因果论证效力较强的研究设计，探索绿地空间对健康影响的潜在机制。建立绿地空间与健康效应的暴露-反应关系，可有力支撑“增加绿地空间，提高健康水平”的干预措施。绿地空间暴露与人群健康效应的研究虽处在起步阶段，但其未来可能在减轻疾病负担，减少健康不平等性和提高居民生活质量等方面具有深远的意义。

参考文献

[1] United Nations. World urbanization prospects：the 2018 revision [EB/OL]. [2020-07-09]. https://www.un.org/development/desa/pd/content/world-urbanization-prospects-2018-revision

[2] HAALAND C，VAN DEN BOSCH CK. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification：a review [J]. Urban For Urban Green，2015，14 (4)：760-771.

[3] NIEUWENHUIJSEN MJ. Urban and transport planning，environmental exposures and health-new concepts，methods and tools to improve health in cities [J]. Environ Health，2016，15 (S1)：S38.

[4] MITCHELL R，POPHAM F. Effect of exposure to natural environment on health inequalities：an observational population study [J]. Lancet，2008，372 (9650)：1655-1660.

[5] CLATWORTHY J，HINDS J，CAMIC PM. Gardening as a mental health intervention：a review [J]. Mental Health Rev J，2013，18 (4)：214-225.

[6] KAPLAN S. The restorative benefits of nature-toward an integrative framework [J]. J Environ Psychol，1995，15 (3)：169-182.

[7] ULRICH RS，SIMONS RF，LOSITO BD，et al. Stress recovery during exposure to natural and urban environments [J]. J Environ Psychol，1991，11 (3)：201-230.

[8] European Union Agency. Mapping guide for a European urban atlas [R]. Copenhagen：European Environment Agency，2010.

[9] PICKARD BR，DANIEL J，MEHAFFEY M，et al. EnviroAtlas：a new geospatial tool to foster ecosystem services science and resource management [J]. Ecosyst Serv，2015，14：45-55.

[10] JAMES P，HART JE，BANAY RF，et al. Exposure to greenness and mortality in a nationwide prospective cohort study of women [J]. Environ Health Perspect，2016，124 (9)：1344-1352.

[11] DADVAND P，DE NAZELLE A，FIGUERAS F，et al. Green space，health inequality and pregnancy [J]. Environ Int，2012，40：110-115.

[12] MCEACHAN RR，PRADY SL，SMITH G，et al. The association between green space and depressive symptoms in pregnant women：moderating roles of socioeconomic status and physical activity [J]. J Epidemiol Commun Health，2016，70 (3)：253-259.

[13] FONG K C，HART J E，JAMES P. A review of epidemiologic studies on greenness and health：updated literature through 2017 [J]. Curr Environ Health Rep，2018，5 (1)：77-87.

[14] JAMES P，BANAY R F，HART J E，et al. A review of the health benefits of greenness [J]. Curr Epidemiol Rep，2015，2 (2)：131-142.

[15] EGOROV A I，GRIFFIN S M，CONVERSE R R，et al. Vegetated land cover near residence is associated with reduced allostatic load and improved biomarkers of neuroendocrine，metabolic and immune functions [J]. Environ Res，2017，158：508-521.

[16] YEAGER R，RIGGS D W，DEJARNETT N，et al. Association between residential greenness and cardiovascular disease risk [J]. J Am Heart Assoc，2018，7 (24)：e009117.

[17] MARKEVYCH I，SCHOIERER J，HARTIG T，et al. Exploring pathways linking greenspace to health：theoretical and methodological guidance [J]. Environ Res，2017，158：301-317.

[18] WHO. Urban green spaces and health- a review of evidence (2016) [R]. Copenhagen：WHO Regional Office for Europe，2016.

[19] NOWAK D J，CRANE D E，STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. Urban For Urban Green，2006，4 (3/4)：115-123.

[20] WACHTER S M，WONG G. What is a tree worth? Green-city strategies，signaling and housing prices [J]. Real Estate Econ，2008，36 (2)：213-239.

[21] GASCON M，SÁNCHEZ-BENAVIDES G，DADVAND P，et al. Long-term exposure to residential green and blue spaces and anxiety and depression in adults：a cross-sectional study [J]. Environ Res，2018，162：231-239.

[22] MITCHELL R，POPHAM F. Greenspace，urbanity and health：relationships in England [J]. J Epidemiol Commun Health，2007，61 (8)：681-683.

[23] VIENNEAU D，DE HOOGH K，FAEH D，et al. More than clean air and tranquillity：residential green is independently associated with decreasing mortality [J]. Environ Int，2017，108：176-184.

[24] JI J S，ZHU A，BAI C，et al. Residential greenness and mortality in oldest-old women and men in China：a longitudinal cohort study [J]. Lancet Planet Health，2019，3 (1)：e17-e25.

[25] DZHAMBOV A，HARTIG T，MARKEVYCH I，et al. Urban residential greenspace and mental health in youth：different approaches to testing multiple pathways yield different conclusions [J]. Environ Res，2018，160：47-59.

[26] DZHAMBOV A M，MARKEVYCH I，HARTIG T，et al. Multiple pathways link urban green- and bluespace to mental health in young adults [J]. Environ Res，2018，166：223-233.

[27] YANG B Y，LIU K K，MARKEVYCH I，et al. Association between residential greenness and metabolic syndrome in Chinese adults [J]. Environ Int，2020，135：105388.

[28] DE KEIJZER C，BASAGAÑA X，TONNE C，et al. Long-term exposure to greenspace and metabolic syndrome：a Whitehall II study [J]. Environ Pollut，2019，255：113231.

[29] DE KEIJZER C，TONNE C，SABIA S，et al. Green and blue spaces and physical functioning in older adults：longitudinal analyses of the Whitehall II study [J]. Environ Int，2019，122：346-356.

[30] BALSEVICIENE B，SINKARIOVA L，GRAZULEVICIENE R，et al. Impact of residential greenness on preschool children's emotional and behavioral problems [J]. Int J Environ Res Public Health，2014，11 (7)：6757-6770.

[31] MARKEVYCH I，TIESLER C M，FUERTES E，et al. Access to urban green spaces and behavioural problems in children：results from the GINIplus and LISAplus studies [J]. Environ Int，2014，71：29-35.

[32] HELBICH M，YAO Y，LIU Y，et al. Using deep learning to examine street view green and blue spaces and their associations with geriatric depression in Beijing，China [J]. Environ Int，2019，126：107-117.

[33] LU Y. The association of urban greenness and walking behavior：using google street view and deep learning techniques to estimate residents' exposure to urban greenness [J]. Int J Environ Res Public Health，2018，15 (8)：1576.

[34] DADVAND P，NIEUWENHUIJSEN M J，ESNAOLA M，et al. Green spaces and cognitive development in primary schoolchildren [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2015，112 (26)：7937-7942.

[35] JAMES P，HART J E，HIPP J A，et al. GPS-based exposure to greenness and walkability and accelerometry-based physical activity [J]. Cancer Epidemiol，Biomarkers Prev，2017，26

(4)：525-532.

[36] TRIGUERO-MAS M，DADVAND P，CIRACH M，et al. Natural outdoor environments and mental and physical health：relationships and mechanisms [J]. Environ Int，2015，77：35-41.

[37] THIERING E，MARKEVYCH I，BRÜSKE I，et al. Associations of residential long-term air pollution exposures and satellite-derived greenness with insulin resistance in German adolescents [J]. Environ Health Perspect，2016，124 (8)：1291-1298.

[38] DADVAND P，DE NAZELLE A，TRIGUERO-MAS M，et al. Surrounding greenness and exposure to air pollution during pregnancy：an analysis of personal monitoring data [J]. Environ Health Perspect，2012，120 (9)：1286-1290.

[39] KLOMPMAKER J O，JANSSEN N A，BLOEMSMA L D，et al. Residential surrounding green，air pollution，traffic noise and self-perceived general health [J]. Environ Res，2019，179：108751.

[40] KROEGER T，ESCOBEDO F J，HERNANDEZ J L，et al. Reforestation as a novel abatement and compliance measure for ground-level ozone [J]. Proc Natl Acad Sci USA，2014，111 (40)：E4204-E4213.

[41] PAOLETTI E，BARDELLI T，GIOVANNINI G，et al. Air quality impact of an urban park over time [J]. Procedia Environ Sci，2011，4：10-16.

[42] GRAZULEVICIENE R，VENCLOVIENE J，KUBILIUS R，et al. The effect of park and urban environments on coronary artery disease patients：a randomized trial [J]. BioMed Res Int，2015，2015：403012.

[43] TRIGUERO-MAS M，GIDLOW C J，MARTÍNEZ D，et al. The effect of randomised exposure to different types of natural outdoor environments compared to exposure to an urban environment on people with indications of psychological distress in Catalonia [J]. PLoS One，2017，12 (3)：e0172200.

[44] 楚梦天，南海龙，马莹，等. 北京市城市森林环境中人群心肺功能及心理情绪相关指标的短期变化 [J]. 环境与职业医学，2020，37 (2)：162-167，180.
CHU M T，NAN H L，MA Y，et al. Short-term changes of cardiopulmonary functions and psycho-emotional indicators of general population in urban forest environment in Beijing [J]. J Environ Occup Med，2020，37 (2)：162-167，180.

[45] YIN J，ZHU S，MACNAUGHTON P，et al. Physiological and cognitive performance of exposure to biophilic indoor environment [J]. Buil Environ，2018，132：255-262.

[46] BROWNING M H，MIMNAUGH K J，VAN RIPER C J，et al. Can simulated nature support mental health? Comparing short，single-doses of 360-degree nature videos in virtual reality with the outdoors [J]. Front Psychol，2020，10：2667.

[47] WHITE M P，YEO N L，VASSILJEV P，et al. A prescription for "nature"–the potential of using virtual nature in therapeutics [J]. Neuropsychiatr Dis Treat，2018，14：3001-3013.

[48] WANG X，SHI Y，ZHANG B，et al. The influence of forest resting environments on stress using virtual reality [J]. Int J Environ Res Public Health，2019，16 (18)：3263.

[49] GAO T，ZHANG T，ZHU L，et al. Exploring psychophysiological restoration and individual preference in the different environments based on virtual reality [J]. Int J Environ Res Public Health，2019，16 (17)：3102.

[50] SARKAR C，WEBSTER C，GALLACHER J. Residential greenness and prevalence of major depressive disorders：a cross-sectional，observational，associational study of 94 879 adult UK Biobank participants [J]. Lancet Planet Health，2018，2 (4)：E162-E73.

[51] FONG K C，KLOOG I，COULL B A，et al. Residential greenness and birthweight in the state of Massachusetts，USA [J]. Int J Environ Res Public Health，2018，15 (6)：1248.

[52] MARKEVYCH I，THIERING E，FUERTES E，et al. A cross-sectional analysis of the effects of residential greenness on blood pressure in 10-year old children：results from the GINIplus and LISAplus studies [J]. BMC Public Health，2014，14 (1)：477.

[53] YANG B Y，MARKEVYCH I，HEINRICH J，et al. Associations of greenness with diabetes mellitus and glucose-homeostasis markers：the 33 Communities Chinese Health Study [J]. Int J Hyg Environ Health，2019，222 (2)：283-290.

[54] YANG B Y，MARKEVYCH I，BLOOM M S，et al. Community greenness，blood pressure，and hypertension in urban dwellers：the 33 Communities Chinese Health Study [J]. Environ Int，2019，126：727-734.

[55] YANG B Y，MARKEVYCH I，HEINRICH J，et al. Residential greenness and blood lipids in urban-dwelling adults：the 33 Communities Chinese Health Study [J]. Environ Pollut，2019，250：14-22.

[56] XIAO X，YANG B Y，HU L W，et al. Greenness around schools

associated with lower risk of hypertension among children：findings from the seven northeastern cities study in China [J]. Environ Pollut，2020，256：113422.

[57] YANG B Y，ZENG X W，MARKEVYCH I，et al. Association between greenness surrounding schools and kindergartens and attention-deficit/hyperactivity disorder in children in China [J]. JAMA Netw Open，2019，2 (12)：e1917862.

[58] KLOMPMAKER J O，HOEK G，BLOEMSMA L D，et al. Associations of combined exposures to surrounding green，air pollution and traffic noise on mental health [J]. Environ Int，2019，129：525-537.

[59] CHERRIE M P，SHORTT N K，MITCHELL R J，et al. Green space and cognitive ageing：a retrospective life course analysis in the Lothian Birth Cohort 1936 [J]. Soc Sci Med，2018，196：56-65.

[60] DADVAND P，SUNYER J，BASAGAÑA X，et al. Surrounding greenness and pregnancy outcomes in four Spanish birth cohorts [J]. Environ Health Perspect，2012，120 (10)：1481-1487.

[61] HYSTAD P，DAVIES H W，FRANK L，et al. Residential greenness and birth outcomes：evaluating the influence of spatially correlated built-environment factors [J]. Environ Health Perspect，2014，122 (10)：1095-1102.

[62] MARKEVYCH I，FUERTES E，TIESLER C M，et al. Surrounding greenness and birth weight：results from the GINIplus and LISAplus birth cohorts in Munich [J]. Health Place，2014，26：39-46.

[63] DADVAND P，PUJOL J，MACIÀ D，et al. The association between lifelong greenspace exposure and 3-dimensional brain magnetic resonance imaging in Barcelona schoolchildren [J]. Environ Health Perspect，2018，126 (2)：027012.

[64] MARKEVYCH I，STANDL M，SUGIRI D，et al. Residential greenness and blood lipids in children：a longitudinal analysis in GINIplus and LISAplus [J]. Environ Res，2016，151：168-173.

[65] FUERTES E，MARKEVYCH I，BOWATTE G，et al. Residential greenness is differentially associated with childhood allergic rhinitis and aeroallergen sensitization in seven birth cohorts [J]. Allergy，2016，71 (10)：1461-1471.

[66] LIAO J，ZHANG B，XIA W，et al. Residential exposure to green space and early childhood neurodevelopment [J]. Environ Int，2019，128：70-76.

[67] LIAO J，CHEN X，XU S，et al. Effect of residential exposure to green space on maternal blood glucose levels，impaired glucose tolerance，and gestational diabetes mellitus [J]. Environ Res，2019，176：108526.

[68] ROJAS-RUEDA D，NIEUWENHUIJSEN M J，GASCON M，et al. Green spaces and mortality：a systematic review and meta-analysis of cohort studies [J]. Lancet Planet Health，2019，3 (11)：E469-E477.

[69] ORIOLI R，ANTONUCCI C，SCORTICHINI M，et al. Exposure to residential greenness as a predictor of cause-specific mortality and stroke incidence in the Rome longitudinal study [J]. Environ Health Perspect，2019，127 (2)：27002.

[70] VILLENEUVE P J，JERRETT M，SU J G，et al. A cohort study relating urban green space with mortality in Ontario，Canada [J]. Environ Res，2012，115：51-58.

[71] DE KEIJZER C，TONNE C，BASAGAÑA X，et al. Residential surrounding greenness and cognitive decline：a 10-year follow-up of the Whitehall II Cohort [J]. Environ Health Perspect，2018，126 (7)：077003.

[72] BROWN S C，LOMBARD J，WANG K，et al. Neighborhood greenness and chronic health conditions in Medicare beneficiaries [J]. Am J Prev Med，2016，51 (1)：78-89.

[73] WANG D，LAU K K，YU R，et al. Neighbouring green space and mortality in community-dwelling elderly Hong Kong Chinese：a cohort study [J]. BMJ Open，2017，7 (7)：e015794.

（英文编辑：汪源；责任编辑：汪源）