

DOI: 10.5846/stxb201909051853

郝璐,孙阁.城市化对流域生态水文过程的影响研究综述.生态学报,2021,41(1):13-26.

Hao L., Sun G. Impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes: progresses and perspectives. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 13-26.

城市化对流域生态水文过程的影响研究综述

郝 璐^{1,*}, 孙 阁²

1 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室,气象灾害教育部重点实验室,南京 210044

2 美国农业部林业局南方研究站,东部森林环境威胁评估中心,北卡罗来纳州 27709

摘要:了解流域水文过程(水量和水质)是流域综合管理的基础。城市化引起的生态环境问题已成为目前和未来一段相当长的时期内人类社会面临的重大问题。然而,城市化(土地利用/覆被变化、新污染物产生)、水文(降水、入渗、蒸散、径流过程)和生态系统服务(产水服务、调节气候、土壤保持、初级生产力、维持生物多样性等)在不同时空尺度之间的相互作用还存在知识空白。从城市化对流域生态系统结构和功能的影响、城市化对地表能量平衡与水量平衡的影响、城市化对水质和水生生物的影响、以及城市土地利用/覆被变化的大气环境效应等多方面系统总结了城市化影响流域生态水文过程的研究进展。研究发现,城市“热岛”、“干岛”、暴雨径流引起的城市内涝、水污染等环境现象都与生态水文过程密切相关。强调现代城市规划需要遵循生态水文学规律,从全流域生态系统角度认识近年来新出现的不同尺度的城市环境效应。城市最佳管理措施应以流域为单元实施,以调节土地利用/覆被、保护湿地(包括自然与人工湿地)为手段,充分发挥自然生态系统调节功能(如植被蒸散和净化水质)。未来城市生态水文学应围绕“低影响开发”以及“基于自然的解决方案”等城市流域管理措施,在稳定城市小气候、缓解洪涝干旱等极端水文气象灾害风险以及减轻城市水污染等方面开展多尺度综合研究。

关键词:城市化;蒸散;生态水文;土地覆被变化;城市五岛效应;流域管理

Impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes: progresses and perspectives

HAO Lu^{1,*}, SUN Ge²

1 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Key laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

2 Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, Southern Research Station, USDA Forest Service, Research Triangle Park, NC 27709, USA

Abstract: Ecohydrology is the most basic science for guiding integrated watershed management. Rapid urbanization permanently alters land cover and the structure and functions of terrestrial ecosystems in a short period of time. Consequently, urbanization affects hydrological processes such as surface evaporation, runoff, and local and regional climate, and ecosystem services (e.g., water supply, carbon sequestration, biodiversity). Urbanization directly affects the physical properties of the near-surface atmosphere, the energy exchange between land and atmosphere, and the water budget of the ecosystems. These changes bring or aggravate a series of water quantity, water quality, and climatic effects, e.g., heat island, dry island, wet island, rain island, and turbid island. This study systematically summarized the research progress in understanding the impacts of urbanization on watershed ecohydrological processes with a focus on the consequences of urbanization on surface energy balance, water balance, water quality and aquatic organisms, and the meteorological effects of urban land use/cover change. The most direct impact of urban land use/cover change on the environment is the alternation of the energy and water balance at multiple scales. The unique physical properties of the urban

基金项目:国家自然科学基金项目(41877151,41977409,41571026);国家重点研发计划资助(2019YFC1510200)

收稿日期:2019-09-05; **网络出版日期:**2020-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: haolu@nuist.edu.cn

surface and associated energy balance distribution characteristics are different from natural ecosystems, resulting in unique microclimate and eco-hydrology in an urban environment. Urbanization-driven surface processes have direct or indirect impacts on hydrological processes such as runoff, infiltration, evapotranspiration, groundwater recharge, and river network confluence at different scales by increasing impervious surface and changing vegetation cover conditions. Large-scale urbanization aggravates the peak flow, rainstorm runoff, and annual total water yield as a result of evapotranspiration reduction caused by the significant reduction of vegetation and surface soil infiltration rate. The influence of urbanization on non-point source water pollution is mainly reflected in the change of ‘source’, ‘process’, and ‘sink’ of non-point source pollutants. Urbanization aggravates water quality problems by the increase in impervious surface that elevates pollutant concentration and load and alters physical and chemical processes in aquatic systems. Large-scale conversion of forest lands to urban uses leads to a significant reduction in evapotranspiration, which reduces its ‘biological drainage’ function, coupled with an increase in the impervious surface, and is likely to exacerbate the risk of flooding or the risk of ‘light rainstorms, heavy waterlogging’ phenomena in urban watersheds. The conversions of vegetated ecosystems reduce their ‘air conditioner’ functions and are likely to exacerbate the ‘urban heat island’ and ‘urban dry island’ effects. We summarized measures and strategies centered on ‘Low Impact Development’ to mitigate the urbanization risks through reducing extreme hydrological effects of impervious surface, enhancing the regulating function of natural ecosystems, and implementing the Urban Best Management Practices at a watershed scale. We concluded that future urban ecohydrological science should focus on the studying the mechanisms of ‘Low Impact Development’ and ‘Nature-based Solutions’ in mitigating environmental impacts from the perspectives of water and energy balances and biogeochemical cycling at multiple scales.

Key Words: urbanization; evapotranspiration; eco-hydrology; land cover change; Five Urban Island Effect; watershed management

城市化是衡量一个国家发展水平的重要标志。根据联合国人居署发布的《2011 年世界人口状况报告》，到 2050 年，世界城市人口将从 36 亿增长到 63 亿，人口超过 1000 万的“超级大城市”数量在迅速增加。特别是在发展中国家和地区，城市人口增长最为显著。2011 年 12 月，中国社会蓝皮书发布的数据显示，中国城镇人口占总人口的比例首次突破 50%。

城市土地利用/覆被变化是全球变化的一部分，是自然生态系统和人类活动相互作用最为密切的环节^[1-2]，主要体现在森林、湿地、农田面积减少，城市用地增加。快速城市化在短期内永久改变陆地生态系统的结构与功能，通过影响地表蒸散改变区域水热平衡等水文气象过程，并直接影响近地面大气的物理属性、地气能量交换和生态系统水分收支^[3]，带来或加重一系列生态水文与城市大气环境效应^[4-5]。然而，城市化（土地利用/覆被变化、新污染物产生）、水文（降水、入渗、蒸散、径流过程）和生态系统服务功能（产水服务、调节气候、土壤保持、初级生产力、维持生物多样性等）在不同时间和空间尺度之间的相互作用还存在知识空白^[6-7]。理论上，城市生态学还属于比较新的学科领域，从流域角度关注城市水文的研究还比较缺乏。在这种背景下，系统研究城市化对流域生态水文环境的影响，对于合理评价流域生态系统服务功能^[8]、提高流域管理水平以实现可持续发展具有重要意义。

1 城市化对流域生态系统结构 and 功能的影响

生态系统服务功能受自然和人为等多种因素的影响。包括土地利用/覆被变化的人类活动对生态系统服务功能影响的研究已引起广泛的关注。林地、湿地（包括稻田等人工湿地）以及农用地转为城市用地，对不同尺度的生态水文过程产生直接或间接影响，进而对流域生态系统构成压力，对其结构和功能产生了深远的影响，改变了流域的水量 and 水质，影响了流域生态系统的健康和可持续性^[9]（图 1）。

控制流域生态系统功能和服务（例如，清洁供水、栖息地）的关键生物地球化学循环包括水循环、养分循

环和碳循环。城市化对生态系统最直接的影响是改变了输送生态系统能量和物质的水文循环^[5]。城市土地利用/覆被变化影响到流域的许多方面,包括地表水动态、地下水补给、河流地貌、气候、生物地球化学以及河流生态等^[10]。城市化通过改变物理、化学和生物过程影响水量、水质(即沉积物、养分动态)和生态系统初级生产力和碳封存^[9]。流域水循环的变化是当今城市河流生态系统退化及其一系列连锁反应的根本原因。

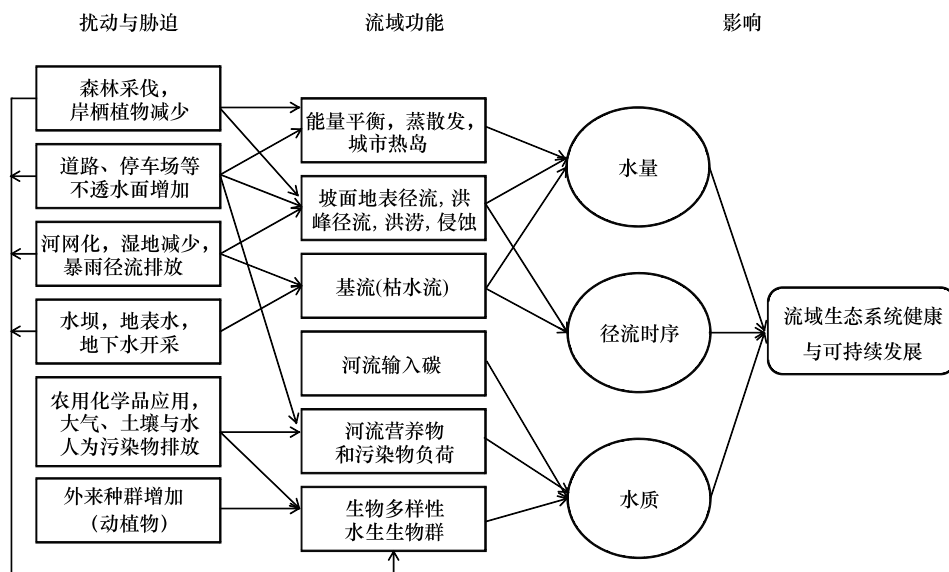


图1 城市化对流域生态系统健康和可持续性的影响(修改自文献^[9])

Fig.1 Impact of urbanization on ecosystem health and sustainability in river basins (modified from reference^[9])

2 城市化对地表能量平衡的影响

能量是生态系统中物质运输、转换、平衡的原动力,是水循环最根本的驱动力。陆地生态系统能量分配与水循环紧密耦合^[11]。生态系统地表水量与能量平衡过程的变化会直接导致流域和区域水文、气候状况发生变化^[12]。城市土地利用/覆被变化对环境最直接的影响就是改变流域下垫面的生态水文过程,打破流域能量与水量平衡。早在20世纪60年代,国外的森林气象水文研究人员对此就有初步认识,指出城市下垫面独特的物理性质造成了其不同于自然下垫面的能量平衡分布特征,并认为这是城市化影响能量再分配、小气候和生态水文的根本原因^[13-14]。城市化过程常减少地表植被,这会导致地表反照率和粗糙度增加,潜热显著减少,显热增加,改变了地表水量与能量的平衡过程^[15]。

城市能量平衡方程^[16]:

$$R_n + Q_A = H + LE + G + Q_s \quad (1)$$

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (2)$$

$$R_{ns} = R_s (1 - \alpha) \quad (3)$$

式中, R_n 为净辐射; Q_A 为人为热通量; H 为显热通量; LE 为潜热通量; G 为土壤热通量; Q_s 为热储量; α 为地表反照率; R_s 为到达地球表面的实际太阳辐射; R_{ns} 为净短波辐射, R_{nl} 为净长波辐射。

城市下垫面吸收了净辐射和人为热,一部分贮存在下垫面内部,其余的部分则通过湍流交换方式将显热通量 H 输送给空气(当地面温度低于气温时亦可通过湍流交换从空气获得显热)。显热是生态系统与大气之间通过影响气温的热力学交换的能量。另一部分则通过蒸散将潜热通量 LE 输送给空气。蒸散包括土壤-植被系统的蒸发和蒸腾,是近地表气候的有效调节者。

从城市能量平衡来看,以人造结构替代自然景观会从多方面扰乱地表能量平衡。其中,蒸发冷却作用减弱就是导致城市变暖的一个重要因子。人为热的释放作为额外的能量叠加在地表能量平衡中,从而增加地表

和近地表大气温度。地表植被减少使得蒸散量降低进而减少潜热通量,增加显热,加重热岛效应;土地利用/覆被变化引起的反照率降低也会增加太阳短波辐射的能量输入。与自然植被和土壤相比,建筑物在白天可以储存更多辐射能,这些存储的热量在夜间释放,引起夜间增温。地表与边界层大气之间的对流所引起的能量再分配可增强亦可削弱城市热岛效应,其效果取决于城市对流效率是被抑制还是增强^[16]。

地表能量变化以森林转为城市用地的影响最为明显。森林砍伐或将林地转换为城市用地增加了地表反照率,虽减少了净辐射,但是由于用于蒸散消耗的能量大幅减少,降低了潜热^[11],从而增加了显热并加热大气^[17]。O'Driscoll 等^[10]回顾了美国南部城市对天气的影响,表明城市化最终通过减少绿色植被的冷却效应并导致城市热岛现象^[18]。城市化对局地天气的影响取决于天气气候条件、城市热物理环境、几何特征、人为湿源和热源^[17]。秦孟晟^[19]在中国南方湿润区秦淮河流域的研究表明,在土地利用变化最为显著的城乡界面区 (Urban-Rural Interface, URI),潜热通量明显下降,而显热通量和土壤热通量呈上升趋势,且前者的上升速率远大于后者,波文比也呈显著上升趋势,表明该区域能量分配逐渐倾向于显热。

3 城市化对流域水量平衡的影响

城市化驱动的地表过程通过增加不透水面以及改变地表覆被状况,对不同尺度的径流、入渗、蒸散、地下水补给、河网汇流等水文过程产生直接或间接影响^[9]。流域水量平衡是理解生态水文过程的基础。了解流域水量平衡对于进一步了解城市化对供水、水质和生态过程的影响至关重要。城市化对流域水量平衡的影响主要表现在:以森林、湿地和农田转为不透水面为主要形式的土地利用/覆被变化改变了地表状况、流域总蒸散及河流径流的水量 and 水质;人类过度抽取地下水造成地下水位下降、地下水资源枯竭;修建水库改变河川径流;城市化过程造成的点源和非点源水污染,降低了水资源的可利用量和水质^[20]。

3.1 城市化对流域水循环的影响

作为全球水循环的一部分,城市流域水循环具有其独特性(图 2)。然而,目前的城市水循环相关研究多在较小的自然流域进行。对受人类活动影响较多的大流域进行长期监测,进而开展城市最佳管理实践 (Urban Best Management Practices, UBMPs),将更有利于景观规划者进行系统设计,减少城市发展带来的不利影响。城市水量平衡^[21]:

$$P+I=Q+ET+F+\Delta A+\Delta S \quad (4)$$

式中, P 为降水量; I 为通过管道供给城市的水量; Q 为地表和地下径流量; ET 为蒸散; F 为人类活动(如燃烧)导致的水分蒸发量; ΔA 为一定区域内外的净水汽平流; ΔS 为一定时期内储水量的增减。

在城市化影响的水循环过程中,大气中的水蒸气冷却后以雨或雪的形式降落^[22],一部分被建筑、道路和土壤“截留”,直接蒸发返回到大气中;另一部分通过不透水面裂缝或城市绿地和土壤下渗,这些渗透水可以被植被根系吸收,经由植物的汲取再蒸腾到大气中。蒸散 (evapotranspiration) 是植物蒸腾 (transpiration),水 (陆) 面蒸发 (evaporation),包括植被截留 (canopy interception) 的水量的总和。渗透到土壤中的水分可以通过接近水平的潜流移动到河流或其他水体中,剩余的渗透水进一步向下流入地下水。然而,大量水分降落在渗透性很低的城市不透水面时,特别是遭遇暴雨时,降水迅速以“地表径流”进入管道、沟渠组成的排水系统,然后注入水体。地面和水体的蒸发作用将水分以水蒸气的形式传输回大气中。此外,城市通常用管道将不断流动的清洁饮用淡水输送到城市地区供居民生活用水,废水经过净化系统或使用污水管道系统进行处理,再输送到附近的水体(图 2)。值得指出的是,城乡交错带 (Urban-Rural Interface, URI) 土地利用变化剧烈,常是流域生态水文变化的‘热点’区域。

3.2 城市化对蒸散过程的影响

作为地表水量平衡的最大支出项和“汇”,蒸散是唯一一个将水、能量和碳循环联系起来的关键水文气象变量^[23]。由城市化引起的土地利用/覆被变化通过影响地表蒸散直接影响区域或流域尺度能量平衡^[1]和水量平衡^[24-25]。气候特征(影响土壤水分利用率和冠层截留的降水模式、气温、辐射、湿度、风速)、土地利用方

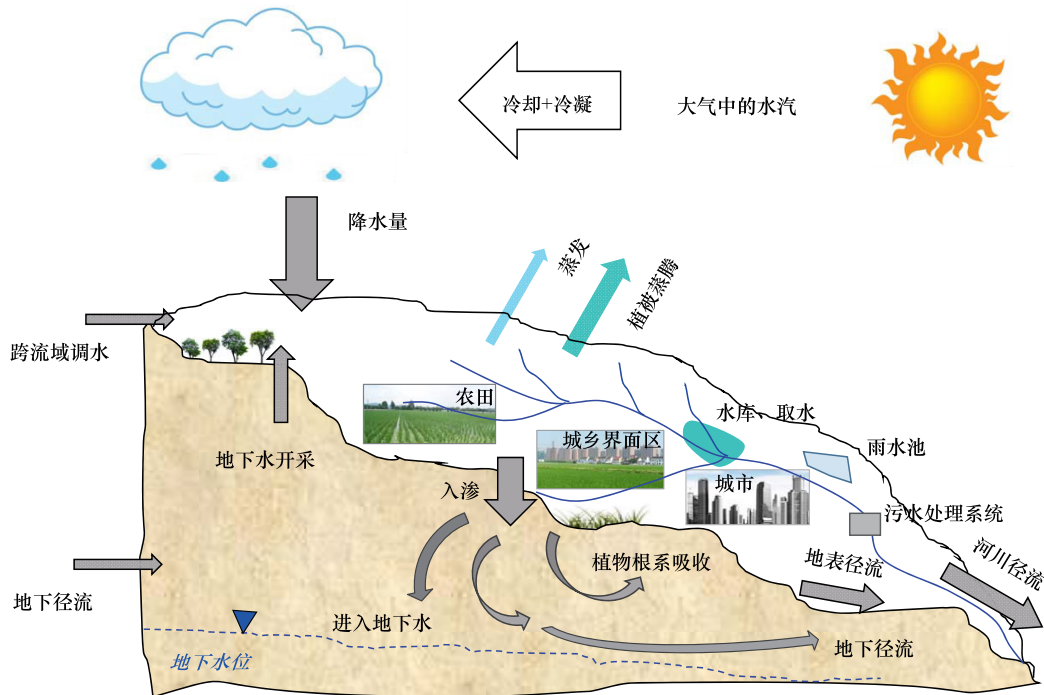


图2 受人类活动影响的流域水循环示意图

Fig.2 Watershed water cycle affected by human activities

式与覆被组成(如植被覆盖面积和农田种植方式)、植被类型与生产力以及人类活动(如灌溉用水周期)决定流域蒸散总量^[26],从而影响流域水文特征(如产水量、暴雨洪水量和基流等)^[27]。此外,城市污染物浓度也常常比农村地区高出许多倍,臭氧等会对森林生态系统的生态生理过程产生负面影响^[28],从而影响蒸散。

城市化通过移除森林等绿色植被,减少植物蒸腾和冠层截留,导致总蒸散和下渗显著减少,地表径流大幅增加^[29]。在美国南部,每年至少有20%的降水量被森林冠层截留,并作为蒸散的一部分返回大气层^[30]。在马萨诸塞州中部,硬木和针叶林可分别截留11%和20%的年降水量(1140 mm)。树木需要消耗大量的水维持生产力及其生长^[23]。森林年蒸散量占降水量比例的多年平均值一般在50%至85%之间变化^[31-32],这取决于当地气候和森林结构(如叶面积指数 Leaf Area Index, LAI)。在美国阿巴拉契亚南部的Coweeta水文实验室和世界其他地方进行的长期生态水文研究表明,森林砍伐或转换为农田可显著减少蒸散,降低土壤渗透能力,并在流域尺度上增加总流量^[20]。

在全球变暖、极端天气气候事件增多的大背景下,亚热带湿润地区由于蒸散量相对较高,土地覆被变化对蒸散的影响更为明显。例如,在中国南方湿润区植被覆盖较好的流域,年蒸散可高达降水的70%,干旱年份甚至更高(>90%),蒸散是决定这一区域流域水循环过程的关键因素^[20]。秦淮河流域的研究表明,过去近10年来,流域内水稻田面积减少27%,且大部分转为城市用地,导致流域蒸散大幅减少,年总径流量增加将近60%,洪峰流量、河川基流、枯水径流和地下水位均有显著增加趋势,加剧了该流域的洪涝风险^[33]。

3.3 城市化对产水量、洪峰和基流的影响

用于评价城市化对流量和相关水生生物群影响的水文变量或指标有很多,例如,月或更长时间尺度内的总流量(或产水量)对评估供水的累积效应最为有用。洪峰流量(Peak flow)和某些罕见流量的发生频率或流域的平坦程度对评估土地利用变化对洪水和泥沙输送的影响最有帮助。枯水流量(Low flow)是流域水文特征阈值变化的另一个重要指标,对水质、纳污能力、供水和维持水生生物有着重要作用,主要受地质条件和气候条件控制,植被也是一个重要影响因素。

(1) 产水量

国内外学者通常使用小的“配对流域”方法研究森林转为其他用地对河川流量的影响并量化水文响应。世界范围内的“配对流域”实验表明,森林砍伐提高了产水量,而植树造林则降低了产水量。但 Zhou 等^[34]的研究表明,植被覆盖变化与产水量关系受气候与流域下垫面特征制约,且具有明显的尺度效应。Sun 等^[35]和 O'Driscoll 等^[10]分别研究了美国南部森林管理和城市化对流域水文和水质的影响,结果表明,由于土地利用/覆被变化而引起的流量变化幅度取决于干扰的严重程度(例如,森林砍伐率、土壤压实度、不透水面的面积、道路密度)、当地气候(辐射、降雨)、土壤和地质条件以及其他流域特征因子^[36]。木材收获后,河流峰值流量、暴雨流量和总流量的增加归因于蒸散量和土壤扰动的减少^[37]。一般而言,森林砍伐会对降水量较多流域(如太平洋西北部)的蒸散和河川流量造成更大的影响^[38-39];土壤较厚的流域可能比土壤较浅的流域具有更大的影响^[40]。

然而,对于城市化如何影响水文循环,大多数流域尺度的植被控制试验都存在局限性,这是由于土壤和植被干扰试验通常采用较温和的方式,而且持续时间较短。尽管如此,自 20 世纪 60 年代以来,森林水文学家就已经认识到城市化对水文过程的潜在影响以及森林具有提供清洁水源的能力。Sun 和 Caldwell^[41]的研究表明,流域不透水面的比例与产水量呈指数关系。Oudin 等^[42]选取美国不同气候带 140 多个城市化较明显的流域,发现随着不透水面比例的增加,多数流域的洪峰和总径流量均有增加。

城市气候条件以及城市化之前土地利用与覆被类型的不同,会导致城市化后的水文变化具有明显的区域特征^[43]。对于降水量大、地表覆被类型多为森林、湿地或农用地的湿润地区,城市化对流域产水绝对量的影响比在干旱地区更为明显。对于同一气候带,原下垫面是森林或湿地时,城市化对流域水量平衡的影响比原下垫面为旱地的要更明显些^[33]。这是由于干旱流域的地表覆被类型多为灌木、草地或荒地,由于年降水量相对较小,根据年水量平衡,城市化以后产水量的绝对变化不大。然而,其相对变化不可忽视,尤其在缺少防洪设施的流域,由于城市化导致的产水量增加可能会极大地增加流域的洪涝风险^[43]。

径流系数通常与不透水面覆盖比例有关^[20],森林可产生 5%—10% 的地表径流,而草坪和其他种植区通常产生 10%—20% 的径流。因此,与城市近郊相比,城市远郊不透水面的增加会产生更多的地表径流^[22,29]。不透水面比例为 20% 时,大约产生 20% 的径流,不透水面比例为 35%—40% 的大约产生 30% 的径流,不透水面比例达到 85%—90% 时,径流可达 55%^[29,44]。地表径流的增加意味着土壤侵蚀增强,增加河流泥沙量,加重水污染程度。

(2) 暴雨径流、洪峰径流、枯水径流

大规模城市化带来的不透水面增加会显著降低地表土壤入渗速率,从而增大地表径流比例,影响流域汇流速率;再加上植被减少造成蒸散下降^[45],导致流域暴雨径流、洪峰流量和流域总产水量增大^[46],增加洪涝灾害风险。除此之外,河网变迁等地表结构改变也是城市化影响洪涝的主要因素之一^[47]。Lull 和 Sopper^[48]的研究表明,快速城市化流域的年径流、暴雨流量和年最大洪峰流量随城市化进程显著增加。其中,暴雨流量对降雨量的响应在城市区域最为敏感。局部城市化流域的丰水径流(High flow)和枯水径流(Low flow)均高于森林流域。平均来看,在夏季,城市流域和森林流域降水量的 12% 和 8% 形成河川径流,这种水文差异主要是由于森林在生长季节拥有更高的蒸散量和土壤下渗速率,这使得森林流域夏季存蓄的雨水更多,而径流和基流更少^[48]。

Boggs 和 Sun^[45]在北卡罗莱纳州的研究结果表明,城市化流域对降雨事件的响应较高。城市化流域和森林流域的年径流系数 Q/P (径流量/降水量) 分别为 0.42 和 0.24,城市化流域的蒸散所占比例(58%)明显低于森林流域(76%)。城市化流域的暴雨径流(Stormflow)比森林流域多 75%,洪峰径流(Peak flow)和枯水径流(Low flow)也高于森林流域。森林流域的 $(P - Q)/P$ 也比城市化流域高,而且两个流域之间的差异主要发生在植被生长季,在休眠季节变小。巴尔的摩生态系统研究所(Baltimore Ecosystem Study, BES)发现,无论是否进行雨水管理,城市化流域的径流量在空间和时间上都具有高度不均一性,与相邻的森林流域(尤其是在

暖季)相比,这种特征更为明显,其月流量和丰水径流(High flow)比森林流域有3倍之多^[49]。

(3) 基流

由于自然物理过程(如蒸散减少)与人类活动之间的复杂相互作用,城市化对流域基流(Baseflow)的影响有很大不确定性,观测到的基流对城市化的水文响应是可变的^[42]。如果城市地面硬化或用水降低了地下水位,基流会减少,否则当土壤入渗影响不大,植被蒸腾大幅下降时,流域地下水位会上升,从而导致基流增加。例如,一些研究表明,由于地表径流增加和大量抽取地下水,城市化流域具有较低的基流量,从而减少了地下水补给^[50]。然而,在许多情形下,废水处理厂的污水排放也会导致大流域的基流量增加^[44]。不透水面的比例从10%增加至90%,会使蒸散小幅减少(从40%降至38%),却会使下渗至土壤的水分由50%急速降为15%。同时,供给植物生长和一些水流的浅层渗透水将由25%降为10%,到达地下水的深层渗透水可能下降更多(从25%降为5%)^[51]。

同样,尽管一些研究表明,城市化可能导致洪峰流量提高2—10倍^[45],但森林砍伐对峰值流量和洪水的影响更为多变。大多数文献表明,仅森林砍伐不会增加大暴雨之后的大洪水事件^[52]。这是因为对于大洪水事件或在蒸散较低的休眠季节,森林流域的土壤水分通常会饱和,因此与城市化流域的土壤水分状况差异不大。不透水面有助于地表水流迅速汇入河流,但由于其他因素,如地形和流域内城市化区域的位置和大小,可能导致真正的城市化效应被掩盖^[48]。例如,Price等^[53]最近在美国东南部潮湿地区的研究发现,尽管森林的蒸散较高,但无干扰森林流域的基流高于森林覆盖率较低的其他土地利用类型的流域。这些区域尺度的研究虽然有限,但挑战了传统的“配对流域”研究结果。

4 城市化对水质和水生生物的影响

水环境非点源(Non-Point Source, NPS)污染引起严重的生态环境问题,已成为世界上许多国家水体的主要污染源。统计数据表明,全球30%—50%的地表已受到非点源污染的影响。非点源污染受水文、气象等自然因子和土地利用变化等人为因子的综合影响,一般可分为农业非点源污染和城市非点源污染。农业非点源污染是最为重要且分布最广泛的非点源污染,城市化则被认为是仅次于农业造成地表水污染的主要原因。在美国,城市地表径流被环保局列为导致全美河流和湖泊污染的第三大污染源^[54]。在中国,随着城市化进程的快速发展,城市非点源污染也逐渐成为影响河流湖泊水质的主要因素之一。

城市化对水体非点源污染的影响,主要体现在使非点源污染的“源”、“过程”和“汇”发生了变化^[55]。首先,城市产生大量污染物(例如,除草剂大量使用,汽车尾气等)、重金属、氮沉降。其次,流域内不透水面比例增大,不仅加快了地表径流的形成,也增大了洪水峰值,同时降低了接纳水体的水质,流域吸收、保留、滞留、吸收污染物的能力降低^[9]。暴雨是城市非点源污染发生的另一个主要驱动力。流域非点源污染通常是伴随着降雨径流过程特别是暴雨过程产生的,暴雨洪水冲刷地表,产生径流,对污染物起到运输作用^[56]。暴雨次数多、频率高,洪水面积越广、水量越大,污染物产生总数量和污染范围就越大^[57]。在全球气候变化背景下,许多区域的降水格局发生变化,强降水事件呈现增多趋势,不仅极易引发洪涝灾害,而且极端水文过程增加也加重了非点源污染物迁移的风险^[57-59]。城市暴雨径流中含有诸如营养物、杀虫剂、病菌、石油、油脂、沉淀物以及重金属等污染物,亦成为水质破坏的主要原因^[54]。

Paul和Meyer^[44]认为城市化对水质的影响主要来自两方面:污染物的大量产生和流域保水能力的严重下降。保水能力的丧失与城市不透水面的增加密切相关,这会显著改变水文环境,从而减少水污染物与具有过滤净化作用的流域陆地部分之间的空间和时间接触。Paul和Meyer^[44]、De la Cretaz和Barten^[60]以及Nagy等^[61]总结了森林流域转为城市用地后对水质沉积物和生物地球化学循环的影响,认为城市发展加剧了水量和水质问题,而这主要是由于不透水面增加所导致的。此外,城市环境中产生了许多污染物,这些污染物比农、林业污染物更为复杂多样^[60,62]。除了沉积物和营养物质外,城市水域通常还含有抗生素、镇痛剂、麻醉剂等药物、草坪和休闲区的杀虫剂和工业活动造成的金属污染^[44]。而且这些新的污染物如抗生素,传统水处理

系统无法净化。同时,污水管网或合流制污水溢流(Combined Stormwater-Sewer Overflows, CSOs)也会带来与污水泄漏相关的致病微生物群^[63]。

一般来说,河流对城市化最常见的物理化学响应是增加 NO_3 浓度,总磷(TP)、钾和 SO_4 也经常会增加。但也会有例外,例如格鲁吉亚森林和城市溪流的 TP 没有显著差异^[64]。河流 NH_4 和化学需氧量(COD)浓度对城市化的响应比较多变,可能增加也可能减少。Weston 等^[65]利用城市化区域(佐治亚州的阿尔塔马哈河流域)的长期监测数据集,发现当城市化和人口持续增长超过 30 年时,随着农业流域转为城市流域,总氮(TN)、氮氧化物(NO_x)和 TP 的含量增加,而有机碳(OC)和 NH_4 的浓度下降^[65]。

研究表明,将流域的部分森林转为城市通常会显著增加地表水沉积物以及养分的浓度和负荷^[44,60-61]。不透水面占流域面积的比例为 10—20%时往往会导致这种变化,然而,值得注意的是,当不透水面比例低至 5%时对水质也有显著影响^[66]。除了增加浓度和负荷外,河流物理化学的变异性也随着流域不透水面的增加而增加^[67]。理化环境稳定性的降低可能对某些类型的水生生物也有负面影响。在美国东南部,城市土地利用对水化学的影响非常显著,甚至超过了自然地理环境的影响^[61]。然而,对于沉积物,各区域之间差异很大,因为地形较陡的区域往往会产生更多的沉积物。

相比于沉积物和营养物,河流中的其他污染物也受到很多关注。Nagy 等^[61]发现在城市地区下游的河流或沉积物中,铜(Cu)、铬(Cr)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、锌(Zn)和镍(Ni)等含量增多。与源自南卡罗来纳州海岸森林的溪流相比,城市中的有机污染物(如多氯联苯,PCBs)含量更高^[68]。此外,个人护理产品,如除臭剂和药品残留物,在城市河流中含量也较多^[69]。然而,传统的水处理设施去除这些污染物的能力可能有限^[70]。

森林向城市用地转化也被证明对河流生物完整性具有重要影响。通常,鱼类、两栖动物、爬行动物和无脊椎动物的丰度和多样性会随着那些对干扰较敏感的物种的减少而减少,取而代之的是那些数量较少的对栖息地改变更具耐受性的物种。同样,鱼的健康水平也会受影响,引起鱼鳍腐蚀、损伤和肿瘤^[71]。流速的增加、河床基质的变化以及物理化学和/或生物污染物的增加等都可能对河流生物群产生影响^[44,72]。已有研究发现,为了适应城市河流中增加的流速,蝶螈的繁殖模式发生了变化^[73]。

森林向城市转变后发生的水文和水质变化通常会对人类健康有负面影响。例如,在许多城市河流中发现的高浓度粪大肠菌群、大肠杆菌和其他致病生物^[44,61]可能与接触受污染水域的人群出现胃肠道疾病有关^[63]。全球每年约有 150 万人死于与供水和卫生问题有关的腹泻^[74]。在美国,由于不透水面增加导致了不稳定的水文环境,CSOs 也经常导致暴雨期间未经处理的污水直接注入河流。由于日益严重的污染以及溢流水汇集,一些传播疾病的昆虫如库蚊(*Culex sp. mosquitos*)的栖息地增多,将极有可能增加鸟类和人类感染西尼罗河病毒(West Nile Virus, WNV)的风险^[75]。

5 生态水文变化对城市大气环境的影响

大规模林地、湿地以及农田转为城市用地导致下垫面热力性质、反照率、粗糙度和含水量等物理属性发生改变,并直接影响近地面大气的物理属性、地气能量交换和生态系统水分收支,带来或加重一系列气候环境效应^[43],如热岛、干岛、湿岛、雨岛和浑浊岛等“城市五岛”效应以及城市内涝^[76-77]。在城市化气候效应的研究领域中,最广为关注的是“城市热岛”效应(Urban Heat Island, UHI),即城市气温或地表温度比周边乡村地区要高的现象^[14,76,78]。类似地,城市空气水分与湿度比周边乡村地区偏低的现象称为“城市干岛”效应(Urban Dry Island, UDI)^[76,79]。

陆地生态系统对太阳能分配(包括潜热和显热)具有重要影响^[80]。生态系统地表水量与能量平衡过程的改变会直接导致流域水文、气候状况发生变化^[12]。有植被覆盖的土地常被称为“空调机”,因其消耗大量能量用于蒸散,从而降低显热并冷却周围大气^[1,33]。Kalnay 和 Cai^[81]发现,美国在 1950—1999 年期间,同时考虑城市化与农业用地变化所导致的地表升温至少是只考虑城市化影响的两倍。在降水多且生长季长、或有

大范围灌溉的地区,蒸散对当地水文和气候的影响尤为明显^[82-83]。在蒸散过程中,由于需要消耗更多的能量作为潜热,森林、湿地往往比其他下垫面具有更强的地表冷却作用^[84],从而有助于缓解“城市热岛”效应^[85]。这也许可以解释为什么“热岛”效应在湿润地区、或在以湿地为主的城市化区域特别明显^[1, 82]。Fang 等^[86]发现,稻田转为城市用地对秦淮河流域蒸散的负贡献率从 53% (2000 年) 增加到 61% (2013 年),而气候的正贡献率从 47% 降低至 39%。大规模稻田转成城市用地导致的蒸散减少会改变整个流域水热平衡,并加重一系列气候环境效应^[79]。

对流层低层水汽凝结过程是大气潜热传递的关键,除此之外,水汽还是一种重要的温室气体^[87],是全球气候变化的重要影响因素。快速城市化除了导致城市区局地气温升高外,还会改变地面和大气之间的水汽交换,使城市区空气变得更加干燥。当大范围森林、湿地、灌溉农田转为城市用地后,其作为“空调机”的功能大大降低,城市气候会变得更干更热,加重或形成城市“干岛”与“热岛”效应^[79]。Lokoshchenko^[88]发现莫斯科在过去的 146 年里,水汽压没有明显变化,然而相对湿度却从 81% 降至 72%,因此认为城市“热岛”是莫斯科城市“干岛”加强的主要原因。Hao 等在长三角的研究发现,城市核心区过去 15 年的饱和水汽压差显著升高,且无法用气温变化很好地解释,即城市“热岛”可能并非城市“干岛”效应加强的主要原因,饱和水汽压差升高可能主要与大范围稻田转为城市用地使得 LAI 降低、蒸散减少、进而引起水汽减少有关,并因此加重大气水分需求,加强城市“干岛”与“热岛”效应(图 3)^[79]。增强的城市“热岛”与“干岛”效应也是导致长三角地区中午前后小雨减少,傍晚时段对流性降水增加的主要原因^[89]。

Hao 等^[33]的研究表明,暴雨洪水形成机制具有多样性,城市化进程中常规降水也可能导致极端水文效应,这在蓄满产流占主导的湿润地区更为普遍。洪峰流量除了与地表入渗速率有关外,还受过程降水量和前期土壤含水量影响^[77],而后者与蒸散直接相关。大范围林地、湿地(包括稻田等人工湿地)转为城市用地后,地表储水能力下降,蒸散减少,降低了林地和湿地的“生物排水”(Biological Drainage)功能,同时土壤含水量与地下水储量增大,浅层地下水上升,加上不透水面增加,在流域尺度上极易加剧洪涝风险或出现“小雨大涝”现象(图 3)。

6 提高城市流域生态水文服务功能的展望

城市化过程将原本适宜区域生态环境的自然、半自然景观改造为不透水面景观,其结果是不仅影响了城市地表的热环境与热通量特征,也造成城市地表和地下水文过程隔离,乃至阻隔生物体之间的流动,导致城市生态系统服务功能的退化^[90],加大了城市生态环境风险。如何及时解决城市化带来的生态环境问题以及提高城市流域生态水文服务功能,需要城市生态科学包括生态水文学的指导。

6.1 减缓不透水面增加导致的不利水环境效应

城市不透水面的增加是影响城市水文过程的重要因素,不仅能够隔离地表水下渗,产生更多的径流,减少蒸散量,还切断了城市地表水与地下水之间的水文联系^[91]。一般的不透水面包括屋顶、行车道、人行道、街道、高速公路等。草地或林地的不透水性常小于 10%,屋顶表面较高,可以达到 80%,高质量的道路则可以达到 100%^[51]。Ferguson 和 Suckling^[92]认为减少城市雨水径流的一个方法是在路面表面增加更多孔隙以增加其渗透性,即多孔路面,其由柏油/沥青或混凝土材质组成,孔隙使得部分径流渗入并向下进入路面之下的沙质土壤中。小雨时,大多数雨水可以渗透通过多孔路面,但缺点是在暴雨时渗透比例会小很多。而且,多孔路面容易堵塞,因此在几年内其有效性会下降。目前,多孔路面在人行道和私人车道、停车场这种交通压力小的区域最为有效。

相比之下,透水路面更具优势,它是含有砾石、土壤和草的混凝土砖或大孔隙的塑料结构,因此,雨水容易向下渗透并向上蒸散。另外可以向土壤灌输具有分解作用的微生物用以清洁雨水污染物。透水路面能增加雨水的渗透,增加水对土壤(也可能是对地下水)的补给,减少输入雨水管道网络的水量,同时减少雨水中的污染物。美国西雅图停车场的研究发现,透水路面几乎不产生径流^[93]。与沥青路面相比,透水路面径流中的

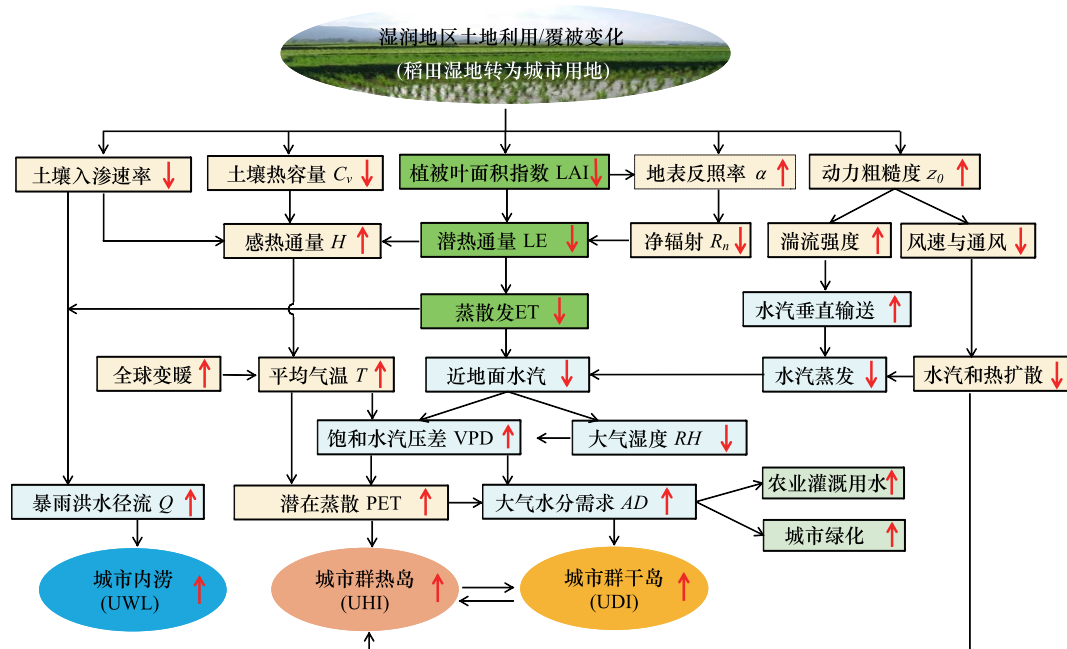


图3 长三角城市土地覆被变化影响能量再分配、小气候和生态水文的概念模型,箭头代表变化方向(修改自文献^[79])

Fig.3 A conceptual model illustrating the potential climatic and environmental impacts of urbanization-associated land cover change in the Yangtze River Delta region. Arrows represent directions of change (modified from reference^[79])

C_v : 土壤热容量, soil heat capacity; LAI: 叶面积指数, leaf area index; α : 地表反照率, surface albedo; z_0 : 动力粗糙度, aerodynamic roughness; H : 感热通量, sensible heat flux; LE : 潜热通量, latent heat flux; R_n : 净辐射, net radiation; ET : 蒸散, evapotranspiration; T : 平均气温, average air temperature; VPD : 饱和水汽压差, vapor pressure deficit; RH : 大气湿度, relative humidity; Q : 暴雨洪水径流, rainstorm and flood runoff; PET : 潜在蒸散, potential evapotranspiration; AD : 大气水分需求, atmospheric demand; UWL: 城市内涝, urban water logging; UHI: 城市群热岛, urban heat island; UDI: 城市群干岛, urban dry island

铜和锌含量均较低,并且没有停车场特有的污染物(机油)。除此之外,与沥青路面的停车场相比,透水路面的停车场较少发生由于大气加热导致的烃类污染^[94]。

6.2 发挥以自然生态系统功能为核心的“低影响开发”城市流域水资源管理

基于流域或子流域尺度的土地覆被管理是保护城市化水量和水质最为有效的选择之一。根据流域服务功能的目的,在相应的水文单元内进行综合流域管理,同时限制开发那些对水量和水质影响较大的重点区域。如果这些流域可以保留或恢复植被(如森林或草地),那么覆被良好的流域不仅可以保障水资源稳定供给,改善水文环境(如减少非点源污染,减少城市内涝)^[61],还可以改善城市小气候环境(如缓解“城市热岛”与“城市干岛”效应)^[18,79]。同时,在减少噪音、降低空气污染、减弱紫外线照射、降低能源消耗、保障人体身心健康、提供野生动物栖息地等方面也有大有益处。总之,与不透水面相比,自然生态系统提供了更稳定的生态水文环境和更丰富的可利用水资源,而且具有健康、经济、社会和环境等多重效益。这也符合世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)提出的基于自然的解决方案(Nature-based Solutions, NBS)的新理念^[95],是应对一系列环境和社会挑战,特别是在不断变化的环境中促进生态系统服务,以增强可持续城市化、刺激经济增长、改善环境,并增强人类福祉的有效途径。

“低影响开发”(Low-Impact Development, LID)是20世纪90年代末发展起来的暴雨管理和非点源污染处理技术^[95],是当前“海绵城市”建设的基础理论。旨在通过分散的、小规模源头控制来达到对暴雨所产生的径流和污染的控制,使开发地区尽可能地接近自然的水文循环。其核心在于原位收集、自然净化、就近利用或回补地下水。比起不透水的基础设施,这种方式更为有效,对环境的不利影响也更小。其中,分散式植被控

制系统利用植被减少雨水径流^[96],将雨水径流导入沟渠或由草本植物或木本植物组成的“沼泽地”会带来更多的下渗、地下水补给和蒸散,从而减少地表径流和洪涝、使洪峰滞后、减少侵蚀和沉淀、缓解地表下陷以及净化雨水等一系列益处。在植被成熟时,其优势更为明显,遇到暴雨时效果也非常稳定,同时成本较低。

6.3 以流域为单元实施城市最佳管理实践,提高城市流域生态系统服务功能

目前,从系统综合的角度解决环境或生态问题已逐渐成为学术和资源管理界的共识^[91]。流域是自然系统中一个具有明显物理边界线且综合性强的独特地理单元。从这个意义上讲,所有的生态环境问题都落入某一流域,都与流域水、土、气资源破坏或不合理管理有关。因此,把流域作为一个完整的系统,从流域生态水文的角度管理城市,以流域为单元实施城市最佳管理实践,运用生态水文学理论对流域中的主要过程进行科学管理,通过合理设置流域生态用地,有效提高城市生态服务功能、保障城市生态安全,是一条更有效的系统综合解决城市环境问题的途径。

由于气候变化与人类活动的强烈干扰,多要素、多过程、多格局、多尺度^[8]的城市生态水文效应与气候环境效应具有复杂性与不确定性。随着人口增长、经济发展和城市扩张,人类对建设用地需求增多的同时,对于人居环境的要求亦有增长。提高绿色覆被,保护湿地和生物多样性,发挥自然生态系统服务功能(水热平衡,养分循环)为核心的城市流域管理在稳定城市小气候、改善水质和减缓洪涝等极端水文变化的作用更显重要。充分利用和实施流域自然服务功能不仅是未来维持水质和水量的重要途径,也是实现生态环境保护和社会经济发展“双赢”的有效手段,这对发展中国家尤为重要^[74]。

近年来,国内针对城市洪涝及水环境问题,提出了“海绵城市”建设模式。这是以“低影响开发雨水系统构建”为理论,实现雨水在城市中自由迁移,以及实现水文过程动态管理与调控为目的的城市建设模式。“海绵城市”建设指导思想避免了因水文学、城市水文学领域的各类实践可能引发的过度工程化以及与生态系统脱节等问题^[97]。尤其在全球变暖、极端天气气候事件增多背景下,城市土地覆被的生态水文服务功能更为明显。现代城市规划需要遵循流域生态水文学基本原理和基本规律,从城市流域生态系统角度认识近年来新出现的不同尺度城市环境效应,加强流域景观规划,提高综合生态系统服务功能,以减缓城市化对环境带来的负面影响。这不仅有助于增强流域生态稳定性,而且对于适应全球环境变化,实现区域可持续发展也具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] Sun G, Hallema D, Asbjornsen H. Ecohydrological processes and ecosystem services in the Anthropocene: a review. *Ecological Processes*, 2017, 6(1): 35.
- [2] Mooney H A, Duraipapp A, Larigauderie A. Evolution of natural and social science interactions in global change research programs. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(S1): 3665-3672.
- [3] Cao Q, Liu Y P, Georgescu M, Wu J G. Impacts of landscape changes on local and regional climate: a systematic review. *Landscape Ecology*, 2020, doi: 10.1007/s10980-020-01015-7.
- [4] Pielke R A. Land use and climate change. *Science*, 2005, 310(5754): 1625-1626.
- [5] DeFries R, Eshleman K N. Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future. *Hydrological Processes*, 2004, 18(11): 2183-2186.
- [6] Wenger S J, Roy A H, Jackson C R, Bernhardt E S, Carter T L, Filoso S, Gibson C A, Hession W C, Kaushal S S, Martí E, Meyer J L, Palmer M A, Paul M J, Purcell A H, Ramírez A, Rosemond A D, Schofield K A, Sudduth E B, Walsh C J. Twenty-six key research questions in urban stream ecology: an assessment of the state of the science. *Journal of the North American Benthological Society*, 2009, 28(4): 1080-1098.
- [7] Li C, Sun G, Cohen E, Zhang Y D, Xiao J F, McNulty S G, Meentemeyer R K. Modeling the impacts of urbanization on watershed-scale Gross Primary Productivity and tradeoffs with water yield across the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124581.
- [8] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. *地理科学进展*, 2014, 33(4): 441-446.
- [9] Sun G, Lockaby B G. Water quantity and quality at the urban-rural interface//Laband D N, Lockaby B G, Zipperer W, eds. *Urban-Rural Interfaces: Linking People and Nature*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 2012: 26-45.
- [10] O'Driscoll M, Clinton S, Jefferson A, Manda A, McMillan S. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the southern United States. *Water*, 2010, 2(3): 605-648.

- [11] Sun G, Noormets A, Gavazzi M J, McNulty S G, Chen J, Domec J C, King J S, Amatya D M, Skaggs R W. Energy and water Balance of two contrasting Loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1299-1310.
- [12] Jackson C R, Sun G, Amatya D, Swank W T, Riedel M, Patric J, Williams T, Vose J M, Trettin C, Aust W M, Beasley R S, Williston H, Ice G G. Fifty years of forest hydrology in the southeast//Ice G G, Stednick J D, eds. *A Century of Forest and Wildland Watershed Lessons*. Bethesda: The Society of American Foresters, 2004: 33-112.
- [13] Chandler T J. Absolute and relative humidities in towns. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1967, 48(6): 394-399.
- [14] Oke T R. Review of Urban Climatology 1968—1973. Geneva: World Meteorological Organization, 1973: 132.
- [15] Zhao L, Lee X, Smith R B, Oleson K. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511(7508): 216-219.
- [16] Lee X. *Fundamentals of Boundary-Layer Meteorology*. Cham: Springer, 2018.
- [17] Taha H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 1997, 25(2): 99-103.
- [18] Ziter C D, Pedersen E J, Kucharik C J, Turner M G. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(15): 7575-7580.
- [19] 秦孟晟. 秦淮河流域城市化对蒸散及热量平衡的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2019.
- [20] 魏晓华, 孙阁. 流域生态系统过程与管理. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [21] Butler D, Davies J W. *Urban Drainage*. 3rd ed. London, UK: Spon Press, 2011.
- [22] Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2008.
- [23] Vose J M, Sun G, Ford C R, Bredemeier M, Otsuki K, Wei X H, Zhang Z Q, Zhang L. Forest ecohydrological research in the 21st century: What are the critical needs? *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 146-158.
- [24] Fisher J B, Whittaker R J, Malhi Y. ET come home: potential evapotranspiration in geographical ecology. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 1-18.
- [25] Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nature Climate Change*, 2013, 3(4): 385-390.
- [26] Ford C R, Hubbard R M, Vose J M. Quantifying structural and physiological controls on variation in canopy transpiration among planted pine and hardwood species in the southern Appalachians. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 183-195.
- [27] Qi S, Sun G, Wang Y, McNulty S G, Moore Myers J A. Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. *Transactions of the ASABE*, 2009, 52(3): 739-749.
- [28] McLaughlin S B, Wulschleger S D, Sun G, Nosal M. Interactive effects of ozone and climate on water use, soil moisture content and streamflow in a southern Appalachian forest in the USA. *New Phytology*, 2007, 174(1): 125-136.
- [29] Arnold Jr C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: the emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 1996, 62(2): 243-258.
- [30] Swank W T, Goebel N B, Helvey J D. Interception loss in loblolly pine stands of the South Carolina Piedmont. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1972, 27: 160-164.
- [31] Sun G, Alstad K, Chen J Q, Chen S P, Ford C R, Lin G H, Liu C F, Lu N, McNulty S G, Miao H X, Noormets A, Vose J M, Wilske B, Zeppel M, Zhang Y, Zhang Z Q. A general predictive model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 245-255, doi: 10.1002/eco.194.
- [32] Sun G, Caldwell P, Noormets A, McNulty S G, Cohen E, Myers J M, Domec J C, Treasure E, Mu Q Z, Xiao J F, John R, Chen J Q. Upscaling key ecosystem functions across the conterminous United States by a water-centric ecosystem model. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(G3): G00J05.
- [33] Hao L, Sun G, Liu Y, Wan J, Qin M, Qian H, Liu C, John R, Fan P, Chen J. Urbanization dramatically altered the water balances of a paddy field dominated basin in southern China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, 12(2): 1941-1972.
- [34] Zhou G Y, Wei X H, Chen X Z, Zhou P, Liu X D, Xiao Y, Sun G, Scott D F, Zhou S Y D, Han L S, Su Y X. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield. *Nature Communications*, 2015, 6: 5918.
- [35] Sun G, Riedel M, Jackson R, Kolka R, Amatya D, Shepard J. Influences of Management of Southern Forests on Water Quantity and Quality [R]. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 2004: 195-234.
- [36] Andréassian V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 2004, 291(1/2): 1-27.
- [37] Dietterick B C, Lynch J A. Cumulative hydrologic effects on stormflows of successive clearcuts on a small headwater basin//*Proceedings of the Symposium on Headwaters Hydrology*. Bethesda, MA: American Water Resources Association, 1989: 473-485.
- [38] Swank W T, Vose J M, Elliott K J. Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. *Forest Ecology and Management*, 2001, 143(1/3): 163-178.
- [39] Sun G, McNulty S G, Lu J, Amatya D M, Liang Y, Kolka R K. Regional annual water yield from forest lands and its response to potential deforestation across the southeastern United States. *Journal of Hydrology*, 2005, 308(1/4): 258-268.
- [40] Sun G, Riekerk H, Kornhak L V. Ground-water-table rise after forest harvesting on cypress-pine flatwoods in Florida. *Wetlands*, 2000, 20(1):

- 101-112.
- [41] Sun G, Caldwell P. Impacts of urbanization on stream water quantity and quality in the United States. *Water Resources Impact*, 2015, 17(1): 17-20.
- [42] Oudin L, Salavati B, Furusho-Percot C, Ribstein P, Saadi M. Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 774-786.
- [43] Li C, Sun G, P. Caldwell, Cohen E, Fang Y, Zhang Y, Oudin L, Sanchez G M, Meentemeyer R K. Impacts of urbanization on watershed water balances across the conterminous United States. *Water Resources Research*, 20209, doi:10.1029/2019WR026574.
- [44] Paul M J, Meyer J L. Streams in the urban landscape. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2001, 32: 333-365.
- [45] Boggs J L, Sun G. Urbanization alters watershed hydrology in the Piedmont of North Carolina. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 256-264.
- [46] Caldwell P V, Sun G, McNulty S G, Cohen E C, Myers J A M. Impacts of impervious cover, water withdrawals, and climate change on river flows in the conterminous US. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2839-2857.
- [47] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 贺瑞敏, 王小军. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——城市水文效应. *水科学进展*, 2014, 25(4): 594-605.
- [48] Lull H W, Sopper W E. *Hydrologic Effects from Urbanization of Forested Watersheds in the Northeast*. Upper Darby, PA: Northeastern Forest Experiment Station, 1969.
- [49] Meierdiercks K L, Smith J A, Baeck M L, Miller A J. Heterogeneity of hydrologic response in urban watersheds. *Journal of the American Water Resources Association*, 2010, 46(6): 1221-1237.
- [50] Barringer T H, Reiser R G, Price C V. Potential effects of development on flow characteristics of two New Jersey streams. *Journal of the American Water Resources Association*, 1994, 30(2): 283-295.
- [51] Forman R T T. *Urban Ecology—Science of Cities*. New York: Cambridge University Press, 2014.
- [52] Eisenbies M H, Aust W M, Burger J A, Adam M B. Forest operations, extreme flooding events, and considerations for hydrologic modeling in the Appalachians—A review. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2/3): 77-98.
- [53] Price K, Jackson C R, Parker A J, Reitan T, Dowd J, Cyterski M. Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States. *Water Resources Research*, 2011, 47(2): W02516.
- [54] U.S. Environmental Protection Agency (USEPA). *Draft Guidelines for Management of Onsite/Decentralised Wastewater Systems*. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Wastewater Management, 2000: 59840-59841.
- [55] McDonald R I, Green P, Balk D, Fekete B M, Revenga C, Todd M, Montgomery M. Urban growth, climate change, and freshwater availability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(15): 6312-6317.
- [56] Dietz M E, Clausen J C. A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2005, 167(1/4): 123-138.
- [57] 夏军, 翟晓燕, 张永勇. 水环境非点源污染模型研究进展. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 941-952.
- [58] Wei W, Chen L D, Fu B J. Effects of rainfall change on water erosion processes in terrestrial ecosystems: a review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2009, 33(3): 307-318.
- [59] Weltzin J F, Loik M E, Schwinning S, Williams D G, Fay P A, Haddad B M, Harte J, Huxman T E, Knapp A K, Lin G H, Pockman W T, Shaw R M, Small E E, Smith M D, Smith S D, Tissue D T, Zak J C. Assessing the response of terrestrial ecosystems to potential changes in precipitation. *BioScience*, 2003, 53(10): 941-952.
- [60] De La Cretaz A, Barten P K. *Land Use Effects on Streamflow and Water Quality in the Northeastern United States*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [61] Nagy R C, Lockaby B G, Helms B, Kalin L, Stoeckel D. Water resources and land use and cover in a humid region: the southeastern United States. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40(1): 867-878.
- [62] U.S. Geological Survey. *The Quality of Our Nation's Waters: Nutrients and Pesticides*. Reston, Virginia: U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, 1999.
- [63] Tibbetts J. Combined sewer systems: down, dirty, and out of date. *Environmental Health Perspectives*, 2005, 113(7): A464-A467.
- [64] Schoonover J E, Lockaby B G. Land cover impacts on stream nutrients and fecal coliform in the lower Piedmont of West Georgia. *Journal of Hydrology*, 2006, 331(3/4): 371-382.
- [65] Weston N B, Hollibaugh J T, Joye S B. Population growth away from the coastal zone: thirty years of land use change and nutrient export in the Altamaha River, GA. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(10): 3347-3356.
- [66] Schoonover J E, Graeme Lockaby B, Pan S F. Changes in chemical and physical properties of stream water across an urban-rural gradient in western Georgia. *Urban Ecosystems*, 2005, 8(1): 107-124.
- [67] Crim J F. *Water Quality Changes Across an Urban-Rural Land use Gradient in Streams of the West Georgia Piedmont[D]*. Auburn, AL: Auburn University, 2007.
- [68] Sanger D M, Holland A F, Scott G I. Tidal creek and salt marsh sediments in South Carolina Coastal Estuaries: II. Distribution of organic contaminants. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1999, 37(4): 458-471.
- [69] Kolpin D W, Skopec M, Meyer M T, Furlong E T, Zaugg S D. Urban contribution of pharmaceuticals and other organic wastewater contaminants to

- streams during differing flow conditions. *Science of the Total Environment*, 2004, 328(1/3): 119-130.
- [70] Bolong N, Ismail A F, Salim M R, Matsuura T. A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *Desalination*, 2009, 239(1/3): 229-246.
- [71] Helms B S, Feminella J W, Pan S F. Detection of biotic responses to urbanization using fish assemblages from small streams of western Georgia, USA. *Urban Ecosystems*, 2005, 8(1): 39-57.
- [72] Barrett K, Helms B S, Guyer C, Schoonover J E. Linking process to pattern: causes of stream-breeding amphibian decline in urbanized watersheds. *Biological Conservation*, 2010, 143(9): 1998-2005.
- [73] Price S J, Dorcas M E, Gallant A L, Klaver R W, Willson J D. Three decades of urbanization: estimating the impact of land-cover change on stream salamander populations. *Biological Conservation*, 2006, 133(4): 436-441.
- [74] WWAP World Water Assessment Programme. United Nations World Water Development, Report 3: Water in a Changing World. UNESCO, Paris, 2009.
- [75] Vazquez-Prokopec G M, Vanden J L, Kelly R, Mead D G, Kolhe P, Howgate J, Kitron U, Burkot T R. The risk of West Nile Virus infection is associated with combined sewer overflow streams in urban Atlanta, Georgia, USA. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(10): 1382-1388, doi: 10.1289/ehp.1001939.
- [76] Chow S D, Chang C. Shanghai urban influences on humidity and precipitation distribution. *Geojournal*, 1984, 8(3): 201-204.
- [77] Detty J M, McGuire K J. Threshold changes in storm runoff generation at a till-mantled headwater catchment. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): W07525.
- [78] Howard L. *Climate of London Deduced from Metrological Observations*. 3rd ed. London: Harvey and Dorton Press, 1833.
- [79] Hao L, Huang X L, Qin M S, Liu Y Q, Li W H, Sun G. Ecohydrological processes explain urban dry island effects in a wet region, southern China. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6757-6771.
- [80] Qiu G Y, Zou Z D, Li X Z, Li H Y, Guo Q P, Yan C H, Tan S L. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*, 2017, 68: 30-42.
- [81] Kalnay E, Cai M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 2003, 423(6939): 528-531, doi: 10.1038/nature01675.
- [82] Zhou D C, Li D, Sun G, Zhang L X, Liu Y Q, Hao L. Contrasting effects of urbanization and agriculture on surface temperature in eastern China. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121(16): 9597-9606.
- [83] Brunsell N A, Jones A R, Jackson T L, Feddema J J. Seasonal trends in air temperature and precipitation in IPCC AR4 GCM output for Kansas, USA: evaluation and implications. *International Journal of Climatology*, 2010, 30(8): 1178-1193.
- [84] Ellison D, Morris C E, Locatelli B, Sheil D, Cohen J, Murdiyaro D, Gutierrez V, Van Noordwijk M, Creed I F, Pokorny J, Gaveau D, Spracklen D V, Tobella A B, Ilstedt U, Teuling A J, Gebrehiwot A G, Sands D C, Muys B, Verbist B, Springgay E, Sugandi Y, Sullivan C A. Trees, forests and water: cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 2017, 43: 51-61.
- [85] Shastri H, Barik B, Ghosh S, Venkataraman C, Sadavarte P. Flip flop of day-night and summer-winter surface urban heat island intensity in India. *Scientific Reports*, 2017, 7: 40178.
- [86] Fang D, Hao L, Cao Z, Huang X L, Qin M S, Hu J C, Liu Y Q, Sun G. Combined effects of urbanization and climate change on watershed evapotranspiration at multiple spatial scales. *Journal of Hydrology*, 2020, 587: 124869.
- [87] Kiehl J T, Trenberth K E. Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(2): 197-208.
- [88] Lokoshchenko M A. Urban heat island and urban dry island in Moscow and their centennial changes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2017, 56(10): 2729-2745.
- [89] 傅新姝. 城市群对夏季降水影响的观测分析和数值模拟研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [90] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [91] Suriya S, Mudgal B V. Impact of urbanization on flooding: the Thirusoolam sub watershed: a case study. *Journal of Hydrology*, 2012, 412-413: 210-219.
- [92] Ferguson B K, Suckling P W. Changing rainfall-runoff relationships in the urbanizing Peachtree Creek watershed, Atlanta, Georgia. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 1990, 26(2): 313-322.
- [93] Brattebo B O, Booth D B. Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems. *Water Research*, 2003, 37(18): 4369-4376.
- [94] Asaeda T, Ca V T. Characteristics of permeable pavement during hot summer weather and impact on the thermal environment. *Building and Environment*, 2000, 35(4): 363-375.
- [95] IUCN. No time to lose-make full use of nature-based solutions in the post-2012 climate change regime. Gland, Switzerland: IUCN, 2009[2019-12-10]. https://www.iucn.org/sites/dev/files/import/downloads/iucn_position_paper_unfccc_cop_15.pdf.
- [96] France R L. *Wetland Design: Principles and Practices for Landscape Architects and Land-Use Planners*. New York: Norton, 2003.
- [97] 赵银兵, 蔡婷婷, 孙然好, 倪忠云, 张婷婷. 海绵城市研究进展综述: 从水文过程到生态恢复. *生态学报*, 2019, 39(13): 4638-4646.