

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.02.005

基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响 开发效果模拟与评估

朱寒松^{1,2},董增川¹,曲兆松³,金鑫³,纪红军^{2,3},陈蓉³

(1. 河海大学水文水资源学院,江苏南京 210098; 2. 南京思孚泰科信息技术有限公司,江苏南京 210098;
3. 北京尚水信息技术股份有限公司,北京 100084)

摘要:以重庆市渝北区花朝工业园为研究对象,分别设计单一生物滞留池、渗透性路面、绿色屋顶控制方案以及生物滞留池-渗透性路面-绿色屋顶组合式方案,构建 SWMM 模型模拟不同方案对研究区域的径流、洪峰削减影响效果。模拟结果表明,LID 措施的径流削减效果在重现期为 2 年、10 年时更显著;单一方案中渗透性路面的径流控制效果与洪峰削减效果更显著;组合式方案的径流控制效果优于单一方案的和值,表明彼此间相互产生正影响。组合式方案的洪峰削减效果低于单一方案的和值,表明彼此间相互产生负影响。

关键词:SWMM 模型;低影响开发;降雨径流模拟;组合式方案

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)02-0032-05

Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM // ZHU Hansong^{1,2}, DONG Zengchuan¹, QU Zhaosong³, JIN Xin³, JI Hongjun^{2,3}, CHEN Rong³ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Sinfotek Information Technology Co., Ltd., Nanjing 210098, China; 3. Beijing Sinfotek Technology Joint Stock Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: Taking Huachao Industrial Park in Yubei District of Chongqing as the research object, single scheme and combined scheme of biological detention pool, permeable pavement and green roof were designed respectively, and SWMM was constructed to simulate the effects of different schemes on the study area. The simulation results show that the runoff reduction effect of low impact development (LID) measures is more significant when the recurrence period is 2 years or 10 years. The runoff control effect and flood peak reduction effect of the single scheme of permeable pavement is more significant. The runoff control effect of the combined scheme is better than the sum value of single schemes, which shows that they have a positive impact on each other. The peak reduction effect of the combined arrangement scheme is lower than the sum value of single schemes, which indicates that they have negative effects on each other.

Key words: SWMM; low impact development; rainfall runoff simulation; combined scheme

随着城市化进程的快速推进,城区的下垫面条件发生了很大的变化^[1]。硬化的下垫面导致洪水流速加快、汇流时间缩短,引发了城市内涝、城市水环境污染等一系列问题^[2]。传统的城市排水系统和灰色基础措施难以从根本上解决新形势下城市雨洪控制问题,基于低影响开发(low impact development, LID)理念^[3]的城市雨水利用能够从源头滞水、渗水、蓄水、净水等方面缓解地表径流压力^[4],弥补传统排水措施的不足。作为一种可持续

城市雨洪控制方法,LID 技术通过模拟自然状态下的水文条件,运用源头控制的理念,采用小型、分散以及低成本的雨水利用及消纳措施,对城市雨水进行有效控制与高效利用^[5-6]。为了优化 LID 布局,Xu 等^[7]采用基于边际成本的贪婪策略对 LID 布置进行优化。Mooers 等^[8]在研究 LID 措施对于含水层补给的影响中,采用耦合雨洪管理模型与地下水模型的方法进行模拟分析,认为布置 LID 措施有助于恢复含水层补给条件。

作者简介:朱寒松(1995—),男,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:hansongzhu95@163.com

通信作者:曲兆松,教授级高级工程师。E-mail:qsl188@126.com

目前,对于 LID 单项措施的研究已相对成熟,但是综合布设 LID 措施时,不同措施之间效果的相互影响尚不清晰^[9]。重庆市渝北区花朝工业园土地利用类型较多,有工厂、商业楼、停车场、道路、绿地等,可布置较多种类的 LID 措施。本文选择该区域为研究对象,研究不同 LID 单项措施布设与综合布设情况下径流系数与洪峰流量的削减效果,并研究综合布设方案的削减效果与单项措施布设效果和值之间的关系,以期为城市雨水控制与利用规划提供参考。

1 SWMM 模型与 LID 措施介绍

SWMM 模型是由美国国家环境保护署开发的一种用于雨水资源管理的数值模型^[10],由 4 个计算模块(径流模块、输送模块、扩充输送模块和存储/处理模块)和 1 个服务模块组成^[11]。其主要功能包括:地表径流和管道径流量计算、降雨径流过程模拟、城市地表径流污染产生和扩散的模拟以及自然排水系统和管网的水质模拟^[12-13],主要应用于中、小尺度下的雨水管理系统的构建^[14]。模型的 LID 控制模块可分为 5 类:①生物滞留网格,包括雨水花园、绿色屋顶等;②雨桶;③渗渠;④草洼;⑤连续多孔路面系统^[15]。最新版的 SWMM 模型不仅能够模拟 LID 措施布置,校正模型也更容易^[16]。

研究区域的 LID 布置主要分为两种方式:①子集水区层面。将模型概化成若干个子集水区,在子集水区直接布置一种或多种不同类型的 LID 措施,通过预先设定 LID 的所占面积、控制面积以及各个参数实现 LID 的具体布置。这种方式多适用于较大区域的 LID 模拟。②场地层面。添加一个由单一 LID 构成的子集水区,通过控制该子集水区的属性来实现 LID 控制。这种方式适合较小区域的 LID 模拟^[17]。本文研究区域面积较大,选择第一种子集水区层面布置 LID 措施。

2 模型构建

2.1 研究区概况

重庆市渝北区花朝工业园地处东经 106°31'49"~106°33'1"、北纬 29°41'55"~29°42'39",属亚热带湿润气候区,大陆性季风气候特点显著,常年平均降雨量 1 100 mm。研究区域占地总面积 108.95 hm²,其中不透水区域面积 65.37 hm²,占总面积的 60%,由屋顶、停车场、不透水道路组成;透水面积 43.58 hm²,占总面积的 40%,由普通绿地组成。区域内现状用地情况见图 1。

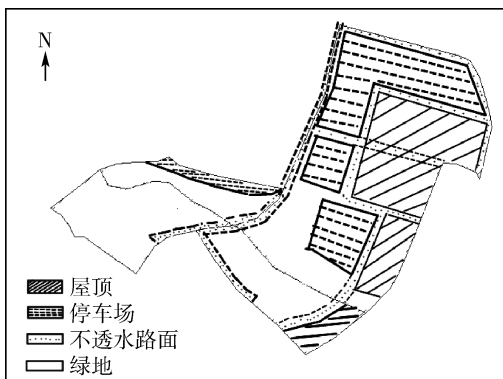


图 1 现状用地情况

软件的水文分析功能,进行研究区域的概化。根据研究区域的管网资料,沿着管网走向、建筑物和街道分布,依据屋顶、不透水路面、停车场概化为不透水面,普通绿地概化为透水面的原则,将整个研究区域分为 16 个子集水区、108 个节点、103 条管道、2 个排水口。具体概化图见图 2。

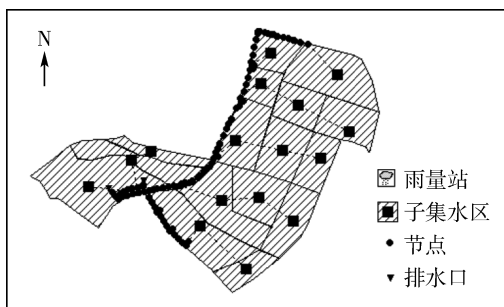


图 2 研究区域概化图

2.2 模型参数选取

2.2.1 暴雨强度计算

暴雨是产生城市内涝的主要原因,除了雨量、雨强等影响因素外,雨型对内涝也有重要影响。目前人们研究出的雨型主要有芝加哥雨型、P&C 雨型、Huff 雨型等。2017 年重庆市市政设计研究院和重庆市气候中心联合编制了《重庆市暴雨强度修订公式与设计暴雨雨型》。本文选取重庆市渝北区暴雨强度公式(式(1))分别推求重现期为 2 a、10 a、100 a 时的设计暴雨强度,并利用主城区 3 h 设计暴雨过程推求 $t = 3$ h、时间间隔为 5 min 的设计降雨过程线。不同重现期下设计降水过程线见图 3。

$$q = \frac{1111(1 + 0.945 \lg P)}{(t + 9.713)^{0.561}} \quad (1)$$

式中: q 为 t 时间内的平均暴雨强度; t 为降水历时; P 为设计降雨重现期。

2.2.2 SWMM 模型参数选择

根据研究区域子集水区的面积大小、宽度、平均坡度、管道相关参数、区域不透水面积比例等参数,通过 GIS 软件的统计功能、实测数据资料以及当地

利用研究区域的 DEM 数据,通过使用 ArcGIS

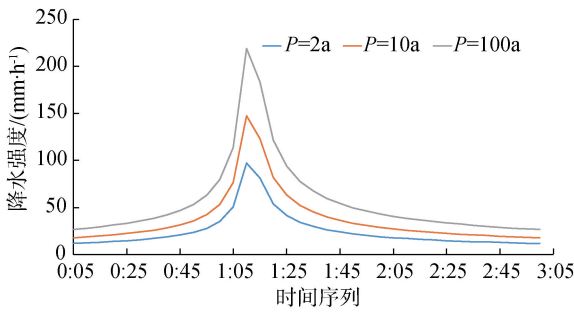


图3 设计降水过程线

管网资料来确定 SWMM 模型参数。降水入渗过程采用 SCS 模型进行模拟, CN 值取 76。地表径流的汇流计算采用非线性水库法, 模拟排水系统流量演算的模型使用动力波模型。模型参数的初始值主要依据当地实际情况和模型使用手册中的推荐值^[18], 不透水面曼宁系数为 0.01, 透水面曼宁系数为 0.1, 不透水性洼地蓄水深度和渗透性洼地蓄水深度均为 0.05 mm。采用 2018 年 5 月 11 日、20 日的两场实测降水径流过程进行模型参数率定, 采用 2018 年 5 月 31 日的实测降水径流过程进行模型验证。模型验证结果见图 4, 可见模拟水位过程与监测站点实测水位过程基本一致, 可以认为模型参数选择合适, 能够用于该区域城市雨水控制与利用模拟计算。

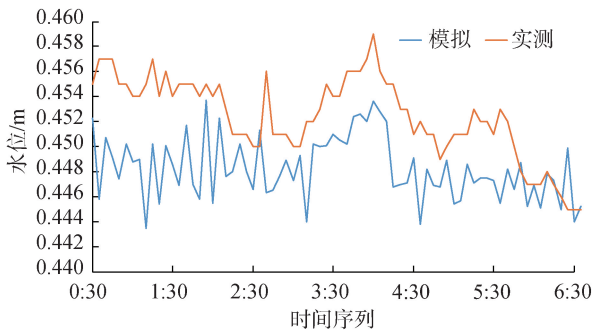


图4 模型验证结果

2.2.3 LID 措施选择

研究区域的土地利用类型主要有屋顶、不透水道路、停车场和普通绿地等。根据实际情况, 选择使用生物滞留池、绿色屋顶、渗透性路面 3 种 LID 措施。与地面径流的雨水相比较, 屋顶的雨水水质较好、水量较大、收集利用方便、利用价值较高, 绿色屋顶利用屋顶平台收集到的雨水种植植物, 扩大城市绿色空间, 可以减少雨水资源的流失、改善屋顶雨水的水质。渗透性路面多用于广场、停车场、人行道等道路, 通过高透材料将路面雨水渗透到路基或周围土壤中存储, 可有效缓解城市排水压力。生物滞留池通过暂时性的滞留、存储雨水, 借助于植物等的过流作用和土壤特性净化雨水, 实现雨水的延缓与过滤, 减少地表径流的同时还能美化环境。

3 结果分析

3.1 传统模式模拟结果

将不同重现期下的设计降水过程线输入构建的 SWMM 模型中, 得到传统模式下的区域径流过程, 见表 1。

表1 传统模式下模拟结果

重现期/a	降水量/mm	径流深/mm	径流系数	径流控制率
2	75.24	57.47	0.764	0.236
10	113.93	88.11	0.773	0.227
100	169.28	132.58	0.783	0.217

由表 1 可见, 传统的开发模式下, 区域的径流控制率较低, 形成的径流量较大, 且随着重现期的增大, 径流控制率呈减小的趋势。这是由于降水量随着重现期的增大而增加, 城市的下垫面硬化造成不透水率较大, 较大面积的不透水表面使得雨水无法及时下渗, 进而产生较大的地表径流, 传统的城市排水系统难以较快的排放地表径流, 从而增加了城市内涝的风险。

3.2 LID 布置模拟结果

本研究的 LID 措施选择了绿色屋顶、生物滞留池和渗透性铺装。绿色屋顶主要布置在工厂、商业楼等的楼顶上, 布设面积是研究区域内由屋顶概化而来的不透水面面积。生物滞留池主要通过改造普通绿地进行布置, 将现有绿地的一部分改造为生物滞留池。根据 500 m² 的生物滞留池控制 5 000 m² 区域径流的原则, 将研究区内绿地面积的 5% 布设为生物滞留池。渗透性铺装主要布置在停车场内, 布设面积是研究区域内由停车场概化而来的不透水面面积。模拟不同重现期下 3 种 LID 措施单独布设与组合布设时的径流系数与洪峰流量, 模拟结果见表 2。考虑组合布设和单独布设对区域径流的影响, 计算进行 LID 布置后相对于传统模式下的径流削减率与洪峰削减率, 结果见表 3。

由表 3 可知, 在重现期为 2 a 的情况时, 渗透性铺装的径流削减率达到 32.59%, 削减效果优于生物滞留池的 9.29% 以及绿色屋顶的 3.53%。渗透性铺装的洪峰削减效果最好, 达到 43.95%, 优于生物滞留池的 11.61% 以及绿色屋顶的 32.69%。生物滞留池的径流削减效果与洪峰削减效果均比较差, 认为与其布设面积较小、控制面积过大有关系。绿色屋顶的径流控制率过低, 认为与屋顶植被层较薄、蓄水层较小有关。组合式方案的径流削减率达到 46.34%, 削减效果优于 3 种 LID 措施单独布设, 且组合式方案的洪峰削减率达到 72.4%, 削减效果远大于单独布设。各个方案的径流削减效果与洪峰削

表 2 LID 布置前后的径流系数和洪峰流量

模式	径流系数			洪峰流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		
	$P = 2 \text{ a}$	$P = 10 \text{ a}$	$P = 100 \text{ a}$	$P = 2 \text{ a}$	$P = 10 \text{ a}$	$P = 100 \text{ a}$
传统开发模式	0.764	0.773	0.783	30.55	47.66	72.71
单一生物滞留池	0.693	0.724	0.748	27.00	43.00	68.00
单一渗透性铺装	0.515	0.534	0.571	17.12	28.03	43.00
单一绿色屋顶	0.737	0.754	0.769	20.56	33.06	51.64
组合式	0.41	0.458	0.514	8.43	16.54	28.79

表 3 LID 布置后径流系数和洪峰流量削减率

LID 方案	径流系数削减率/%			洪峰流量削减率/%		
	$P = 2 \text{ a}$	$P = 10 \text{ a}$	$P = 100 \text{ a}$	$P = 2 \text{ a}$	$P = 10 \text{ a}$	$P = 100 \text{ a}$
单一生物滞留池	9.29	6.29	4.44	11.61	9.78	6.48
单一渗透性铺装	32.59	30.92	27.08	43.95	41.19	40.86
单一绿色屋顶	3.53	2.46	1.79	32.69	30.63	28.99
组合式	46.34	40.75	34.36	72.40	65.29	60.40

减效果均随重现期的增大而减小。

为了研究组合式布设与单独布设之间的影响关系,计算组合式布设方案削减率与 3 种单独布设削减率和值的比值。在重现期分别为 2 a、10 a、100 a 的情况,组合式方案的径流削减率与单一方案径流削减率和值的比值分别为 1.0202、1.0273、1.0314,组合式方案的洪峰削减率与单一方案和值的比值分别为 0.8203、0.8002、0.7914。组合式方案的径流削减率大于 3 种单项措施径流削减率的和值,组合式方案的洪峰削减率小于 3 种单项措施洪峰削减率的和值。随着重现期的增加,径流削减率的比值呈现增大的趋势,说明这 3 种措施组合的径流控制效果要优于单一措施,相互之间产生正影响。组合式方案能够更好地发挥 LID 措施的拦蓄、滞留作用,延长径流到达出口断面的时间,使径流受到的控制效果大于单独布设的和值。洪峰削减率的比值随重现期增大而呈现减小的趋势,按照组合式方案布置时,这 3 种措施组合的洪峰削减效果低于和值,说明 3 种措施之间相互产生负影响,且随着重现期的增大,负影响也随之增大。洪峰流量大、持续时间长,短历时高强度的过程使得 LID 措施无法完全发挥滞留作用,导致组合式方案的洪峰削减效果小于单独布设的和值。

4 结论

a. 基于 SWMM 模型,选择生物滞留池、绿色屋顶、渗透性铺装 3 种不同的 LID 措施,模拟重庆市花朝工业园区在传统开发模式与 LID 模式下的径流过程。研究表明,LID 措施能够有效削减径流,削减洪峰,但削减效果随着重现期的增大而减小。

b. 组合式方案的径流削减率达到 46.34%,洪峰削减率达到 72.4%,削减效果优于 3 种 LID 措施

单独布设。

c. 组合式方案的径流控制效果优于单一方案的和值,表明 3 种 LID 措施彼此间相互产生正影响。组合式方案的洪峰削减效果低于单一方案的和值,表明 3 种 LID 措施彼此间相互产生负影响。

参考文献:

- [1] 吴海春,黄国如. 基于 PCSWMM 模型的城市内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 11-16. (WU Haichun, HUANG Guoru. Risk assessment of urban waterlogging based on PCSWMM model [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 11-16. (in Chinese))
- [2] 宋奔奔,高成,寇传和,等. 基于 SWMM 的生物滞留池布置水文时空效应[J]. 水资源保护, 2017, 33(3): 25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(3): 25-30. (in Chinese))
- [3] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))
- [4] 李霞,石宇亭,李国金. 基于 SWMM 和低影响开发模式的老城区雨水控制模拟研究[J]. 给水排水, 2015, 41(5): 152-156. (LI Xia, SHI Yuting, LI Guojin. Simulation study on stormwater controlling system of the old town based on SWMM and LID [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41(5): 152-156. (in Chinese))
- [5] 王建龙,车伍. 低影响开发与绿色建筑[J]. 中国给水排水, 2011, 27(20): 17-20. (WANG Jianlong, CHE Wu. Low impact development and green building [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(20): 17-20. (in Chinese))
- [6] 李爽,邢国平,刘洪海,等. 基于低影响开发的天津市绿

- 色雨水基础设施应用研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(2):147-150. (LI Shuang, XING Guoping, LIU Honghai, et al. Developing low impact green stormwater infrastructure in Tianjin City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(2):147-150. (in Chinese))
- [7] XU T, ENGEL B A, SHI X M, et al. Marginal-cost-based greedy strategy (MCGS): fast and reliable optimization of low impact development (LID) layout[J]. Science of the Total Environment, 2018, 640:570-580.
- [8] MOOERS E W, JAMIESON R C, HAYWARD J, et al. Low-impact development effects on aquifer recharge using coupled surface and groundwater models[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2018, 23(9):401-408.
- [9] 周亚玲, 叶兴成, 王飞, 等. 低影响开发措施综合布设条件下区域径流削减效果[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4):18-21. (ZHOU Yaling, YE Xingcheng, WANG Fei, et al. Reduction effect of regional runoff under conditions of comprehensive layout of low impact development measures[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(4):18-21. (in Chinese))
- [10] 王建婷, 董增川, 孙艳伟, 等. 基于海绵城市的生物滞留池水文效应分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(10):42-45. (WANG Jianting, DONG Zengchuan, SUN Yanwei, et al. Application of mamdani fuzzy inference system based principal component analysis in river health evaluation[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(10):42-45. (in Chinese))
- [11] 栾慕, 袁文秀, 刘俊, 等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护, 2016, 32(2):57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2):57-61. (in Chinese))
- [12] 王海潮, 陈建刚, 张书函, 等. 城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. 水利水电技术, 2011, 42(11):10-13. (WANG Haichao, CHEN Jiangang, ZHANG Shuhan, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(11):10-13. (in Chinese))
- [13] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型 SWMM 的原理、参数和应用[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4):4-7. (ZHANG Xiaoyan, ZHANG Na, WU Fangfang, et al. Stormwater management model (SWMM): principles, parameters and applications [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4):4-7. (in Chinese))
- [14] 肖存艳, 傅春, 詹健. 基于 SWMM 的中尺度雨水系统构建下的水质水量模拟[J]. 水利水电技术, 2018, 49(3):17-25. (XIAO Cunyan, FU Chun, ZHAN Jian. SWMM-based simulation on water quality and water quantity for construction of mesoscale rainwater system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3):17-25. (in Chinese))
- [15] 官奕宏, 吕谋, 王灿, 等. 低影响开发技术的雨洪控制效果及水质影响分析: 基于 SWMM 模型[J]. 中国农村水利水电, 2017(1):84-87. (GUAN Yihong, LYU Mou, WANG Chan, et al. LID stormwater control effect and water quality simulation based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(1):84-87. (in Chinese))
- [16] GRANATA F, GARGANO R, DE MARINIS G. Support vector regression for rainfall-runoff modeling in urban drainage: a comparison with the EPA's storm water management model[J]. Water, 2016, 8(3):69-81.
- [17] 何爽, 刘俊, 朱嘉祺. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式雨洪控制利用效果模拟与评估[J]. 水电能源科学, 2013, 31(12):42-45. (HE Shuang, LIU Jun, ZHU Jiaqi. Rainwater control and utilization effect assessment and simulation of low impact development based on SWMM [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(12):42-45. (in Chinese))
- [18] LEWIS A R. Storm water management model User's manual Version 5.0. [M]. Washington D C: USEPA, 2009. (收稿日期: 2018-06-12 编辑: 王芳)

· 简讯 ·

全球冰川和冰帽对海平面上升的贡献

美国科罗拉多大学波德分校托马斯雅科博、约翰瓦尔、塔德普费弗与美国国家大气研究中心的肖恩斯文森共 4 位科学家在《自然》482 期撰文, 详细阐述了 2003 年 1 月至 2010 年 12 月之间, 全球冰川和冰帽消融对海平面上升的贡献。冰川和冰帽消融是当前海平面上升的重要贡献因素。原先的全球冰川和冰帽变化估算主要依赖于稀疏的物质平衡观测点, 而冰川和冰帽消融对海平面上升的整体贡献并不清楚。该研究指出, 2003 年 1 月至 2010 年 12 月 8 年间, 除了格陵兰岛和南极洲, 全球的冰川和冰帽每年损失 (148 ± 30) Gt, 从而引起海平面每年上升 (0.41 ± 0.08) mm。这个结果是基于全球月尺度 GRACE 重力卫星联合反演技术, 针对面积大于 100 km^2 的所有冰覆盖区域的物质变化计算得来的。研究发现: 冰川和冰帽损失速率明显小于原先的物质平衡估算结果, 特别是在亚洲高山区, 每年损失仅为 (4 ± 20) Gt, 远远低于原先发表的每年损失 47 ~ 55 Gt 的冰量。为了完整展示, 该研究还单独估算了格陵兰岛和南极冰原, 包括它们外围的冰川和冰帽。研究得出重要结论: 2003—2010 年, 这些地区的冰川和冰帽融合导致海平面上升了 (1.06 ± 0.19) mm, 与其他地区叠加后, 全球冰覆盖区对海平面上升的总贡献是 (1.48 ± 0.26) mm/a。海平面上升不仅会淹没沿海土地, 还会引起海水倒灌, 侵入海岸带地区的地下淡水, 破坏河口地区的生态系统(如红树林), 同时, 也会使得海啸、风暴潮等极端海洋灾害更容易发生, 给沿海国家和居民造成重大损失。该研究首次在全球尺度范围内采用重力卫星技术, 定量计算了当前气候变化背景下冰川和冰帽消融对海平面上升的贡献, 对全球陆地水资源研究和陆海水资源交互作用研究提供重要基石。

(河海大学 雍斌供稿)