加州奥兰治县低影响开发：实施和评估中的挑战与对策

Implementation of Low Impact Development in Orange County, California:
Challenges and Solutions in Implementation and Assessment of Progress

克里斯·克朗普顿 彭舰 丹尼尔·阿普特 马克·格雷 著 李雅 译
Written by Chris Crompton, Peng Jian, Daniel Apt, Mark Grey Translated by Li Ya

摘要：本文首先介绍美国加利福尼亚州奥兰治县从严重破坏自然溪流形态、栖息地和水质的粗放发展方式，转向平衡城市开发前后水文特征和自然环境的低影响开发历程；然后总结奥兰治县在实施和评估低影响开发绩效方面的逻辑框架和创新方法。奥兰治县通过参与区域低影响开发项目评估研究、制定低影响发展指导文件、创造评估低影响开发性能的系统框架，将低影响开发的实施和评估标准化，而在低影响开发受限区域则利用水质信贷交易建立替代性项目。本文通过对两个实际案例（格拉塞尔园区评估项目和莱格西园区水质交易项目）的分析，认为低影响开发设计前的场地调查、模拟和监测工作，实施后的标准化监测和数据共享，以及灵活的水质交易机制是低影响开发项目成功的关键。奥兰治县经验可为中国城市进行低影响开发实施和评估提供方法借鉴。

Abstract: This paper discusses Orange County's transition from a conventional urban development approach that resulted in significant damages to natural stream morphology, habitat, and water quality to a more balanced approach that attempts to balance pre-development and post-development hydrology to protect these resources. It then summarizes the framework and innovative approaches being undertaken to implement and assess the Low Impact Development (LID) in Orange County. Participating in the regional study to understand the effectiveness of LID, Orange County has developed guidance documents and created a systematic framework to assess the LID performance. These are aimed to standardize the LID approaches and develop alternative compliance program through water quality credit trading in the LID-restricted areas. Through two case studies, Glassell Campus Stormwater LID Retrofit Project and Legacy Campus Water Quality Credit Trading Program, we find out key factors to the success of LID implementation include: the site survey, modeling, and monitoring prior to the project design; the post-project standard monitoring and data sharing; and the flexible water quality credit trading system. China can potentially learn from Orange County's experiences for its implementation and assessment of LID.

关键词：低影响开发；奥兰治县；实施；评估

Keywords: Low Impact Development; Orange County; Implementation; Assessment

国家自然科学基金项目 (41501169)

作者：克里斯·克朗普顿（通信作者），奥兰治县环境资源局水质达标处处长。

chris.crompton@ocpw.ocgov.com

彭舰，博士，奥兰治县环境资源局水质规划部主任

丹尼尔·阿普特，奥拉努（Olaunu）公司总裁

马克·格雷，博士，南加州建筑商联合会环境总监

译者：李雅，天津大学建筑学院博士研究生，华盛顿大学景观建筑系联合培养博士研究生。
liya@tju.edu.cn

1 美国低影响开发实施与评估背景

美国的雨洪管理源于 19 世纪对部分城市公共健康和财产的保护，到 20 世纪中期，逐渐发展为对洪峰和水质的管理。随着城市土地开发的进程，城市下垫面形成大量不透水地面，严重改变了自然水文机理，损害了下游水体环境。传统的雨水管道、沟渠、涵洞和滞留塘难以解决此类水质问题，且浪费雨水资源，在环境、社会和经济方面皆不可持续。1996 年，马里兰州乔治王子县（Prince George's County, Maryland）的环境资源部首次提出“低影响开发”（LID: Low Impact Development）理念，将其作为一种修复和模仿自然水文的方法，用于解决新建住宅、商业和郊区工业开发的径流问题，并改善下游水质。乔治王子县于 1999 年发布了第一份低影响开发指南《低影响开发设计策略：一个综合设计方法》，综合了低影响土地开发方法，包括场地规划、水文分析、综合管理实践、侵蚀和泥沙治理以及公众教育项目等^[1]。

在乔治王子县的影响下，早期实施低影响开发的先驱城市包括费城、芝加哥、西雅图、波特兰和旧金山等。美国环境保护局和加州区域水质管理局（State of California Regional Water Quality Control Boards）也支持并鼓励管理部门对新建和再开发项目实施低影响开发。通常情况下，会随着低影响开发构思最佳管理实践（BMPs: Best Management Practices），之后与城市土地开发相结合，具体措施包括雨水渗滤、收集和使用、生物渗滤/生物处理系统等。这些措施可截留一部

分径流,使其下渗至地下或储存起来实现再利用和再循环。这种以削减径流量为主的措施有助于减少污染物进入水体,从而满足水质目标。除就地雨水滞留设施外,低影响开发还包括区域和亚区域滞留设施。经过20多年的发展,这些先驱城市和地区获取了很多宝贵的经验。

近年来,美国低影响开发的重点包括:城市绿色街道和路边绿色基础设施建设;低影响开发和流域规划整合,即利用低影响开发和绿色基础设施改善流域的整体卫生状况;标准设计方案制定,以保证低影响开发实施的一致性;多重效益评价——除对水质和水文的改善,挖掘更多低影响开发所带来的益处,从而进一步鼓励低影响开发的实施;以及筹资渠道评价等。现在正在探索利用低影响开发建立水质和雨水滞留库及交易市场,以及对低影响开发的运营、维护以及性能进行评估等试点工作。低影响开发实施要求项目方向市政管理机构提交水质管理方案(包括低影响开发措施),进行审查和批复,审查由市政规划核查人员或政府聘请的低影响开发专家完成,以保证方案技术细节和设计的正确性。此外,很多市政和管理机构以培训、技术指导和技术帮助平台的形式,提供低影响开发技术支持,保证项目顺利实施。例如加州已经制定具体的检查和评估方法,对低影响开发前后的水质和水文条件进行监测以获取水质和水文数据,并将在未来用于建立实时水质模型,分析低影响开发对下游水体和流域健康的影响。市政当局、区域项目和管理机构通过综合项目追踪和监测,并将监测数据与流域水质模型结合,帮助政府了解哪些设施有待检查,以及衡量城市或流域的低影响开发实施水平。

2 加州奥兰治县低影响开发进程

奥兰治县(Orange County)位于美国加利福尼亚州南部,土地面积1 528 km²,人口310万,是美国人口第六大县;其下辖34个城市、11个流域和68 km以公共休闲为主的海岸线。在美国,奥兰治县是一个典型的低影响开发案例研究区,其低影响开发实施开始于15年前,紧跟一些先驱城市之后。与其他高度城市化地区类似,奥兰治县城市化区域的雨水径流比非城市化或自然地区有更高的洪峰流量和污染物浓度(包括悬浮固体、营养物、细菌和毒性污染物)。从1990年开始,加州区域水质管理局通过颁发城市雨水排放许可,即通过国家污染物排放削减系统(NPDES: National Pollutant Discharge Elimination System)对奥兰治县雨洪管理进行监管。区域水质管理局要求在商业和工业设施、施工场地和市政设施上实施最佳管理实践;消除非法接管和非法排放;为新建和重大重建土地开发项目提供新的雨洪管理方法;以及综合监控和报告水质发展情况。

21世纪初,奥兰治县对雨水排放的监管还不完善,城市土地开发引起的雨水径流仅经过有限的处理即可排放,由此导致了当地海岸和河道污染、海滩关闭、河道垃圾等问题,以及野生动物栖息地退化等环境问题。当地居民和媒体开始持续关注城市化带来的雨洪污染问题。州政府也开始规定在雨洪源头或其附近实施雨洪滞留措施:对于不透水地面面积在5 000平方英尺(464 m²)以上的土地开发和重大的土地再开发项目,要求其能对24小时降雨事件(在南加州通常不足25 mm)进行85%的雨水滞留。应对这一新的法规,奥兰治县提出通过低影响开发措施进行雨洪管理。

奥兰治县对低影响开发的实施条件,如土壤类型、浅层地下水、污染物扩散等的空间分布进行了大量的详细调查,并据此制定了具体的技术导则^[24]。这些导则要求在流域尺度上考虑综合水管理的需求,评估如何以及在哪里进行低影响开发,并且最大化地利用现有雨洪基础设施,改善水质,实现多重效益。同时,奥兰治县建立了水质信贷交易系统(water quality credit trading system),当就地滞留不可行,无法实现水质达标时,该系统能够使项目开发创建异地的区域或亚区域尺度项目,从而替代项目本地滞留措施。本文将重点分析奥兰治县在评估低影响开发实施中所采用的方法框架和具体案例。

3 奥兰治县低影响开发性能评估框架

根据加州政府调查,低影响开发实施后对开发场地进行定期监测和评估的项目寥寥无几,仅集中在政府拨款资助的公众示范项目。虽然奥兰治县雨洪管治转向低影响开发的过程比较迅速,但缺乏相关的监测数据,实施和评估方法也在不断改良中。目前奥兰治县评估低影响开发的逻辑框架源自其所参与的区域研究项目“南加州雨水监测联盟低影响开发有效性和分析网络”(SMC CLEAN: Southern California Stormwater Monitoring Coalition LID Effectiveness and Analysis Network)。该项目致力于补充、完善低影响开发的监测数据和评估方法,分析低影响开发对移除污染物和降低水文改变影响的有效性,以便政府和公众更好地掌握低影响开发实时动态。

3.1 低影响开发项目评估的重点内容

SMC CLEAN项目组针对不同的时间尺度,确定了南加州低影响开发效能监测的两个主要方面:(1)量化短期低影响开发性能的关键指标,提供用于水质模型矫正估算的经验数据;(2)通过与项目合作伙伴的合作,收集低影响开发的长期监测数据,分析不同低影响开发设施的性能变化规律,以及确定设施的设计、施工和维护差异对设施性

能的影响程度。

该研究的调查结果显示低影响开发在污染物去除和水文效益方面的性能受多重变量影响，主要包括：(1) 低影响开发设施的设计构型和尺寸、土壤基质组分和植物选择等；(2) 对实施场地的保护程度、施工时序和植物种植时间；(3) 系统维护频率、植被调整、土壤侵蚀和泥沙淤积等。要准确地对低影响开发进行评估，就要获取低影响开发系统性能的元数据，然后构建场地环境变量与低影响开发设施性能的关系模型。SMC CLEAN 项目组依据研究成果编制了《南加州低影响开发指南》(Southern California Low Impact Development Manual)，为低影响开发的标准化提出了设计、施工、维护和监测方面的建议，以保证低影响开发最有效地实施。

3.2 低影响开发项目评估方法

SMC CLEAN 项目组针对低影响开发项目评估内容制定了具体的工作方法和评估目标，分为五个步骤。

第一步，从众多类型的低影响开发项目中选取主要评估对象。由公众、学术界、管理机构、环保组织和私营部门的专家组成技术咨询委员会 (TAC: Technical Advisory Committee)，委员会成员具有丰富的加州低影响开发的知识和经验。委员会的首要目标是为 SMC CLEAN 提供持续的技术指导。经 SMC CLEAN 项目组与委员会讨论，确定在初始阶段重点关注生物滞留 / 渗滤设施的有效性，因为这种措施在南加州最为普遍。具体的研究目标包括：(1) 短期目标——了解生物滞留 / 渗滤系统的污染物去除和径流控制效率，以校准流域项目；(2) 长期目标——改善生物滞留 / 渗滤系统的设计、施工和维护。为实现长期目标，SMC CLEAN 项目组将通过长期的数据收集，评估生物滞留 / 渗滤系统随着时间而变化的性能状况。

第二步，确立系统化的数据收集清单。SMC CLEAN 项目组发现达成低影响开发评估的短期和长期目标不仅需要收集水质和水流监测数据，而且必须获得其他相关监测数据，才能知晓设施有效性产生变化的原因。为此，项目组设立了《SMC CLEAN 标准的低影响开发项目数据信息清单》(SMC CLEAN Standard LID Project Data-Information List，下文简称《数据信息清单》)^[5]，包括：设计图和规格、项目竣工图、设计暴雨信息、支流排水区 (tributary drainage area) 尺寸、设施尺寸、支流排水区土地利用及比例、本地土壤信息 (包括水中无机物分析、地质报告和渗滤测试)、生物滞留或工程的土壤基质信息及来源、植物信息及来源、护根物信息及来源、施工记录和承包人信息、维护协议、施工程序和时序、记录和承包人信息、检验记录、数据跟踪协议、存取信息和报告协议，以及其他相关信息。

第三步，制定数据收集操作规范，执行初始监测程序。项目组制定《SMC CLEAN 标准的低影响开发监测准则》(SMC CLEAN Standard LID Monitoring Protocol，下文简称《监测准则》)^[6]，对生物滞留 / 渗滤系统进行监测。该准则描述了低影响开发或绿色基础设施项目的数据收集所应遵循的标准操作流程，包括项目管理信息、待收集信息的元数据清单、监测计划审查建议、数据采集过程的具体细节 (包括监测设备、场地搭建指导、水文和水质监测参数)，以及收集数据的目的。该监测准则通过建立标准化的数据收集和记录方法，能够确保不同场地的数据之间具有可比性。

第四步，分析监测数据、提出建议并更新《南加州低影响开发指南》^[7]。所有需要收集的数据都通过在线提交工具录入管理系统，形成南加州低影响开发监测信息数据库。该数据库可用于历史数据查询，并通过对监测数据的汇总和分析确定未来的研究方向。依据数据分析结果更新《南加州低影响开发指南》^[6]，对生物滞留 / 渗滤的设计、施工、维护和监测方法进行完善，并将监测端口设计纳入低影响开发设计导则。

第五步，通过《监测准则》，促使项目合作伙伴保持对开发场地的长期监测。开发场地的数据采集和监测准则的执行都需要广泛而密切的合作，内容包括：确定正在实施的监测和计划未来将要实施的监测、调查可用于分析的数据集、获取正在监测项目的元数据、考察监测场地，以及获取关于项目未来资助的信息。目前参与 SMC CLEAN 合作的机构和组织包括加州的市政部门、非营利环保组织、大学和水质管理局等监管机构；此外，SMC CLEAN 项目组也与“中国海绵城市倡议” (China Sponge City Initiative) 展开合作，以获取中国低影响开发试点项目的监测数据。

图 1 展示了 SMC CLEAN 评估的南加州低影响开发场地。这些场地都按照《数据信息清单》进行了数据收集，并依据

图 1 SMC CLEAN 低影响开发监测场地

低影响开发监测协议指导合作伙伴进行数据监测。表 1 展示了生物滞留 / 渗滤项目监测数据的初步分析结果。

3.3 低影响开发评估案例：格拉塞尔园区改造项目

格拉塞尔园区 (Glassell Campus) 是奥兰治县公共事务部等多个部门的所在地，位于奥兰治县北部，由 3 栋办公楼和仓库组成 (图 2)。在改造项目实施前，该园区地面有 90% 以上是不透水地面，未经处理的雨水径流携带灰尘、重金属和细菌直接排入雨水管道系统。2017 年 4 月，奥兰治县公共事务部在格拉塞尔园区完成了 3.8 hm² 的低影响开发改造项目。该项目是 SMC CLEAN 的重要监测点。加州政府给格拉塞尔园区提供了 290 万美元的低影响开发项目拨款 (Proposition 84 Stormwater Grant)；奥兰治县防洪局 (Orange County Flood Control District) 也相应划拨了 170 万美元；同时，这个项目是美国国家科学基金 (National Science Foundation) 资助的多个研究项目的试验场地，资助总额超过 700 万美元。目前，该项目由加州大学欧文分校 (University of California Irvine) 和其他加州大学分校、澳大利亚墨尔本大学 (University of Melbourne)、澳大利亚莫纳什大学 (Monash University) 及其他研究机构共同进行研究。

奥兰治县公共事务部负责协调设计、施工和项目管理工作。所设计的低影响开发设施包括贮水箱、透水铺装 (透

水砖、沥青和混凝土)、生物滞留池 (植有本地和耐旱植物)、雨水花园、模块化湿地和树箱介质过滤器 (tree box media filters) 等 10 多种类型。通过合理的组合布置，预计该项目能够对 24 小时降雨事件 (降雨量不超过 21.6 mm) 进行 100% 的雨水处理和 85% 的雨水滞留，去除 95% 的污染物，并每年截留 300 m³ 的雨水用于就地灌溉和补给地下水。

为确保该项目顺利实施，公共事务部在项目设计之前先组织进行了全面的场地调查、雨水径流模拟和监测工作 (图 3)。基于前期数据收集和设计项目的计算机模型模拟，项目前后的径流量变化情况在设计前就得到了精确估算以指导设计 (图 4)。同时，使用国际最佳管理实践数据库 (International BMP Database) 中不同低影响开发设施的性能数据，估算了不同的低影响开发设施在组合后可能实现的流量削减和污染物削减目标 (图 5)。除此之外，该项目将低

表 1 SMC CLEAN 生物滞留/渗滤项目的性能评估初始结果 (单位: %)

参数		平均总量减少	
水量		38	
参数		平均浓度减少	平均含量减少
综合水质	总悬浮固体	69	72
	溶解有机碳	62	76
细菌	肠球菌	51	52
	粪便大肠菌	15	22
	总大肠菌	67	62
金属 (总量和溶解量)	总铜	59	52
	溶解铜	58	50
	总铅	71	70
	溶解铅	100	100
	总锌	73	74
	溶解锌	76	74
	总锰	67	76
	溶解锰	72	81
营养物	总氮	43	66
	总凯达尔氮	79	79
	硝酸盐-亚硝酸盐	-141	-28
	总磷	16	32

图 2 格拉塞尔园区位置及开发前现状

图 3 格拉塞尔园区低影响开发前的场地调查与监测

影响开发设施的监测和研究整合到项目设计中，通过科学研究提高低影响开发设施和项目的长期绩效；同时，建造了一系列相同的生物渗滤测试单元，并在这些单元上以及其他设施上进行径流和污染物去除效率比照试验（图 6）。这些模

图 4 项目前（红色）、后（绿色）雨水径流模拟

图 5 基于国际数据库的不同低影响开发类型平均污染物移除效率估算

图 6 为雨水研究建造的 8 个相同的生物渗滤测试单元格 (1.52 m × 2.44 m × 1.83 m)

拟结果和测试实验为低影响开发方案设计提供了重要基础。奥兰治县公共事务部同时为该项目制定了项目实施质量保证计划和性能监测计划。

目前收集到的项目实施后监测数据显示，当初设计的雨洪管理目标已基本实现（表 2）。由于项目的实施改变了场地排水模式，本项目借助雨洪管理模型（SWMM: Storm Water Management Model）比较特定排水口在项目改造前、后的径

表 2 低影响开发实施前后水质监测数据对比

污染物	单位	低影响开发之前	低影响开发之后
总大肠菌 *	MPN	4 100	9 100
粪便大肠菌	MPN	83	9
肠球菌	MPN	1 340	1 190
浊度	NTU	218	15
总悬浮固体	mg/L	320	15
柴油烃	mg/L	2.03	NA
电导率	uS/cm ²	415.5	120
挥发性悬浮固体	mg/L	118	5
浊度	NTU	169.67	15
氨	mg/L	0.95	0.21
总凯氏氮	mg/L	7.87	ND
硝酸盐 + 亚硝酸盐	mg/L	11.6	1.6
总悬浮固体	mg/L	273	15
pH 值		6.78	8.08
总磷	mg/L	2.28	0.72
正磷	mg/L	0.19	0.16
亚甲基蓝活性物质	mg/L	1.2	0.13
砷	ug/L	1.69	7.5
镉	ug/L	0.83	0.58
铬	ug/L	6.31	1.8
铜	ug/L	58.95	9.5
铁	ug/L	3 071.95	800
铅	ug/L	11.63	1
镍	ug/L	11.3	3.4
硒	ug/L	0.63	ND
银	ug/L	0	NA
锌	ug/L	424.64	130
多环芳烃	ug/L	45	NA
邻苯二甲酸酯	ug/L	2903	NA
酚类化合物	ug/L	170	NA

注：* 低影响开发后上升的原因可能是由于绿化带使用的有机肥有指示微生物。

流量和污染物削减状况。在项目完成后不久对所安装的透水铺装进行了渗透测试,用于确定不同区域透水铺装的最佳维护间隔时间。

奥兰治县计划将格拉塞尔园区建成区域雨洪管理研究和教育中心,通过宣传册、展板、教育视频^[8]、网站和场地参观等途径扩大低影响开发的社会认知度和影响力。自项目施工起,已有30多个组织和300多人次参观了该项目,其中包括学生、市民、研究人员,以及政府和私营部门的管理和技术人员等。这个项目已经激励了奥兰治县其他类似改造项目的设计和实施。

4 低影响开发替代性达标对策:水质信贷交易

4.1 雨水排放许可制度与水质信贷交易

奥兰治县雨洪管理受到两个区域,即圣安娜地区(Santa Ana Region)和圣地亚哥地区(San Diego Region)水质管理局的监管。两个管理局通过城市“雨水排放许可证”制度对城市水环境、雨水管理和土地开发进行监管。该制度要求超过一定面积(最小为5 000平方英尺[464 m²])的所有新开发和再开发项目(统称为优先开发项目)都要进行低影响开发设计,特别要求要使用雨水滞留设施。如果项目所在地块由于技术原因不适合就地建设滞留设施,无法实现水质达标,则需要开发主体参与其他地块的低影响开发项目,即替代性项目(alternative compliance program)。这些替代性项目的选址一般设在同一流域内有水质问题或缺乏雨水径流处理设施的重点地块,以便实现区域总体水质效益最大化。

项目开发主体通过水质信贷交易机制选择替代性项目。具体而言,开发主体无法在本地块实现水质达标,则该地块的水质信贷(credit)不足,需要通过在其他地块建设或投资低影响开发项目(替代性项目),增加自己的水质信贷。这样通过水质信贷交易机制,优先开发项目在购买水质信贷后也可达到雨水排放许可证制度的要求。替代性项目的本质是一种水质信贷交易产品,即水质信贷生成设施(water quality credit generating facility)。替代性项目是促进公共机构和私营部门参与雨洪管理的有效途径。水质信贷交易机制有助于搭建多利益主体的合作关系,从而经济有效地解决雨水管理问题。

经评估,可作为替代性项目的滞留设施有四种类型,分别是生物处理、渗滤池、渗滤沟和地下渗滤系统。前三种属于地表滞留设施。大部分城市的汇水区径流通过地下雨水管输送,但由于管道的排水坡度,当径流经雨水管到达项目场地时,管内底标高会较深,难以将径流输送至地表滞留设施,地表滞留设施作用的发挥受到限制,所以地下滞留设施是截留大范围汇水区径流最可行的系统类型(图7)。

一个低影响开发项目作为替代性达标项目要满足四点要

求:(1)有充足的场地空间;(2)项目可接收的雨水径流大于该场地自身的设计截流量;(3)场地具备合适的水文条件和坡度,可将区域雨水径流汇集至替代性达标项目所在地;(4)在项目场地具备实施滞留设施的工程可行性,比如场地的土壤类型适合且能保证渗滤速度。

圣安娜地区的城市雨水许可证制度于2010年开始对奥兰治县生效,圣地亚哥地区的许可证制度则在2015年开始生效。两个区域水质管理局都批准了低影响开发替代性项目。有关低影响开发的管理文件包括《水质管理计划模板》(Model Water Quality Management Plans)、《水质管理计划技术指导性文件》(TGD: Technical Guidance Document)^[2,3]、《水质等价性文件》(Water Quality Equivalency Document)、《奥兰治县水文指南》(Orange County Hydrology Manual)和《圣地亚哥县最佳管理措施指南和手册》(San Diego County BMP Manual and Handbook)^[9]。

4.2 替代性项目案例:莱格西园区规划项目

莱格西园区规划项目(LCPP: Legacy Campus Plan Project,)由奥兰治县公共事务部、奥兰治县各城市政府、城市水利局和私营部门合作开发,是区域替代性项目的一个典型案例。该园区没有不利的地质条件、污染物迁移或相关土壤地下水污染问题,地下水深9 m以上。该项目设计的低影响开发方式为雨水地下滞留,其接收并滞留的雨水径流不仅来自园区本身(9 hm²),还包括当前未实施低影响开发的周边汇水区(97.5 hm²),被认为适合作为替代性项目(图8)。该项目计划利用现有雨水管道将周边汇水区的雨水输送到园区地下滞留系统。

莱格西园区可划分为四个区域:低影响开发改造区域、圣地亚哥溪(Santiago Creek)缓冲区,查普曼医院(Chapman Hospital)和查普曼医学中心办公楼(Chapman Medical Center Offices)(图8)。低影响开发改造区域被规划

图7 地下径流渗滤系统照片

为一个综合功能区，包括一栋新建的老年住宅区（2.73 hm²）、即将改建的查普曼医学中心办公楼（2.76 hm²）及商务办公区（0.92 hm²）（图 9）。项目的低影响开发策略是利用查普曼医院和医学中心周围的现有停车场和景观用地，建设地下滞留存储设施（2.15 hm²）。

莱格西园区现状用地特征如表 3 所示。整个场地的不透水区（屋顶和其他非透水区）约占 90%，透水区（景观和地表雨水滞留设施）约占 10%，施工后园区内部的设计截留量为 1 593 m³。莱格西园区周边汇水区用地特征如表 4 所示，设计截流量为 12 584 m³。对比表 3 和表 4 可发现：虽然莱格西园区仅占汇水区面积的 9%（即园区面积 / 周边汇水区面积），但其对于汇水区的截流贡献率约为 12.7%（即园区设计截流量 / 周边汇水区设计截流量），多余的截流量（约 3.7%）即可当作水质信贷进行交易。所以，莱格西园区可以成为其他地产开发项目的替代性项目。

图 8 莱格西园区周边汇水区土地利用示意图

5 结论

在过去 15 年，奥兰治县的雨洪管理和城市开发方式逐渐向低影响开发转变。在此过程中，奥兰治县参与了很多区域和地方低影响开发项目计划，通过制定低影响开发指导文件、创造评估低影响开发性能的系统方法，将低影响开发的实施和评估标准化，并借助水质信贷交易项目创造低影响开发实施的弹性。

SMC CLEAN 项目旨在建立评估低影响开发有效性的系统方法。该项目设计了一个全面的评估框架，用于理解设计、施工和维护对低影响开发性能的影响；并通过与相关机构、组织之间的协调与合作，全面进行加州低影响开发的监测工作。该项目制定的《数据信息清单》和《监测准则》有助于在未来收集一致的监测数据。格拉塞尔园区低影响开发案例

（下转 40 页）

图 9 莱格西园区方案项目用地规划和滞留设施位置

表 3 莱格西园区方案项目区用地特征和设计截留量

案例研究区分区	场地面积 / hm ²	建筑面积 / m ²	现状条件	设计雨量 / mm	现状不透水区	规划不透水区	设计截流量 / m ³
未开发用地和开放空间	3.79	37 879	未开发	21.59	0%	90%	675
医学办公和停车	2.76	27 600	已开发	21.59	90%	90%	492
医院	1.53	15 297	已开发	21.59	90%	90%	272
空置建筑和停车	0.92	9 186	已开发	21.59	90%	90%	164
总计	9.00	89 962	—	—	—	—	1 593

表 4 周边汇水区用地特征和设计截留量

周边汇水区土地使用	场地面积 / hm ²	建筑面积 / m ²	现状条件	设计雨量 / mm	现状不透水区	设计截流量 / m ³
居住	57.7	577 489	已开发	21.59	50%	6 545
商业	31.2	312 013	已开发	21.59	90%	5 557
停车	8.5	84 984	已开发	21.59	15%	482
总计	97.4	974 455	—	—	—	12 584