

LID 措施生命周期评价方法探析

——以雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统为例

芦琳¹, 陈韬¹, 付婉霞¹, 刘楠巍²

(1. 北京建筑工程学院 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 中外建工程设计与顾问有限公司, 北京 100048)

摘要:基于 eBalance 软件, 运用生命周期评价(LCA)方法, 对雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统等 LID 措施进行了建设施工、运行维护直至报废拆除全过程的生命周期评价。该生命周期评价模式不仅考虑了环境因素, 而且考虑了技术和经济因素。

关键词:eBalance 软件; LID 措施; 生命周期; 环境影响; 经济评估

中图分类号:TU992

文献标识码:A

文章编号:1674-9944(2013)05-0287-05

1 引言

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是一种对于某种产品、工艺或服务从最初的原材料开采、加工制造到最终处置全过程的资源 and 环境影响进行分析与评价的方法^[1]。LCA 自 1963 年首次提出以来, 在国外已经逐渐发展成为政府和企业的主要环境管理工具, 然而, LCA 方法在我国的应用尚处于起步阶段。余建朋^[2]、吉倩倩^[3]、张琼华^[4]等运用 LCA 技术, 对城市污水处理厂施工建设、处理运行直至废弃拆除的生命周期全过程资源消耗、能量消耗和环境影响进行了识别和量化分析。目前, 将 LCA 方法应用于绿色基础设施评价, 国内尚未见文献报导。

城市雨水低影响开发(Low Impact Development, LID)理念创建于 1990 年, 也称为绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)。美国自 1998 年开始在工程实践中逐步研发 LID 的设计方法和技术措施。其基本原理是通过分散的、小规模源头控制机制来达到对暴雨所产生的径流和污染物的控制, 并综合采用入渗、过滤、蒸发和蓄流等多种方式来减少径流排水量, 使开发后城市的水文功能尽可能的接近开发之前的状况^[5]。常用的 LID 措施包括雨水花园、渗透铺装、渗透管/井系统、湿地、生物滞留池、雨水收集槽、绿色屋顶、植被过滤带、塘、洼地等。美国在实施了大量的 LID 工程之后, LID 逐步走向规模化、产业化, 提出了对已建 LID 设施生命周期的环境影响和成本一效益进行评价的新方向。

目前国际上生命周期评价软件多达数十种, 如 Ga-Bi、SimaPro、eBalance、Boustead、CLEAN、EcoManager、EcoPack2000、KCL-ECO、LCAiT、LIMS、TEAM 等。eBalance^[6]是由我国亿科环境科技有限公司(IKE)研发、具有自主知识产权的通用 LCA 分析软件。软件提供中国以及世界范围的高质量数据库支持。

本文基于 eBalance 软件, 将 ISO 14040《生命周期

评价—原则与框架》、ISO 14041《目的与范围的确定和清单分析》、ISO 14042《生命周期影响评价》和 ISO 14043《生命周期影响解释》中规定的 LCA 方法学应用于雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统等 LID 措施, 对措施从建设施工、运行维护直至报废拆除的全过程进行了生命周期评价方法的研究, 在评价环境影响的同时, 还考虑了措施的全过程生命周期成本、效益及二者之间的关系。

2 LID 措施全过程生命周期

LID 措施从“摇篮”到“坟墓”的全过程生命周期可分为 3 个不同阶段: 建设施工阶段(包括建设材料的开采、加工制造、运输)、运行维护阶段(对降雨径流的滞蓄、渗透和利用)和报废拆除阶段(回收利用、最终处置), 如图 1 所示。

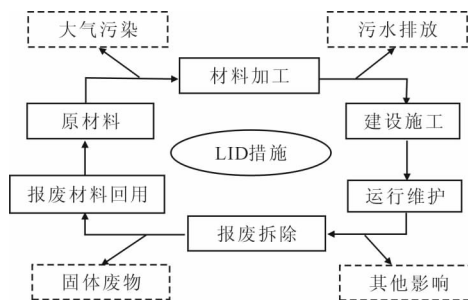


图 1 LID 措施全过程生命周期流程

3 LID 措施 LCA 评价方法与结果

3.1 评价目标

通过考察设定边界范围内的 LID 措施的环境负荷、技术性能和经济效益, 从而确定主要的影响因子, 进而对不同 LID 措施进行基于全过程生命周期的环境影响评价及成本一效益评估。

收稿日期: 2012-03-10

基金项目: 北京市教委科技计划项目(编号: KM201210016012)资助

作者简介: 芦琳(1986—), 女, 山西人, 硕士研究生, 主要从事城市雨水低影响开发研究。

3.2 范围界定

将 LID 措施建设施工阶段各种原材料的生产、运输、消耗及其引起的环境污染和因 LID 措施达到设计使用年限报废拆除而引起的环境影响均包含在讨论范围内。LID 措施生命周期评价系统及边界见图 2。

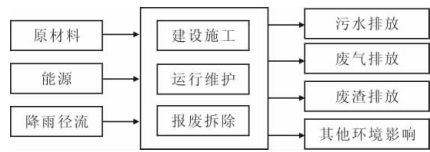


图 2 LID 措施生命周期评价系统及边界

3.3 确定系统的功能单位

本研究取汇流面积 10000m²，其中建筑物占地约 5000m²，绿化面积 3000m²，铺装地面和道路面积约 2000m²，开发前径流系数为 $\varphi=0.15$ ，开发后综合径流系数为 $\varphi=0.6$ 。设计重现期为 $P=2$ 年，对应北京地区的降雨量为 70.9mm。对应雨水花园的设计规模为 734m²，面积比例为 7.34%。渗透管/井系统采用 7 座 $\Phi 800\times H1400$ 的 PE 材质的渗透井和 180m 长的 De200 $\times$ 30 的 PE 材质的渗透雨水管，另外 2000m² 的道路与硬化铺装全部做透水混凝土铺装。北京市平均年降雨量为 596mm^[7]，则应用 LID 措施后每年可滞蓄、渗透的雨水量为 5960m³。雨水花园结构示意图如图 3 所示^[8]。渗透铺装结构示意图如图 4 所示^[9]。渗透管/井系统结构

示意图如图 5 所示。

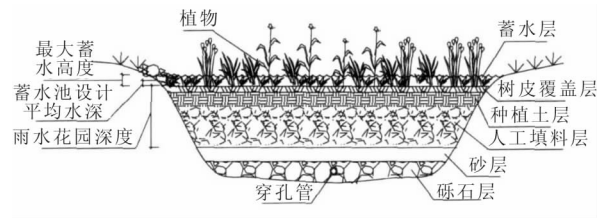


图 3 雨水花园结构示意图

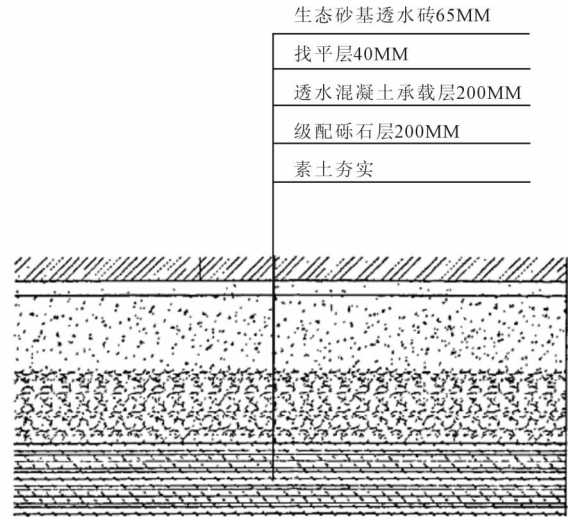


图 4 渗透铺装结构示意图

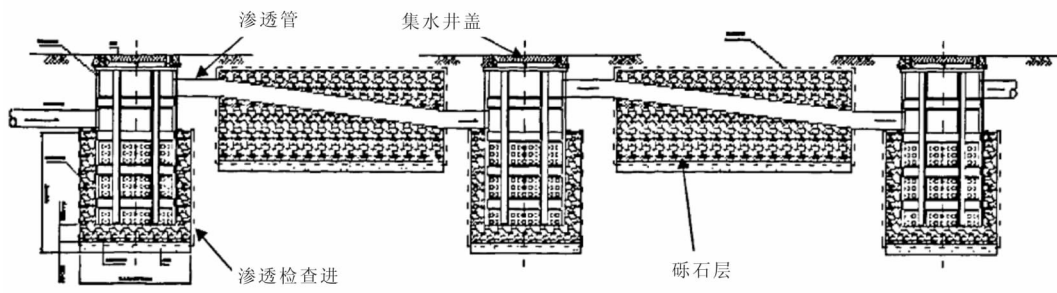


图 5 渗透管/井系统结构示意图

3.4 LCA 清单分析

LID 措施全过程生命周期清单分析包含许多环境影响项目，本文对于不同 LID 措施的输入、输出清单按照不同阶段分别进行了分析。

3.4.1 建设施工阶段清单分析

LID 措施建设施工阶段包括从原材料生产、运输直到 LID 措施建成投入使用为止的所有活动。对于不同 LID 措施，在整个建设施工阶段的能源消耗包括原材料开采、加工、运输，现场施工等活动。本阶段的污染物排放一方面直接源自各种原材料的生产加工，另一方面源自各种能源的生产及消耗。雨水花园的具体分析结果如表 1 所示。渗透铺装+渗透管/井系统的具体分析结果如表 2 所示。

表 1 雨水花园建设施工阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	树皮填料	kg	1.03E+05
	2		种植土	kg	4.40E+05
	3		炉渣填料	kg	1.21E+06
	4		砾石	kg	4.88E+05
	5		PE 穿孔管	kg	1.49E+02
	1	能量	煤	kg	2.52E+04
	2		油	kg	5.71E+03
	3		天然气	m ³	4.92E+02
	4		电	kW·h	2.00E+04
输出	1	大气污染物	NO _x	kg	1.37E+02
	2		SO ₂	kg	5.60E+01
	3		CO ₂	kg	2.13E+04
	4		CO	kg	3.68E+01
	5		CH ₄	kg	6.15E+01
	6		PM ₁₀	kg	2.14E+00
	7		HC	kg	7.70E+00
	8		N ₂ O	kg	5.63E-01
	9	水体污染物	COD	kg	1.50E-01
	10	固体废弃物	粉尘	kg	4.55E-01
	11		烟尘	kg	4.65E+01
	12		固体废弃物	kg	2.35E+02

表 2 渗透铺装+渗透管/井系统建设施工阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	砂子	kg	4.85E+05
	2		石灰石	kg	2.76E+05
	3		粘土质原料	kg	6.36E+04
	4		石膏	kg	1.06E+04
	5		碎石	kg	1.69E+06
	6		水资源	kg	8.64E+04
	7	能量	PE	kg	2.85E+03
输出	1		煤	kg	1.39E+05
	2		油	kg	1.13E+04
	3		天然气	m ³	1.50E+03
	4		电	kW·h	8.89E+04
	1	大气污染物	NO _x	kg	5.82E+02
	2		SO ₂	kg	1.22E+03
	3		CO ₂	kg	2.41E+05
	4		CO	kg	2.81E+02
	5		CH ₄	kg	1.42E+03
	6		PM ₁₀	kg	2.12E+00
	7		HC	kg	7.64E+00
	8	水体污染物	N ₂ O	kg	5.59E-01
	9		COD	kg	5.31E+00
	10	固体废弃物	粉尘	kg	4.89E+03
	11		烟尘	kg	8.48E+02
	12		固体废弃物	kg	4.36E+03
	13		废弃物填埋	kg	1.62E+06

3.4.2 运行维护阶段清单分析

LID 措施在建成投入使用后,运行阶段基本无外加能量消耗。与建设施工阶段和报废拆除阶段的能耗相比,LID 措施在运行维护阶段的能耗可忽略不计。根据有关资料,雨水花园与渗透铺装+渗透管/井系统的设计使用年限按 30 年计^[10]。雨水花园的具体分析结果如表 3 所示。渗透铺装+渗透管/井系统的具体分析结果如表 4 所示。

表 3 雨水花园运行维护阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	雨水原水	m ³	178800
	2	能量	—	—	—
输出	1	水体污染物	COD	kg	-13960.70
	2		TN	kg	-566.80
	3		TP	kg	-17.88
	4		Pb ²⁺	kg	-2.68

表 4 渗透铺装+渗透管/井运行维护阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	雨水原水	m ³	178800
	2	能量	—	—	—
输出	1	水体污染物	COD	kg	-1965.01
	2		TN	kg	-584.68
	3		TP	kg	-1282.00
	4		Pb ²⁺	kg	—

3.4.3 报废拆除阶段清单分析

当 LID 措施达到设计使用年限后,大多数都需要改造更新或进行拆除。在本 LCA 中,按照各种 LID 措施拆除时产生的环境影响进行评估。拆除一般是指把原有 LID 措施地下 1m 以上的部分全部拆除,然后恢复现场。因此,在拆除阶段消耗的材料主要是大块填充料

和地表覆盖物。本阶段的能源消耗主要与进行拆除作业的机械设备有关,同时也会产生与能源生产相应的污染。雨水花园系统在本阶段产生的固体废弃物主要是 PE 管材,而渗透管/井系统,包括渗透铺装在本阶段产生的固体废弃物主要是各种建筑垃圾,包括废弃的 PE 材质的检查井、渗透雨水管和透水混凝土铺装等。拆除阶段还可能对周围环境产生噪声、振动等滋扰作用,破坏生态环境。雨水花园的具体分析结果如表 5 所示。渗透铺装+渗透管/井系统的具体分析结果如表 6 所示。

表 5 雨水花园报废拆除阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	煤	kg	4.89E+06
	2		油	kg	7.16E+05
	3		天然气	m ³	9.56E+04
输出	1	能量	电	kW·h	3.89E+06
	1	大气污染物	NO _x	kg	2.06E+04
	2		SO ₂	kg	4.19E+04
	3		CO ₂	kg	4.56E+06
	4		CO	kg	1.15E+04
	5	水体污染物	CH ₄	kg	4.86E+04
	6		PM ₁₀	kg	1.43E-04
	7		HC	kg	5.15E-04
	8		N ₂ O	kg	3.76E-05
	9	固体废弃物	COD	kg	1.19E+02
	10		粉尘	kg	3.62E+02
	11		烟尘	kg	3.71E+04
12	固体废弃物		kg	1.87E+05	

表 6 渗透铺装+渗透管/井系统报废拆除阶段清单分析结果

阶段	序号	分类	资源/污染物	单位	数量
输入	1	物料	煤	kg	1.33E+07
	2		油	kg	1.95E+06
	3		天然气	m ³	2.61E+05
输出	1	能量	电	kW·h	1.06E+07
	1		大气污染物	NO _x	kg
	2	SO ₂		kg	1.14E+05
	3	CO ₂		kg	1.24E+07
	4	CO		kg	3.13E+04
	5	CH ₄	kg	1.32E+05	
	6	PM ₁₀	kg	1.70E+00	
	7	HC	kg	6.11E+00	
	8	N ₂ O	kg	4.47E-01	
	9	水体污染物	COD	kg	3.25E+02
	10		固体废弃物	粉尘	kg
	11	烟尘		kg	1.01E+05
12	固体废弃物	kg		5.10E+05	

3.5 生命周期环境影响评价

eBalance 软件采用国际生命周期基准数据系统 (ILCD) 的物质名称和单位,内置了中国生命周期基础数据库公开版 (Chinese Reference Life Cycle Database, CLCD Public)、欧盟生命周期基础数据库 (European Reference Life Cycle Database, ELCD)、瑞士 Ecoinvent 数据库公开版 (Ecoinvent Public)。软件包含了常用的 10 多种 LCIA 特征化指标及面向中国节能减排政策目标的指标、中国 2005 年和 2010 年的两个归一化方案、面向中国“十一五”节能减排政策目标的 ECER-115 和“十二五”节能减排政策目标的 ECER-125 以及

ISCP2009 专家调查法等 3 种加权综合指标。

本研究基于 eBalance 软件,对不同 LID 措施进行 LCA 的结果如表 7 和图 6 所示。不同措施全过程生命周期的污染物质减排结果如图 7 所示。

表 7 雨水花园和渗透铺装+渗透管/井系统 LCA 结果

特征化指标名称	雨水花园总量	渗透管/井系统总量
CADP(fossil fuel)(kg Coal-R eq.)	26809560.00	73055953.46
CADP(kg Coal-R eq.)	26823724.00	73094467.89
GWP(kg CO ₂ eq)	6672667.77	18431342.56
PED(kg ce)	6008533.50	16444872.77
AP(kg SO ₂ eq)	62310.00	171109.45
IWU(kg)	0.00	86400.00
RI(kg PM _{2.5} eq)	6415.41	17599.61
EP(kg PO ₄₃ -eq)	2749.20	6600.69
ADP(kg antimony eq.)	13.36	36.46

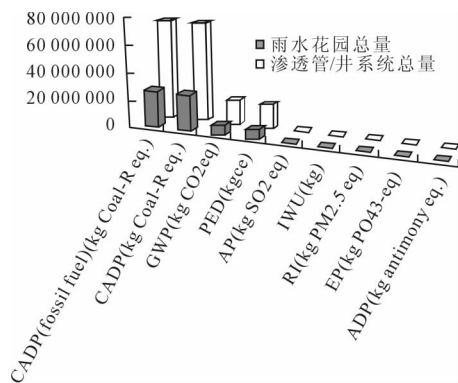


图 6 雨水花园和渗透铺装+渗透管/井系统 LCA 结果

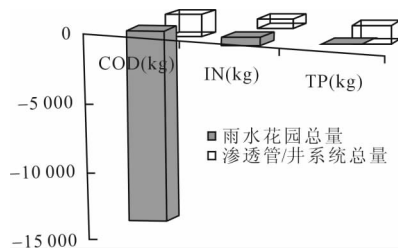


图 7 雨水花园和渗透铺装+渗透管/井系统全生命周期污染物质减排结果

4 LID 措施生命周期成本—效益分析

4.1 成本分析

目前国内关于雨水花园建设成本方面的数据较少,根据 Roger Bannerman^[11] (美国威斯康星州自然资源部)的研究,雨水花园建设成本如表 8 所示,渗透铺装+渗透管/井系统的建设成本如表 9 所示,传统雨水排水设施建设成本如表 10 所示。

表 8 雨水花园建设成本

阶段	费用/(元/m ²)	总费用/元
设计	67.42	49489.26
建设施工	202.27	148467.78
植物栽培	202.27—269.70	148467.78—197957.04
植株成本	168.56—303.41	123723.15—222701.67
总成本	741.66—876.51	544381.85—643360.37

4.2 效益分析

为简化计算,本文中 LID 措施全过程生命周期效

益分析只包括雨水渗透补充地下水效益(B_1)、因消除污染而减少社会损失效益(B_2)、节省城市排水设施运行费用效益(B_3)和防洪作用降低城市河湖改扩建费用效益(B_4)。

表 9 渗透铺装+渗透管/井系统的建设成本

费用组成	渗透铺装成本/元	渗透管/井系统	
		材料费用/元	土建费用/元
	262000	128115	9289
总成本/元	399404		

表 10 传统雨水排水设施建设成本

项目	数量	材料费用/元	土建费用/元	其他费用/元
检查井	7 座	23100	514	
DN400 排水管	60m	18000	2925	34650
DN300 排水管	60m	15000	2925	
DN200 排水管	60m	13200	2925	
总成本/元		113239		

(1)雨水渗透补充地下水效益(B_1)。以北京市 2013 年每立方米自来水价格 4.0 元计,LID 措施运行阶段每年补充地下水的费用为: $B_1 = V \times 4.0 = 5960 \times 4.0 = 23840$ 元。

(2)因消除污染而减少社会损失效益(B_2)。假设 LID 措施消除污染的投入产出比为 1:1.5^[12],以北京市 2013 年居民用水排污费 1.04 元/m³ 和非居民用水排污费 1.68 元/m³ 作为消除污染需投入的费用,则每年因消除污染而减少社会损失效益为: $B_2 = V \times 1.5 \times 1.04$ (或 1.68) = 9297.6(或 15019.2)元。

(3)节省城市排水设施运行费用效益(B_3)。根据每立方米水的管网运行费用 0.08 元^[12] 计算,则每年可节省城市排水设施运行费用效益为: $B_3 = V \times 0.08 = 476.8$ 元。

(4)防洪作用降低城市河湖改扩建费用效益(B_4)。北京地区每公顷汇流面积对应的河湖改扩建费用为 6.84 万元,假定河湖改扩建周期为 15 年^[12],则应用 LID 措施后每年降低的费用为: $B_4 = 6.84 \times 10000/15 = 4560$ 元。

以上各项中 V 为 LID 措施每年可滞蓄、渗透雨水的量。

则本文所研究的各项 LID 措施应用期间每年直接与间接经济效益合计为 38174.4(或 43896)元。各项 LID 措施全过程生命周期成本—效益分析结果如表 11 所示。

表 11 LID 措施全过程生命周期成本—效益分析结果

LID 措施	总成本/元	年均效益/元	投资回收期/年
雨水花园	544381.85—643360.37	38174.4(或 43896)	12.40~16.85
渗透铺装+渗透管/井系统	399404	38174.4(或 43896)	9.10~10.46

5 结语

(1)应用 LCA 方法评价 LID 措施产生的环境污染和生态影响的同时,须考虑设施的资源和能源消耗水平。将资源消耗、污染物质排放、全球气候变化等环境问题与设施应用阶段污染物质减排结合起来综合考虑。

(2)从 LID 措施全过程生命周期环境影响来看,雨水花园比渗透铺装+渗透管/井系统各项特征化指标的环境负荷低。原因主要在于雨水花园采用的建设材料更加环保,施工阶段能耗相对而言也较少。

(3)LID 措施全过程生命周期成本—效益分析结果表明,单从经济成本的角度考虑,不同措施的费用排序为雨水花园>渗透铺装+渗透管/井系统>传统雨水排水设施。结合措施应用期间的经济效益可以发现,雨水花园的成本投资回收期为 12.40~16.85 年,渗透铺装+渗透管/井系统的成本投资回收期为 9.10~10.46 年。在 LID 设施生命周期内可获得环境效益、经济效益与社会效益的多重收益。

参考文献:

- [1] US EPA National Risk Management Research Laboratory. Life cycle assessment: principles and practice. EPA/600/R-06/060 [M]. Ohio: Cincinnati, 2006.
- [2] 余建朋,郑泽根. 城市污水处理厂全过程生命周期评价模式探讨[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(2): 148~151.
- [3] 吉倩倩,张琼华,熊家晴. 运用 LCA 方法分析污水再生处理的成本效益[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 517~520.
- [4] 张琼华,王晓昌. 城市污水处理环境效益量化分析[J]. 环境工程学报, 2009, 3(5): 861~863.
- [5] Coffman Larry (2000). Low Impact Development Design Strategies — An Integrated Design Approach [M]. Maryland: U. S. EPA 841-B-00-003. Prince George's County, 2009.
- [6] 佚名. 亿科环境科技有限公司 [EB/OL]. <http://www.itke.com.cn/>
- [7] 编制组. 建筑与小区雨水利用工程技术规范实施指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 向璐璐,李俊奇,邝 诺. 雨水花园设计方法探析[J]. 给水排水, 2008, 34(6): 47~51.
- [9] 龙晨程. 建筑小区雨水“渗透—排放一体化”技术性能与应用研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2009.
- [10] 车 伍,李俊奇. 城市雨水利用技术与管理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [11] 佚名. Natural Science Debartrent [EB/OL]. http://natsci.edgewood.edu/wingra/management/raingardens/rain__build.htm.
- [12] 潘安君,张书函,陈建刚. 城市雨水综合利用技术研究与应 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.

(上接第 286 页)

从近 10 年的研究来看, BRCA1 蛋白与多种肿瘤疾病密切相关, 作为调节蛋白, 直接或间接参与细胞生物学活动。通过降低或增加 BRCA1 蛋白的含量来治疗肿瘤疾病的发生, 甚至可以检测 BRCA1 蛋白的含量来预测肿瘤疾病的发生。另外, 因为 BRCA1 表达水平的变化将改变细胞 DNA 损伤修复能力, 因此, 可以根据 BRCA1 的表达量来推测肿瘤发生的几率, 预防肿瘤疾病的发生。

参考文献:

- [1] 王春杨,孙圣坤,符伟军,等. DNA 损伤对前列腺癌细胞株 BRCA1 蛋白表达的影响[J]. 中华男科学杂志, 2008, 14(8): 685~689.
- [2] 魏雷震. 活细胞中 BRCA1 蛋白对 DNA 链损伤修复功能的原位分析[D]. 北京: 中国医科大学, 2006.
- [3] Xu CF, Brown MA, Chanmber, et al. Distinct transcription start sites generate two forms of BRCA1 mRNA [J]. Hum Mol Genet, 1995, 4(12): 2259~2264.
- [4] Heidi G E. Hum. Mol [J]. Genet, 2001(10): 1995~2011.
- [5] Naseem. R, Webb M. Analysis of the DNA binding activity of BRCA1 and its modulation by the tumour suppressor p53 [J]. PloS one, 2008(6): 11.
- [6] Chu—Xia Deng, Steven G. Brodie. Roles of BRCA1 and its interacting proteins [J]. BioEssays, 2000(12).
- [7] Zhang Junran, Powell SN. The role of the BRCA1 tumor suppressor in DNA double—strand break repair [J]. Mol Cancer Res, 2005, 3(10): 531~539.
- [8] Kass EM, Helgadottir HR, Chen CC, et al. Jasin M. Double—strand break repair by homologous recombination in primary mouse somatic cells requires BRCA1 but not the ATM kinase [J]. Proc Natl Acad Sci U S A. 2013, 110(14): 5564~9.
- [9] Yarden RI et al. BRCA1 regulates the G2/cyclinB checkpoint by activating Chk1 kinase upon DNA damage [J]. Nat Genet, 2002, 30: 285~289.
- [10] Khanna K K. , et al. , Double strand break repair by homologous [J]. Nat Genet, 2001(27): 247~254.
- [11] 姜瑞胜等. 细胞 DNA 损伤检控点 [J]. 细胞生物学杂志, 2004 (26): 209~215.
- [12] Xu B et al. Involvement of brca1 in S—phase and G2—phase checkpoints after ionizing irradiation [J]. Mol Cell Biol, 2001 (21): 3445~3450.
- [13] Smith J, Tho LM, Xu N, et al. The ATM—Chk2 and ATR—Chk1 pathways in DNA damage signaling and cancer [J]. Adv Cancer Res, 2010(108): 73~112.
- [14] 罗远琼. BRCA1 基因在细胞增殖、凋亡和 DNA 损伤修复中的作用 [J]. 国外医学卫生学分册, 2003, 30(6): 342~347.
- [15] 王燕玲, kaoru Tanaka. BRCA1—mediated Down—regulation of Telomerase Contributrs to Radiation Resistant of MCF—7 Breast Carcinoma Cells [J]. IMP & HIRFL Annual Report, 2009 (161).