

BMPs/LID

基于城市化的 BMPs/LID 水文调控性能研究

孙艳伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

基于城市化的 BMPs/LID 水文调控性能研究

孙艳伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书综合运用水文学及水资源、系统工程、计算数学等相关专业知识,对城市化及LID措施的水文及生态水文调控性能进行了较系统的研究,内容主要包括低影响发展措施的简介、生态水文效应评价指标体系的建立、城市化水文及生态水文效应研究、生物滞留池的生态水文效应研究、生物滞留池设计要素对其径流调控性能的灵敏度分析以BMPs措施与LID措施的水文和生态水文效应比较。本书特色在于为雨水径流调控、下游河道生物多样性及生态环境效应的评价提供了简便和具有可操作性的评价指标,并运用SWMM软件,模拟了区域不同城市化程度下的水文和生态水文效应;构建了基于SWMM和RECARGA软件的生物滞留池径流调控性能和生态水文效应模拟模型,从而为解决现有模型在模拟评价生物滞留池生态水文效应的局限性问题上提供了可行方法。

本书可供从事城市雨洪调控方面研究的工程技术人员和科研人员参考使用,也可作为高等院校相关专业师生学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于城市化的BMPs/LID水文调控性能研究 / 孙艳伟
著. — 北京:中国水利水电出版社, 2015.8
ISBN 978-7-5170-3849-8

I. ①基… II. ①孙… III. ①城市—水文模型—研究
IV. ①P334

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第278727号

书 名	基于城市化的 BMPs/LID 水文调控性能研究
作 者	孙艳伟 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京三原色工作室
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 11.5 印张 219 千字
版 次	2015 年 8 月第 1 版 2015 年 8 月第 1 次印刷
定 价	45.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

前 言

城市化通过改变区域的下垫面条件,改变了天然状态下的水文机制,并影响河道生物多样性和完整性。低影响发展 (Low Impact Development, LID) 是以维持或者复制区域天然状态下的水文机制为目标,从而达到有效控制城市雨洪径流和保护生态环境的目的。研究城市化及 LID 调控措施的水文及生态水文效应,对于解决城市雨洪灾害及下游河道的生态环境问题,促进和维护城市地区水文过程的良性循环具有重要的理论意义和实用价值。

在此背景下,本书在分析城市化水文效应的基础上,通过建立生态水文效应评价指标体系,运用 SWMM、RECARGA 软件模拟了该区城市化及 LID 措施的水文及生态水文效应,分析了生物滞留池设计要素对其径流调控性能的灵敏度,探讨了最优化管理 (Best Management Practices, BMPs) 措施与 LID 措施的水文及生态水文效应。主要研究内容和成果概述如下:

(1) 径流历时曲线可以模拟区域径流在研究时段内的全部变化,包括径流大小、频率以及持续时间等,考虑了包括由大径流、枯水径流以及洪水在内的全部径流的大小、频率及其持续时间,而不同大小及频率的径流均具有不同的生态学功能,并对于维系健康的河道生态环境有重要作用。因此,径流历时曲线可用于对区域不同发展情景的生态水文

效应进行评价。

(2) 洪峰流量及其发生频率是重要的生态水文指标,与河道生态系统的完整性和稳定性密切相关。河道生物群落对径流的响应主要为大于某一阈值流量发生的频率,而不仅仅是年极端径流。采用偏序列计算的洪峰流量频率曲线反映了不同大小的洪峰流量及其发生的频率,而不仅仅是年极端径流。因此,基于偏序列的洪峰流量频率曲线可作为一个生态水文评价指标,并用于对区域不同发展情景的生态水文效应进行评价。

(3) 当径流系数及地表径流总量能维持在天然状态的水平时,根据 LID 的设计目标,即可认为下游河道生态环境得到了相应的维持。因此,为了更加直观地体现径流系数的生态影响,引入相对径流系数 R_c ,即区域不同发展情景下径流系数与天然状态下区域径流系数的比值作为除径流历时曲线和洪峰流量频率曲线以外的另一个间接生态水文指标。若 R_c 值越接近 1,表明区域发展情景或 LID、BMPs 调控措施下的总径流量与天然状态下的总径流量越接近,其生态水文调控性能越好。

(4) 经过 $T_{0.5}$ 与反映生物多样性指标的类群丰度、#EPT、EPT%、MBI、KBI 和 FBI 的值进行线性回归,认为 $T_{0.5}$ 与河道生物多样性之间存在比较显著的线性回归关系,因此可将其作为直接生态水文指标用于对下游河道生物多样性及生态环境的预测。

(5) 区域城市化程度越高,其流量过程曲线越陡,径流持续时间越短,径流变化幅度越大,径流系数越大。降水量越小的降水事件,对城市化的响应越强烈。城市化显著增加了区域瞬时流量的值,并使得超出某一流量的持续时间显著延长。区域径流在大小、频率以及持续时间方面的显著变化进一步对生态环境产生负面影响。除此之外,城市化改变了洪峰流量的大小及频率,使得洪峰流量显著增大,并使得较大洪峰流

量发生的次数增多,当不透水性系数小于 20%时,城市化对较大洪峰流量变化速率的影响更加明显。区域城市化通过影响洪峰流量的大小和频率,进一步对河道生态系统产生了负面的影响。

(6) 随着区域不透水性系数的增大,其入渗量逐渐减小、径流量和径流系数逐渐增大。对径流系数进行的分析表明:降水序列中的大部分降水事件为降水量比较小的降水事件;当采用 LID 或者其他 BMPs 调控措施对径流情势进行调控时,降水量较小的降水事件应该为其调控的重点,相应地也启示了基于生态环境保护的雨洪资源调控思路为首先利用传统的雨洪调控措施对暴雨进行洪峰流量的削减,再经由 LID 等措施进行调控,从而达到对整个径流进行调控的目的。

(7) 随着区域不透水性系数的提高, $T_{0.5}$ 先呈显著减小的趋势,而后逐渐趋于平缓, $T_{0.5}$ 整体呈减小趋势。根据 $T_{0.5}$ 与河道生物多样性指标之间的线性关系可以得知,随着 $T_{0.5}$ 的减小,其生物多样性逐渐减小,从而表明:城市化的进展对河道生物多样性起着负面的作用,并进一步恶化了河道生态环境。

(8) 当生物滞留池的面积占整个区域不透水性面积的 5%时,经其调控后,其总溢出水量比例在 27.02%~57.95%之间,入渗补给比例在 42.77%~57.95%之间。对于整个研究区来讲,其表面溢出水量的比例为 46.72%,意味着约有 50%的径流形成了地表径流;入渗水量比例为 53.49%,表明入渗补给地下水的功能显著增强。总处理水量的比例为 69.95%,意味着 70%的水量得到了生物滞留池的处理,从水量处理的角度来讲,这是一个令人满意的结果。经由生物滞留池排水孔所流出的水量比例约占进入生物滞留池总水量的 16.17%,因此,对于以区域地表径流调控为目的的生物滞留池来讲,合理地设计排水孔的尺寸,以最大限度地减小经由排水孔的水量并进而减小地表径流,对于生物滞留池的

设计者来说是非常重要的。

(9) 经生物滞留池调控后, 径流历时曲线约有 90% 的时间 (10%~100%) 与天然状态下的径流历时曲线吻合较好。由于降水事件中 90% 以上为降水量较小的降水事件, 因此, 径流历时曲线证实了对较小降水量的降水事件来讲, 生物滞留池可以有效地模拟区域天然状态下的径流形态, 并能有效减缓或者改善城市化所引起的因为较小径流量在大小、频率及持续时间方面改变而导致的河道生态环境问题。

(10) 当降水事件的频率变小时, 其对洪峰流量的调控作用逐渐减弱。生物滞留池可以有效地模拟或者复制区域天然状态下较小降水事件的洪峰流量及频率, 从而减缓由于较小径流量在洪峰流量及其频率的改变而导致的河道生态环境问题。经生物滞留池调控后, $T_{0.5}$ 的值相对于发展后无调控措施下 $T_{0.5}$ 值有了显著的提高, 从而表明生物滞留池在提高下游河道生物多样性、改善河道的生态环境方面具有显著的功能。但是, 值得注意的是, 经生物滞留池调控后的区域, 由于仍然采用原有的排泄管道, 因此, 从理论上讲, 生物滞留池并不能完全达到区域天然状态下的 $T_{0.5}$ 值。

(11) 对于不透水性系数非常高的区域, 若使径流系数达到区域天然状态下的水平是非常困难而且是不现实的, 因此, 径流系数并不适宜作为对生物滞留池进行性能评价的标准。但是, 相比区域的不透水性系数, 径流系数同时考虑了区域的地形、坡度、形状等因素, 因此, 更适宜作为生物滞留池表面面积的设计要素。降水量为 25.4mm 或者 12.7mm 的降水事件被广泛应用于生物滞留池的表面面积的设计及计算中, 以期达到对所有小于该降水量的降水事件产生的径流进行控制和处理的目的。但是, 当采用 25.4mm 的设计降水量对生物滞留池的表面面积进行计算时, 模拟结果表明即使当降水量小于 25.4mm 时, 如果降水事件的持续

时间较短，降水强度较大，该生物滞留池并不能处理全部的降水量小于 25.4mm 的降水事件。因此，将降水历时和降水强度纳入生物滞留池表面面积的设计或许能解决这一问题。

(12) 无论生物滞留池是否设置排水孔，其表面面积是影响径流调控性能最灵敏的设计要素，砂砾层厚度是最不灵敏的设计要素。当生物滞留池无排水孔时，各设计要素对其径流调控性能灵敏度排序为：表面面积>根区土壤饱和入渗速率>根区土壤厚度>天然土壤饱和入渗速率。当生物滞留池有排水孔时，各设计要素对其径流调控性能灵敏度排序为：表面面积>天然土壤饱和入渗速率>排水孔直径。相比无排水孔的情景，当生物滞留池有排水孔时，各设计要素对其水文调控性能更加灵敏。

(13) BMPs 措施与 LID 措施的水文和生态水文效应的对比研究表明：截留池对较大降水事件洪峰流量的调控作用明显，但是不能应用于入渗补给地下水，因此，在需要对地下水进行补给的地区不宜修建截留池；入渗带的调控性能要优于生物滞留池，但因其不具备污染物移除及美化环境的功能，所以难以纳入区域的发展规划；透水性路面的径流及生态水文调控性能最优，但是容易出现“过调控”现象，且透水性路面材料比较昂贵，从而限制了透水性路面的发展；生物滞留池不仅对较小降水事件具有比较显著的调控性能，而且也具有明显的污染物移除和环境美化功能，所以，生物滞留池应该是目前 LID 中最具发展潜力的调控措施。为此，指出将 BMP 调控措施（截留池）与 LID 调控措施（生物滞留池）有机结合，通过二者联合对雨洪径流进行调控，可达到最佳的生态水文调控性能。

感谢国家自然科学基金项目“基于城市化的 BMPs/LID 联合调控研究”（41401038）以及河南省高校科技创新团队（14IRTSTHN028）对本书研究及出版的资助！

由于低影响发展措施的水文调控性能研究尚需要长时间序列的验证，本书的出版只能起到“抛砖引玉”的作用，且受时间、专业素养、理论水平的制约，本书研究中的理论、方法、结构安排、文字表达等方面难免存在错误，敬请诸位同行专家本着关心和爱护的态度，予以批评指正。此外，书中对于其他专家学者的论点和成果都进行了引证，如有不慎遗漏引证，恳请诸位专家谅解。

作 者

2015 年 6 月于郑州

目 录

前言

第 1 章 绪 论	- 1 -
1.1 研究背景及目的意义	- 1 -
1.2 国内外研究现状	- 2 -
1.2.1 城市化的水环境问题	- 2 -
1.2.2 城市化与河道生态系统的关系	- 7 -
1.2.3 河流生态的改变机理	- 7 -
1.2.4 生态水文指标体系	- 10 -
1.2.5 城市化的雨洪调控措施研究	- 16 -
1.3 本书内容结构安排	- 17 -
第 2 章 低影响发展措施及海绵城市	- 20 -
2.1 LID 的内涵	- 20 -
2.1.1 LID 的产生背景	- 20 -
2.1.2 LID 的设计目标	- 21 -
2.1.3 LID 的设计理念	- 22 -
2.2 LID 的主要措施	- 22 -
2.2.1 生物滞留池	- 22 -
2.2.2 草地渠道	- 24 -
2.2.3 植被覆盖	- 26 -
2.2.4 透水性路面	- 27 -
2.3 LID 的设计方法、效果监测及模型模拟	- 29 -
2.3.1 设计方法	- 29 -
2.3.2 LID 效果的监测	- 30 -
2.3.3 LID 的模型模拟	- 30 -
2.4 LID 的优点及局限性	- 31 -
2.5 海绵城市与低影响开发	- 32 -

2.5.1	海绵城市与低影响开发的联系	- 32 -
2.5.2	海绵城市——低影响开发雨水系统构建途径	- 34 -
2.5.3	径流总量控制目标	- 35 -
2.5.4	径流峰值控制目标	- 36 -
2.5.5	径流污染控制目标	- 37 -
2.5.6	控制目标的选择	- 37 -
2.6	本章小结	- 38 -
第 3 章	SWMM 模型简介及应用	- 39 -
3.1	SWMM 简介	- 39 -
3.1.1	SWMM 的主要功能	- 40 -
3.1.2	SWMM 的应用	- 41 -
3.1.3	SWMM 要素及输入参数	- 41 -
3.1.4	SWMM 模拟原理	- 44 -
3.2	SWMM 在水质模拟中的应用	- 45 -
3.2.1	基于 SWMM 的非点源污染模型	- 45 -
3.2.2	模型的建立及主要参数	- 46 -
3.2.3	模拟结果分析	- 48 -
3.3	SWMM 模型参数的全局灵敏度分析	- 50 -
3.3.1	研究区概况和降水序列	- 50 -
3.3.2	研究方法	- 51 -
3.3.3	结果	- 55 -
3.3.4	讨论	- 59 -
3.3.5	结论	- 60 -
3.4	本章小结	- 61 -
第 4 章	生态水文效应评价指标体系的建立	- 63 -
4.1	间接生态水文评价指标体系	- 64 -
4.1.1	径流历时曲线	- 64 -
4.1.2	洪峰流量频率曲线	- 66 -
4.1.3	径流系数	- 68 -
4.2	直接生态水文评价指标	- 69 -
4.2.1	生态学指标	- 69 -
4.2.2	水文学指标 $T_{0.5}$	- 70 -
4.2.3	$T_{0.5}$ 与各生态指标的线性回归分析	- 70 -

4.3 本章小结	- 71 -
第 5 章 城市化的水文及生态水文效应研究	- 73 -
5.1 研究区概况及资料来源	- 73 -
5.1.1 研究区地理位置	- 73 -
5.1.2 土地利用和土壤特性	- 73 -
5.1.3 降水和蒸发	- 73 -
5.1.4 数据资料及来源	- 74 -
5.2 模型构建	- 76 -
5.2.1 降水序列	- 76 -
5.2.2 SWMM 模型参数的设定	- 76 -
5.3 模拟结果及分析	- 77 -
5.3.1 城市化的水文效应	- 78 -
5.3.2 城市化的生态水文效应	- 81 -
5.4 本章小结	- 87 -
第 6 章 生物滞留池的生态水文效应研究	- 89 -
6.1 生物滞留池研究的关键技术问题	- 89 -
6.1.1 性能评价	- 89 -
6.1.2 模型模拟	- 90 -
6.1.3 设计方法	- 91 -
6.2 基于 SWMM 和 RECARGA 的生物滞留池模拟模型	- 93 -
6.2.1 生物滞留池及其汇水区域的选定	- 93 -
6.2.2 初始化 SWMM 模型的建立及校核	- 94 -
6.2.3 生物滞留池的设计	- 99 -
6.2.4 生物滞留池的模拟模型	- 100 -
6.3 生物滞留池的生态水文效应分析	- 102 -
6.3.1 生物滞留池的径流调控性能	- 102 -
6.3.2 生物滞留池的生态水文效应	- 104 -
6.4 影响生物滞留池径流调控性能的设计因子	- 109 -
6.4.1 不透水性系数	- 109 -
6.4.2 降水量	- 111 -
6.5 讨论	- 112 -
6.5.1 生物滞留池的生态水文效应评价指标体系	- 113 -
6.5.2 设计因素	- 114 -

6.6 本章小结	- 115 -
第 7 章 生物滞留池设计要素对其径流调控性能的灵敏度分析	- 117 -
7.1 不同设计要素下生物滞留池的水文效应	- 117 -
7.1.1 不同根区深度对生物滞留池的水文效应	- 118 -
7.1.2 不同介质层土壤对生物滞留池的水文效应	- 119 -
7.1.3 不同天然土壤对生物滞留池的水文效应	- 120 -
7.1.4 不同降水类型对生物滞留池水文效应	- 120 -
7.1.5 出流设施对生物滞留池的水文效应	- 121 -
7.2 生物滞留池设计要素的灵敏度分析	- 123 -
7.2.1 研究区的选择	- 123 -
7.2.2 模拟模型	- 123 -
7.2.3 设计要素的选择及样本生成	- 124 -
7.2.4 生物滞留池径流调控性能指标	- 128 -
7.3 灵敏度计算及结果分析	- 128 -
7.3.1 无排水孔时各设计要素对生物滞留池径流调控性能的灵敏度分析	- 128 -
7.3.2 有排水孔时各设计要素对生物滞留池径流调控性能的灵敏度分析	- 129 -
7.4 本章小结	- 131 -
第 8 章 BMPs 措施与 LID 措施的水文和生态水文效应比较	- 132 -
8.1 研究区概况	- 132 -
8.2 基于 SWMM 的各 BMPs 及 LID 措施的模拟	- 133 -
8.2.1 BMPs 措施的模拟	- 134 -
8.2.2 LID 措施的模拟	- 136 -
8.3 水文效应分析	- 138 -
8.3.1 BMPs 措施的水文效应	- 139 -
8.3.2 LID 措施的水文效应	- 141 -
8.4 生态水文效应分析	- 145 -
8.4.1 径流历时曲线	- 145 -
8.4.2 洪峰流量频率曲线	- 147 -
8.4.3 径流系数	- 149 -
8.4.4 $T_{0.5}$	- 150 -
8.5 本章小结	- 151 -
第 9 章 结论和建议	- 153 -
9.1 结论	- 153 -

9.2 本书的主要创新点 - 155 -

9.3 建议 - 155 -

参考文献 - 157 -

第1章 绪 论

1.1 研究背景及目的意义

作为最典型的土地利用变化过程之一，城市化通过改变区域的下垫面条件，也改变了天然状态下的水文循环机制，进而对城市水系及其所在流域的自然水文循环造成严重的干扰、破坏，并由此引发了一系列问题，如，淡水资源供需矛盾、洪涝灾害频繁、水体污染以及河流生态系统破坏等（薛丽芳和谭海樵，2009）。城市水文效应是指城市化引起的水文变化及其对环境的影响或干扰，对其理解应倾向于城市化过程中人类活动对水文情势的整体影响，即水文机制的改变（冉茂玉，2000；Booth、Leavitt，1999；Moglen、McCuen，1998）。其中水文机制涉及水循环以及地下水和地表径流的各个形态，主要表现在地下水补给的减少以及地表径流在流量、频率、持续时间和水质方面的改变。由于水文机制的改变而造成的河道生态环境退化已经在世界研究范围内引起关注（Booth，1991；Casey 等，2005；Marsalek，2000；Sriyaraj、Shutes，2001），Walsh 等（2005）提出了“城市综合症”（urban stream syndrome）的概念，明确指出流域内的城市化通过改变该区域的水文机制进而对河流生态在水文、水力学及河流形态学产生了扰动，并进一步引起了水质退化、生物栖息地的退化和单一化、河道侵蚀等生态问题。

作为河道生态调度和生态修复的基础性理论，生态水文学和水文生态学的论述很多，但至今还没有一个统一的概念。国际上习惯将流域生态水文学研究内容归纳为三个主要方面：一是流域或区域水文循环过程中生态与水文相互作用与影响，研究生态过程如何影响流域或区域的水文循环过程，包括河道内水生生态系统对河流水文过程的作用；二是流域水利工程措施如何作用和影响流域或区域内的生态系统，也就是流域或区域水文过程或水文情势变化对生态系统的影响，包括河道内和河道外的相关区域；三是流域内各种生态系统的水资源需求和水消耗规律，包括不同供给情况下的生态水分胁迫的响应机制（席秋

义等, 2010)。通过利用流域或者区域的水利工程措施, 如最优化管理措施 (Best Management Practices, BMPs), 进而改变区域的水文机制, 并最终达到改善河道生态环境的目的, 属于生态水文学第二个理论研究的范畴。水文机制作为一个链接, 将城市化和河道生态有机联系起来。通过一系列水利工程或者城市雨洪调控措施, 改变水文机制, 并进而改善河道生态环境, 是该领域目前研究的一个热点问题。

近 20 年来, 随着社会经济发展, 人与自然的冲突加剧, 城市地区的水文生态问题愈来愈突出。以位于美国 Kansas 州 Little Mill Creek 流域的一个典型城市化区域为例, 研究城市化及低影响发展 (Low Impact Development, LID) 调控措施的生态水文效应, 对于城市化地区降雨径流资源实施生态化的综合管理利用, 促进和维护城市地区水文过程的良性循环有明显的理论和实践意义。LID 作为最新的雨洪调控措施的研究, 对其长期监测和模拟的研究成果目前尚不多见, 因此从河流生态的角度深入研究城市化的区域生态水文效应, 实现城市水资源的可持续利用和生态环境保护, 促进 LID 技术的发展均具有重要的理论价值和实践指导意义。

1.2 国内外研究现状

城市化区域的生态水文效应以及通过雨洪调控措施改变区域的水文机制来改善河道生态环境的研究, 涉及城市化、水文机制、河道生态环境的研究以及三者之间的联系。本章从以下五个方面论述国内外研究现状:

- (1) 城市化的水环境问题。
- (2) 城市化和河道生态环境的关系。
- (3) 河道生态的改变机理。
- (4) 生态水文评价指标体系的发展。
- (5) 城市化的雨洪调控措施研究。

1.2.1 城市化的水环境问题

城市化是一个非常复杂的空间形态变化和社会经济发展的过程。一个地区的城市化过程, 对当地水文情势影响巨大, 主要表现在城市地貌和排水系统的改变、水资源的重新分配、工业活动和人类日常生活等方面。城市化所产生的主要水环境问题如图 1.1 所示。

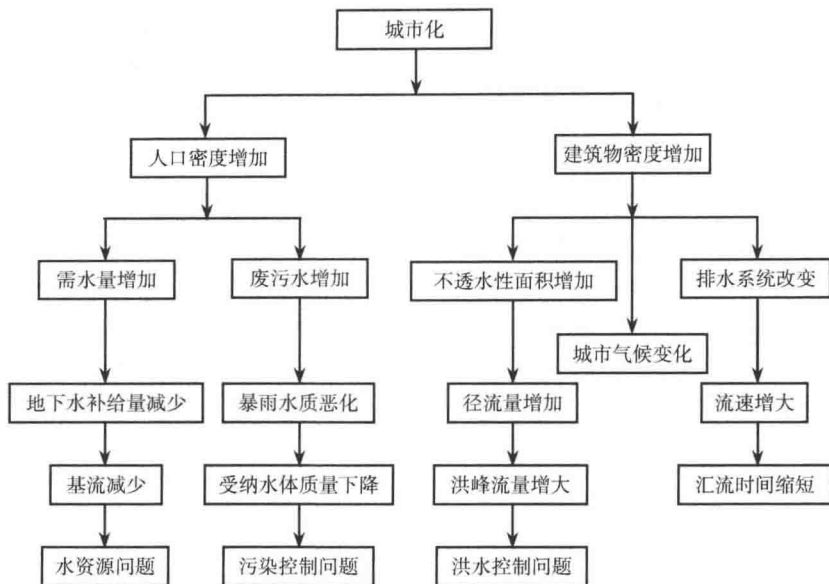


图 1.1 城市化的主要水环境问题（冉茂玉，2000）

1.2.1.1 城市化对水资源的影响

一般来讲，城市化的进程分为三个阶段：

第一个阶段为城市化的开始，土地利用方式的改变主要表现为砍树伐林用以建造房屋。由于地表植被覆盖的减少，暴雨径流增加，土壤侵蚀，河道的沉积物增加。

第二个阶段的特征为大规模的城市化开始，土地利用的改变表现为更多不透水性建筑的增加。除此之外，城市污水开始向河道系统排放。在这个阶段，城市化对水资源的影响进一步加剧，除了土壤侵蚀及河道沉积物的加剧外，地表不透水性面积的增大，使得原本应该入渗的降水转化为地表径流，地下水的补给显著减少，洪水发生的概率将明显增大，河道生态环境由于污染物的排放逐渐恶化。

第三个阶段为持续的城市化。更多不透水性建筑物的增加意味着地下水补给的持续减少以及地下水位的下降。先前的机井将不能再用以提水而报废，新的机井建设将进一步加剧地下水位的下降，形成降落漏斗，并在沿海地区将产生海水入侵。更多的地表径流通过排泄系统最终进入河道，引发洪水并导致河流渠道及河岸河床的侵蚀。除此之外，更多的废污水由于超出排泄系统的调控能力而直接排泄到河道，从而加剧了河道生态系统的恶化。

1.2.2.2 城市化的水文效应

城市化的水文效应主要体现在水文机制（hydrologic regime）的改变。水文机制是一定气候条件及水文下垫面条件下的产物。水文下垫面包括地表面的岩石、