doi:10.3799/dqkx.2013.104

城市扩张下的北京平原区降雨入渗补给量变化

朱 琳^{1,2,3},刘 畅^{1,2,3},李小娟^{1,2,3},郭高轩⁴,潘 云^{1,2,3}

1.首都师范大学资源环境与旅游学院,北京 100048
 2.北京市城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地,北京 100048
 3.资源环境与地理信息系统北京市重点实验室,北京 100048
 4.北京市水文地质工程地质大队,北京 100195

摘要:结合 WetSpass 模型与地理信息系统(geographic information system,GIS)、遥感(remote sense,RS)技术分析了城市扩张引起的土地利用类型变化对北京平原区降水入渗补给量的影响.在估算出 1982 年和 2007 年降水入渗补给量的基础上,将 2007 年土地利用类型还原成 1982 年的情景重新估算,利用转移矩阵分析两年土地利用类型的相互转化关系,同时,基于 GIS 空间数据统计功能,计算出不同土地利用类型下的地下水补给量.结果表明,1982 年至 2007 年,研究区内水浇地减少 874 km²,其中 517 km² 转变为城镇建设用地.相对于 1982 年,2007 年城镇建设用地扩张了 831 km²,区内降水入渗补给量减 少约3 000万 m³.研究成果可以为北京平原区的地下水资源保护及土地资源配置提供较为科学的参考.

关键词:城市化;降雨入渗补给;WetSpass 模型;土地利用.

中图分类号: P641.8 文章编号: 1000-2383(2013)05-1065-08

Precipitation Infiltration Change in Beijing Plain in the Context of Urbanization

收稿日期: 2012-11-23

ZHU Lin^{1,2,3}, LIU Chang^{1,2,3}, LI Xiao-juan^{1,2,3}, GUO Gao-xuan⁴, PAN Yun^{1,2,3}

1.College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China
2.State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Beijing 100048, China
3.Beijing Key Laboratory of Resources Environment and Geographic Information System, Beijing 100048, China
4.Beijing Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Beijing 100195, China

Abstract: The WetSpass model is used to analyze the impact of urbanization on precipitation infiltration recharge in Beijing Plain combined with the technology of GIS (geographic information system) and RS (remote sense) in this paper. Based on the simulated precipitation infiltration in 1982 and 2007, the influence of land use changing on the precipitation infiltration is quantitatively analyzed by assuming the land-use type in 2007 was the same as that in 1982, and re-running WetSpass model with other input data in 2007. The transfer matrix is used to analyze the mutual transformation relationship of land-use types in the above-mentioned two years, and the statistical function of GIS is used to calculate the groundwater recharge under different land-use types. Results show that the area of irrigable land decreased by 874 km² from 1982 to 2007, among which 517 km² turned to the central urban land. The central urban area increased by about 831 km². The increasing urban area and the decreasing crop area eventually lead to the reduction of the average groundwater recharge. The groundwater recharge decreased by about 3×10^7 m³ in 2007 compared with the value under the simulated condition. The precipitation infiltration changed obviously in the region around Chaoyang and Fengtai districts characterized by significant urban expansion. This study can be a scientific reference for the groundwater resources protection and city layout of Beijing Plain. **Key words**: urbanization; precipitation infiltration; WetSpass model; land use.

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41201420,41130744,41101033);北京市科技新星项目(No.Z111106054511097);高等学校博士学科点专项 科研基金(No.10221010091).

作者简介:朱琳(1980-),副教授,主要研究方向为水资源信息技术.E-mail: hi-zhulin@163.com

0 引言

北京是以地下水作为主要供水源的大都市,地 下水资源供水量占整个城市供水的 2/3(俞孔坚等, 2009).20 世纪 80 年代以后,北京的城市化进程加快 (王 喜 全 等,2007),建设用地由 1982 年的 476.11 km²增加到 1995 年的1 465.10 km²,总耕地 面积锐减(刘芳,2010),2005 年四环以内面积已达 302 km²,五环以内面积已达 670 km²(欧阳志云等, 2005).到 2008 年建设用地面积猛增至 3 377.15 km²,2000—2008 年间有 283.89 km² 的耕 地和 34.48 km²林地转变为城镇建设用地(刘芳, 2010).随着城市化进程的加快和人口急速增长,水 资源短缺已成为影响北京经济发展的重要因素.准 确评价地下水资源的补给量是进行水资源科学开 发、有效保护的基础和关键.

目前评价地下水补给量的方法可概括为物理方 法、化学方法、数学方法3大类.物理方法一般基于 水量平衡原理或者能量平衡原理,具有很强的物理 意义.化学方法,特别在干旱地区,恰当的示踪剂评 价地下水补给被成功地广泛应用(王仕琴等,2009; 章斌等,2012).相对于以上两种方法,数值模型能够 较为方便地模拟整个流域或盆地的地下水补给情 况.其中,WetSpass 模型是建立在水量平衡基础上 的分布式降水入渗补给量估算评价模型,考虑了影 响降水入渗补给量的各种因子,包括气候条件、土壤 质地、土地利用类型等条件,可以准确估算大尺度的 降水入渗补给量、植被截留量、地表径流量以及蒸发 蒸腾量,受到了国内外学者的关注.Paul(2006)利用 WetSpass 模型评价了不同土地利用类型下吉林西 部的地下水补给和排泄量. Tilahun and Merkel (2009)应用 WetSpass 分析了 Dire Dawa 流域的地 下水补给状况,分析了不同土地覆被类型和土壤质 地对水均衡方程中各因子的影响.林岚等(2010, 2011)采用该模型评价松嫩盆地的降水入渗补给量, 结果表明,该地区的降水入渗补给量、蒸发蒸腾量和 区内产流量都与土壤质地和土地利用覆被类型有空 间相关性.Pan et al.(2011)以妫水河盆地为研究区, 讨论了不同下垫面条件下地下水的补给情况.潘云 等(2012)利用 WetSpass 模型初步估算了北京地区 的地下水补给量.据文献检索,目前国内针对城市扩 张对地下水补给方面的研究相对较少.于开宁 (2001)以石家庄为例,定性地阐述了城市化对地下

水补给的影响.高守英(2004)利用变参系数法获得 下垫面平均降水入渗系数,结合 GIS 和 RS 针对济 南城市扩展对地下水补给的影响进行分析,但从空 间角度利用数学模型分析北京城市扩张对降水入渗 补给量的影响尚缺乏研究.本文基于 WetSpass 模型 定量分析了北京平原区城市化进程对地下水补给量 的影响.在估算 1982 年和 2007 年降水入渗补给量 的影响.在估算 1982 年和 2007 年降水入渗补给量 的基础上,将 2007 年土地利用类型还原成 1982 年 的情景重新计算,比较城市扩张下降水入渗补给量 与 2007 年实际值变化情况.利用转移矩阵分析两年 土地利用类型的相互转化关系,基于 GIS 空间数据 统计功能,计算不同土地利用类型下的降水入渗补 给总量.该研究成果能够为制定合理的水资源规划 政策,指导北京市地下水资源的保护与土地利用类 型的合理配置提供科学参考.

1 研究区概况

北京平原区(不包含延庆县)由永定河、潮白河、 温榆河、大石河及蓟运河五大水系的河流冲、洪(湖) 积作用形成,总面积约为6390km²,约占北京市总面 积的38%(图1).气候类型属于温带大陆季风性气候. 年平均气温10~20℃,多年平均降水量为601.7mm (1984—2009年)(郭高轩等,2012).北京平原区 1980—2000年地下水人工开采占总排泄量的88% (北京市地质矿产勘查开发局,2008).地下水主要接 受大气降水入渗补给,约占地下水补给量的50%.



2 研究区降水入渗补给量估算

2.1 研究方法

本文利用 WetSpass 模型估算北京平原区降水 人渗补给量,并结合 GIS 和 RS 技术,研究城市扩张 对北京平原区降水入渗补给量的影响.WetSpass模 型是分布式降水入渗补给量估算模型.模型首先将 整个研究区划分成等面积格网,生成栅格图,每个栅 格中包含了裸地、植被覆盖区、开放水面以及不透水 地4 大类土地利用类型.其次,假设整个研究区内的 栅格属于4 大类中的某一类,分别计算这4 类土地 利用类型下研究区内可能的植被截留量、地表径流 量、蒸散量以及降水入渗补给量.然后根据每个栅格 中实际的裸地、植被覆盖区、开放水面及不透水地所 占比例,估算每个栅格上实际的植被截留量、地表径 流量、蒸散量以及降水入渗补给量.基本表达式是:

$$P = I + S + T + R , \qquad (1)$$

式中: P 为降水量(mm); I 为植被截流量(mm); S 为地表产流量(mm); T 为实际蒸散量(mm); R 为 入渗补给量(mm).模型中植被截留量主要依据土地 利用类型; 地表产流量依赖于土地利用类型、土壤质 地和坡度; 实际蒸散量是植物蒸腾量和地表蒸发量 的总和, 与潜在蒸量、植被系数和根系区土壤含水量 相关.

2.2 数据来源

WetSpass 模型输入的数据包括栅格数据和属 性数据.栅格数据包括:土地利用类型、DEM(digital elevation model)、坡度、温度、潜在蒸发量、降水、风速、地下水埋深和土壤质地类型.其中土地利用类型、气温、降水、风速、潜在蒸发量和地下水埋深数据 又分为丰水季(4-9月)和枯水季(10-12月和来年的1-3月)两类数据.属性数据以 DBF 格式输入, 包括:土壤参数、径流参数和土地利用类型参数.

DEM 数据来源于国际农业研究咨询组空间信息共享网;坡度数据是利用 GIS 技术处理 DEM 数据获得;潜在蒸发数据通过改进的 P-M 公式计算获得(王健等,2006;潘云等,2011).采用的土壤质地数据来自美国农业部.气温、降水和风速数据来自于研究区内 19 个气象观测站 1982 年和 2007 年的实测数据,在 ArcMap 中定义地理空间参考和设定投影坐标,利用 Kriging 插值获得枯水季和丰水季的气候条件栅格图.土地利用类型数据来自地球系统科学数据共享网,研究区土地利用类型共分为 13 类.地下水埋深数据来自《中国地质环境监测地下水位年鉴》,通过地统计插值生成地下水埋深空间分布图.

2.3 研究区降水入渗补给量

2007年研究区降水入渗补给量变化范围为 0~ 263.05 mm,区内平均值为 65.43 mm,年均降水入 渗补给量占全年降水量的 12%;1982年研究区降水 入渗补给量变化范围为 0~396.65 mm,研究区范围 内平均值为 118.54 mm,年均降水入渗补给量占全 年降水量的 22%.由图 2 可以看出,1982年和 2007 年降水入渗补给量的空间分布趋势大体一致,最高 值 均在东北部一带,最低值分布在中部.两年降水入



Fig.2 Simulated groundwater recharge of 1982 (a) and 2007 (b)

渗补给量的分布变化主要发生在研究区中部区域.

本文利用 2007 年的地下水位实测数据,北京自动气象站监测的日降水量数据和日蒸发量数据,采 用地下水位动态法对 2007 年的降水入渗量进行验证.排除分布在水源厂或者乡镇水管站附近的观测 井以及除了降水补给,还有其他补给来源(如河道侧 向补给作用)的观测井以及地下水位埋深较大的观测井,建立 WetSpass 模型估算结果与地下水位动 态法估算结果的线性关系,测定系数 R²达 0.963.

3 城市扩张对降水入渗补给量的影响

3.1 城市扩张

20世纪80年代以来,北京平原区出现急剧的 城市扩张,土地利用类型发生了明显变化.对1982 年和2007年北京平原区的两期遥感影像进行空间 分析,发现研究区中部区域的土地利用类型变化明 显(图3).进一步利用空间分析模块中的Tabulate Area转移矩阵定量分析1982年和2007年土地利 用类型间的相互转化面积,结果如表1所示.农田是 区内占地面积最大的土地利用类型,包括水田、水浇 地和旱地.其中水浇地分布面积最为广泛.1982年水 浇地面积占研究区面积的63%,2007年占49%.从 1982到2007年水浇地面积减少最大,减少面积为 874.29 km².城市扩张导致研究区城镇建设用地大 面积增长,总面积增加831.57 km²,其中有 517.42 km²的水浇地、108.06 km²的旱地以及 159.61 km²的农村聚落转变为城镇建设用地.1982 年到 2007 年间落叶阔叶林、针阔混交林、河湖滩地 的面积变化相对较小,而裸地、灌丛几乎没有变化.

为了讨论城市扩张对地下水补给量的影响,本 文将 2007 年土地利用类型还原成 1982 年的情景, 模型的其他输入参量保持不变.利用 WetSpass 模型 重新估算研究区的降水入渗补给量,结果如图 4a.年 降水入渗补给量变化范围为0~263.05 mm,与 2007 年实际值变化范围相同,这是因为入渗补给量最高 值和最低值所在区域的土地利用类型没有改变.模 拟的降水入渗补给量平均值为 70.22 mm,比 2007 年多 4.79 mm,合计水资源量约为 3×10⁷ m³.目前 北京人均每年耗水量 100 m³,减少的地下水水资源 能够供给北京 30 万人一年的用水量.

由于两种条件下降水人渗补给量的变化范围一样,在ArcMap中两者的渲染效果相同,通过颜色的差异性,可以看出两种条件下降水人渗补给量的变化.图4中研究区中部区域颜色差异明显,由图4a中的蓝色变为图4b中的绿色,表明该区域降水入渗补给量减少.根据降水入渗补给量直方图(图5)可以看出,2007年实际降水入渗补给量直方图(图5)可以看出,2007年实际降水入渗补给量有方图(图5)可以看的5.22mm范围内的栅格个数约占整个图像栅格总数的75%,而模拟的1982年该范围内的栅格数约占总数的70%.1982年模拟结果在157.83~210.44mm的栅格个数比2007年多7387个栅格.整体来看,2007年实际降水入渗补给量多集中在0~105.22mm,大于210.44mm的栅格个数较少,土地利用类型的改变导致研究区内降水入渗补给量减少.

3.2 城市扩张对降水入渗补给量的影响分析

北京城市扩张的模式是由城四区向四周发展



Fig.3 Land use types of Beijing Plain in 1982(a) and 2007(b)

表 1 北京平原区 1982—2007 年土地利用类型面面积转移矩阵(km²)

Table 1 Transfer matrix of land use type areas from 1982 to 2007

	落叶针 叶林	落叶阔 叶林	针阔混 交林	灌丛	灌丛 草地	水田	水浇地	旱地	城镇建 设用地	农村 聚落	内陆 水体	河湖 滩地	裸地
落叶针叶林	65.38	0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	6.78	31.98	0.00	0.04	0.00	0.02	0.00
落叶阔叶林	0.71	169.63	0.00	0.00	1.51	0.00	14.66	8.00	0.00	0.12	0.59	3.27	0.00
针阔混交林	0.01	0.00	4.92	0.00	0.91	0.00	2.50	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
灌丛	0.00	0.04	0.00	5.16	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
灌丛草地	0.00	0.00	0.00	0.06	35.45	0.00	0.30	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
水田	0.00	0.18	0.00	0.00	0.28	182.27	0.96	2.08	0.03	0.14	0.28	1.10	0.00
水浇地	0.23	9.70	0.00	0.00	1.88	0.36	2 984.33	6.91	1.37	1.17	5.49	1.48	0.00
旱地	0.00	0.24	0.00	0.00	0.00	0.09	1.59	60.70	0.05	1.84	0.20	0.48	0.00
城镇建设用地	4.96	12.68	0.00	0.09	2.13	24.58	517.42	108.06	543.67	159.61	5.79	0.96	0.00
农村聚落	2.18	2.57	0.00	0.00	4.96	20.62	306.99	20.95	2.29	568.39	1.13	0.52	0.00
内陆水体	0.18	0.27	0.00	0.00	0.63	2.66	43.09	5.61	0.00	0.09	79.32	4.01	0.00
河湖滩地	0.00	0.03	0.00	0.00	1.16	0.00	2.80	0.51	0.00	0.23	1.50	84.71	0.00
裸地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16







图 5 降水入渗补给量直方图

Fig.5 Precipitation infiltration recharge histogram a.2007 年模拟值(假设条件:土地利用类型采用 1982 年的,其他条件保持 2007 年的实际情况);b.2007 年实际值



图 6 水浇地、旱地减少区域分布(a)和城镇建设用地、农村聚落扩张区域分布(b)

Fig.6 Area of irrigated land and dry land in 1982, which disappeared in 2007 (a) and urban construction land and rural settlement which transferred from other land use type in 2007(b)

(图 6b),城镇建设用地的扩张集中分布在朝阳区和 丰台区.城镇建设用地的增加导致土壤表面环境改 变,使得不透水或弱透水面的面积扩大.2007年研 究区地表径流量为 51.76 mm,比模拟情景下地表径 流量多 25%.城市扩张使得降水大部分转化为地表 径流,流入雨水管道或其他排水装置,致使降水入渗 补给量减少.

城市化进程中形成的地下水位漏斗也会造成降 水入渗补给量减少.2007年北京平原区地下水降落 漏斗主要形成于海淀区和怀柔一顺义区.海淀区的 降落漏斗位于城镇建设用地区域内,土壤质地大部 分是粘土,根据美国农业部提出的土壤质地分类标 准(Nachtergaele et al., 2009),粘土的粘粒比重约 为60%,持水性较强不利于降水入渗补给地下水.地 下水降落漏斗的形成造成包气带厚度增加,降水进 人地面后,首先补充包气带缺少的水量,导致地下水 垂直补给来源减少.海淀区降落漏斗空间分布上对 应 2007 年降水入渗补给量小于 50 mm 的区域.相 比之下,怀柔一顺义区降落漏斗位于应急水源地及 水源厂一带,由于土地利用类型主要是农田和河湖 滩地,土壤质地为壤土和壤砂土,砂粒比重较大有利 于降水入渗,所以降水入渗补给量明显高于海淀区 降落漏斗区的补给量.怀柔一顺义降落漏斗对应 2007 年降水入渗补给量 150~200 mm 的区域.

城镇建设用地面积的增大以及水浇地面积的减 少使得研究区内平均地下水补给量减少.2007年城镇 建设用地的平均降水入渗补给量为 45.11 mm,比农 田(平均值76.27 mm)少31.16 mm,比草地 (105.35 mm)少60.24 mm.如表2所示,由于2007年 城市扩张城镇建设用地大面积增长,导致2007年城 镇建设用地覆盖区的地下水补给量比模拟值增长了 4102万m³,但整个研究区的地下水补给量比模拟值 减少约3000万m³.此外,从表2中也可以发现,2007 年水浇地平均入渗补给量与模拟值变化不大,2007 年为76.83 mm,还原1982年土地利用类型模拟情况 下的平均入渗补给量为77.03 mm.但由于水浇地缩减 面积的2/3全部转化为城市建设用地,使得2007年 水浇地覆盖区的地下水补给量比模拟值减少6796万 m³,是13类土地利用类型中补给变化量最大的土地 利用类型,这种变化无疑促使整个研究区降水入渗补 给量减少.

4 结论

科学准确的确定降水入渗补给量是准确定量评价地下水资源量的关键和基础.本文基于 WetSpass 模型研究城市扩张下的北京平原区降水入渗补给量 变化,主要有以下几点结论:

(1)1982 年降水入渗补给量为 0~396.65 mm, 区内平均入渗补给量约为 119 mm,2007 年降水入 渗补给量为 0~263.05 mm,区内平均入渗补给量约 为 65 mm.

(2)北京城市化进程加速,主要体现在植被覆盖

河湖滩地

裸地

Table 2	Change of precipitation infiltration from assuming environment to actual environment in 2007								
土地利用 类型	实际的平均降水 入渗补给量(mm)	实际的降水入渗补 给总量(10 ⁴ m ³)	模拟的平均降水入渗 补给量(mm)	模拟的降水入渗补给 总量(10 ⁴ m ³)	变化量 (10 ⁴ m ³)				
落叶针叶林	7.07	74.98	6.33	46.56	28.41				
落叶阔叶林	10.08	199.13	9.90	192.34	6.80				
针阔混交林	6.74	5.64	7.85	3.86	1.79				
灌丛	35.48	18.31	35.64	18.58	-0.27				
灌丛草地	105.35	374.15	95.31	473.70	-99.55				
水田	73.73	1 383.90	69.31	1 603.42	-219.52				
水浇地	76.83	23 276.75	77.03	30 072.32	-6795.57				
旱地	78.26	509.64	83.64	2 047.03	-1537.39				
城镇建设用地	45.11	6 211.95	38.68	2 109.97	4 101.99				
农村聚落	78.31	7 203.09	78.70	5 615.52	$1\ 587.57$				
内陆水体	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				

110.14

126.38

1 045.88

1.88

表 2 不同土地利用类型条件下降水入渗补给量变化

区大面积减少(包括森林、草地和农田)和城镇区的 扩展(包括城镇建设用地和农村聚落).对比 1982 年 与 2007 年土地利用类型可以发现,2007 年植被覆 盖的区域比 1982 年共减少 1 072 km²,约 1 028 km² 的植被覆盖地转换成城市用地,造成 2007 年不透水 或弱透水面的大面积增加.降水入渗补给量变化最 为显著的区域,主要分布在北京平原区的中部,尤其 是丰台区和朝阳区.

115.50

126.38

(3)将 2007 年土地利用类型还原成北京城市化 初期 1982 年的情景进行降水入渗补给量的计算,并 与 2007 年实际情况进行比较.可以发现,城市急剧扩 张过程中引发的土地利用类型改变、地下水位漏斗形 成、包气带厚度增加导致 2007 年城镇建设用地覆盖 范围内的地下水补给量增加了 4 102×10⁴ m³;北京平 原区降水入渗补给总量减少大约 3 000 万 m³.

该研究成果表明城市扩张对地下水补给的负面 影响应得到足够的重视,需进一步优化城市化进程 中的土地资源配置以保证北京平原区有较好的降水 入渗补给条件.

References

- Beijing Geology and Mineral Exploration Bureau, 2008. Beijing Groundwater. China Land Press, Beijing (in Chinese).
- Gao, S. Y., 2004. Research on the Recharge of Groundwater Affected by Urban Expansion in Jinan City(Dissertation). Shandong Normal University, Shandong, 24 - 31 (in Chinese with English abstract).

Guo, G. X., Xin, B. D., Zhu, L., et al., 2012. Multi-Scale

Analysis of Annual Precipitation in Beijing Area from 1724 to 2009 Based on Wavelete Transformation. Journal of China Hydrology, 32(3): 29-33 (in Chinese with English abstract).

-14.83

0.00

1 060.71

1.88

- Lin, L., Liang, T. H., Wang, X.X., 2010. Evaluation on Precipitation Infiltration Replenishment of Songnen Basin based on WetSpass Model. Water Resources & Hydropower of Northeast, 7:23-26(in Chinese with English abstract).
- Lin, L., Yin, Y.J., Xie, Y.N., 2011. Study on Rainfall Infiltration Recharge under Conditions of Difference Land Use and Cover in Songnen Basin. Water Resources & Hydropower of Northeast, 1: 35 - 38 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., 2010. Study on the Characteristics and Causes for Urban Sprawl in Beijing. Beijing Jiaotong University, Beijing, 21-33(in Chinese).
- Nachtergaele, E., Veldhuizen, H. V., Luc Verelst, L., 2009. Harmonized World Soil Database (Version 1.1).FAO, Rome,Italy and IIASA,Laxenburg,Austria.
- OuYang, Z. Y., Wang, R. S., Li, W. F. et al., 2005. Ecological Planning on Greenbelt Surrounding Mega City, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 25(5): 965 - 971 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y., Gong, H.L., Li, X.J., et al., 2011. Application of Valiantzas Approach to Estimating Reference Evapotranspiration in China. Advances in Water Science, 22(1), 30-37 (in Chinese with English abstract).
- Pan, Y., Gong, H.L., Zhou, D.M., et al., 2011. Impact of Land Use Change on Groundwater Recharge in Guishui River Basin, China. Geographical Science, 21(6): 734-743.
- Pan, Y., Zhu, L. Du, L. F., et al., 2012. Estimation of Rainfall

Infiltration in Beijing Plain Using WetSpass. *Journal of Resource Research*, 1:245-250(in Chinese with English abstract).

- Paul, M.J., 2006. Impact of Land-Use Patterns on Distributed Groundwater Recharge and Discharge—A Case Study of Western Jilin, China. Chinese Geographical Science, 16 (3):229-235.doi: 10.1007/s11769-006-0229-5
- Tilahun, K., Merkel, B.J., 2009. Estimation of Groundwater Recharge Using a GIS-based Distributed Water Balance Model in Dire Dawa. Ethiopia. *Hydrogeology Journal*, 17 (6): 1443-1457.doi: 10.1007/s10040-009-0455-x
- Wang, J., Cai, H.J., Li, H.X., et al., 2006. Study and Evaluation of the Calculation Methods of Reference Crop Evapotranspiration in Solar-Heated Greenhouse. *Journal of Irrigation and Drainag*, 25(6):11-14(in Chinese with English abstract).
- Wang, S.Q., Song, X.F., Xiao, G.Q., et al., 2009. Appliance of Oxygen and Hydrogen Isotope in the Process of Precipitation Infiltration in the Shallow Groundwater Areas of North China Plain. Advances in Water Science, 20(4): 495-501(in Chinese with English abstract).
- Wang, X. Q., Wang, Z. F., Qi, Y. B., et al., 2007. Preliminary Inspect about the Effect of Urbanization on Precipitation Distribution in Beijing Area. *Climatic and Environmental Research*, 12 (4): 481 - 495 (in Chinese with English abstract).
- Yu,K.J., Wang, S.S., Li, D. H., et al., 2009. The Function of Ecological Security Patterns as an Urban Growth Framework in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 29(3): 1189-1204(in Chinese with English abstract).
- Yu,K.N.,2001. The Impact of Urbanization on Groundwater Recharge: A Case Study of Shijiazhuang City. *Acta Geoscientia Sinica*,22(2):175-178 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, B., Guo, Z. R., Gao, A. G., et al., 2012. Estimation Groundwater Discharge into Minjiang River Estuary

Based on Stable Isotopes Deuterium and Oxygen-18. Advances in Water Science, 23(4):530-539 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 北京市地质矿产勘查开发局,2008.北京地下水.北京:中国大 地出版社.
- 高守英,2004.济南市城市扩展对地下水补给的影响研究(硕 士学位论文).山东:山东师范大学,24-31.
- 郭高轩,辛宝东,朱琳,等,2012.基于小波变换的北京地区 1724-2009年降水量多尺度分析.水文,32(3):29-33.
- 林岚,梁团豪,王晓昕,2010.采用 WetSpass 模型评价松嫩盆 地降水入渗补给量.东北水利水,7:23-26.
- 林岚,殷玉杰,谢艾楠,2011.不同土地利用/覆被条件下松嫩 盆地降水入渗补给量研究.东北水利水电,1:35-38.
- 刘芳,2010.北京城市蔓延的特征及成因分析(硕士学位论 文).北京:北京交通大学,21-33.
- 欧阳志云,王如松,李伟峰,等,2005.北京市环城绿化隔离带 生态规划.生态学报,25(5):965-971.
- 潘云,宫辉力,李小娟,等,2011.蒸散发模拟的 Valiantzas 方 法在中国的应用.水科学进展,22(1):30-37.
- 潘云,朱琳,杜鹭飞,等,2012.基于 WetSpass 模型的北京平 原区降水入渗量估算.水资源研究,1:245-250.
- 王健,蔡焕杰,李红星,等,2006.日光温室作物蒸发蒸腾量的 计算方法研究及其评价.灌溉排水学报,25(6):11-14.
- 王仕琴,宋献方,肖国强,等,2009.基于氢氧同位素的华北平 原降水入渗过程.水科学进展,20(4):495-501.
- 王喜全,王自发,齐彦斌,等,2007.城市化与北京地区降水分 布变化初探.气候与环境研究,12(4):481-495.
- 俞孔坚,王思思,李迪华,等,2009.北京市生态安全格局及城 市增长预景.生态学报,29(3):1189-1204.
- 于开宁,2001.城市化对地下水补给的影响——以石家庄市 为例.地球学报,22(2):175-178.
- 章斌,郭占荣,高爱国,等,2012.用氢氧同位素评价闽江河口 区地下水输入.水科学进展,23(4):530-539.