

京津唐城市群不透水地表增长格局以及水环境效应

匡文慧¹, 刘纪远¹, 陆灯盛²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. Indiana University, Indianapolis 47405, USA)

摘要: 不透水地表 (Impervious Surface Area, ISA) 时空格局是城市化与全球环境变化交互影响下的土地利用/覆盖变化—生态系统过程—区域气候变化相互作用机理以及导致的环境效应研究的重要内容。如何快速准确地实现区域尺度不透水地表遥感信息的获取是上述研究面临的重要瓶颈问题。本研究嵌入中国 LUCC 信息改进了基于 MODIS NDVI 与夜间灯光指数 (DMSP-OLS) 提取不透水地表信息的方法, 反演了 2000 年与 2008 年京津唐城市群 2 期 250 m 不透水地表信息, 进而分析其变化的时空格局, 结合子流域单元与河流污染物监测数据评价其对海河流域地表水环境的影响。结论表明: 受环渤海经济区, 天津滨海新区开发等政策的影响, 京津唐城市群在 21 世纪初 8 年不透水地表沿着城—乡梯度带、城市交通廊道及海岸带高速增长。城乡建设用地不透水地表增长呈现显著的时空差异特征, 由于北京市受人口-资源-环境的压力, 产业发展不断向周边地区转移, 天津与河北唐山、廊坊、秦皇岛三市具有更快的不透水地表增长速度。京津唐城市群城市高密度的不透水地表分布对于海河流域地表水环境产生严重影响, 不透水地表的生长加剧了流域河流水质的污染程度。同时也发现, 子流域不透水地表面积比例与 COD、NH₃-N 浓度均值呈现显著的线性关系。

关键词: 不透水地表; 水环境; 城市; 遥感; 京津唐城市群

1 引言

在局地、区域以及全球尺度上城市高强度的物质消耗与人类活动影响土地利用/覆盖变化、生物多样性与水文系统, 并以累积效应影响全球变化, 因而受到国际社会的日益关注^[1-2]。城市地区逐渐被认为是影响环境变化的热点区域, 快速城市化影响下的不透水地表大面积增长, 会增加地表径流, 从而使城市地表污染物直接以径流的方式进入河流, 进而加剧河流污染, 降低水质, 对流域地表水环境产生重要影响^[3-6]。城市面源污染成为流域地表水环境恶化的重要原因之一, 当流域不透水地表面积大于 25% 时会导致地表水环境的严重退化与毁坏^[5-6]。不透水地表被认为是评价城市化带来的环境影响以及城市生态系统健康状况的重要内容, 在城市生态环境以及气候变化效应评价方面具有重要意义^[3, 5, 7]。

不透水地表信息在城市土地利用分类^[8-9]、人口分布评价^[10-11]、城市规划^[12]以及流域污染^[5, 12]、地表径流^[5, 13]影响方面具有广泛应用。不透水地表空间信息提取方法, 如逐像元分类、亚像元分类、神经网络、回归树模型等方法不断发展^[14-21]。美国 USGS 应用 Landsat TM 遥感影像研发了国家尺度 30 m 高分辨率不透水地表数据集^[15]; 美国环境保护局集成全球气候影响评估方案预测未来美国国家尺度不透水地表增长情景以及对地表水环境影响时空格局^[7]; 美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 基于 DMSP-OLS 发展了全球 1 km 建设用

收稿日期: 2011-01-27; 修订日期: 2011-03-16

基金项目: 国家“973”计划项目 (2010CB950900); 国家自然科学基金青年基金项目 (40901224); 遥感科学国家重点实验室开放基金项目 (2009KFJJ005) [Foundation: National Basic Research Program of China, No.2010CB950900; National Nature Science Foundation of China, No.40901224; Opening Foundation of State Key Laboratory of Remote Sensing Science, No.2009KFJJ005]

作者简介: 匡文慧 (1978-), 男, 博士, 助研。目前主要从事土地利用/覆盖变化、城市遥感应用研究工作。
E-mail: kuangwh1978@sina.com

1486-1496 页

地不透水地表数据集,表明中国具有全球面积最大的不透水地表面积^[6]。以欧美为主的国家应用经验阈值法、实验观测法以及模型模拟等方法对城市不透水地表增长对流域水环境污染影响评价开展了大量研究^[5-7, 22],在我国近年来也逐渐受到关注^[23-24]。

京津唐城市群作为我国三大城市群水资源短缺最为严重的都市圈之一。进入21世纪伴随着我国新一轮的国土资源大开发,城市群经历了快速的城市增长过程,正朝着大都市连绵区态势发展^[25-27]。应用多尺度遥感信息定量评价其快速城市化过程导致地表不透水增长时空格局以及对地表水环境影响的范围、程度是当前研究中面临的重要科学问题。本研究嵌入中国LUCC信息改进了基于MODIS NDVI与DMSP-OLS提取21世纪初8年京津唐城市群城乡不透水地表信息,进而分析其变化的时空格局,评价其对流域地表水环境的影响。该研究对于城市群城市环境规划与治理具有重要的参考价值与现实意义。

2 研究区概况

本研究区空间范围包括北京、天津2个直辖市和河北省的唐山、廊坊、秦皇岛3个地级市,总面积5.5万km²,城市常住人口2936.86万人。京津唐城市群继长江三角洲、珠江三角洲城市群成为我国经济增长的第三极,作为北方地区经济发展重心,在我国政治、经济发展中起着重要的战略地位。该区位于我国生态环境脆弱带边缘,尤其是北京、天津、唐山城市缺水成为我国三大城市群水资源短缺最为严重的都市圈之一。改革开放以来,城市群建设用地快速增长与高强度开发,特别是大规模科技园区、经济园区与工业园区等新开发区建设,城市群正呈现“蔓延式”与“冒进式”城市增长态势,正形成大都市连绵带,向着区域城市化方向发展,城市快速增长与水土资源矛盾日益突出^[25-26]。进入21世纪以来,随着京津唐城市群经济结构调整,城市重心正由特大中心城市向周边城市转移,处于海岸带的天津滨海新区与唐山曹妃甸正经历着高速的城市增长过程^[27]。

3 数据基础与研究方法

本研究城市土地利用数据主要来源于2000年与2008年中国土地利用/覆盖数据集,分别基于2000年Landsat TM与2008年Landsat TM和中巴地球资源卫星(CBERS)人工数字化解译获取^[28-29];2000年和2008年MODIS NDVI与DMSP-OLS分别来源于美国地质调查局(USGS)与美国国家地球物理数据中心(NGDC)^[30-31]。流域界线主要来源于USGS 1 km DEM信息提取的子流域数据(Sub-drainage)^[32]以及中国科学院资源环境数据中心获取的中国二级流域界线。北京市航空像片与天津、河北2008年SPOT5(彩色和全色波段合成2.5m)为订购影像;流域内4个河流监测站点资料来源于中国环境保护部数据中心2005-2010年国家地表水水质自动监测数据^[33]。

区域尺度不透水地表信息提取方法是通过MODIS NDVI与DMSP-OLS遥感信息建立的城乡建设用地不透水地表指数嵌入人工数字化解译的城乡建设用地高精度空间信息,实现与中国土地利用/覆盖数据同期动态更新的城乡建设用地不透水地表信息提取,具体技术流程图(图1)。

在GIS的支持下建立京津唐城市群1:10万、城市内部结构1:1万方里控制网以及覆盖研究区250 m空间网格并进行投影转换生成具有统一坐标系统的城市基础地理空间坐标定位系统。应用2000年与2008年中国土地利用/覆盖现状矢量数据,提取城乡建设用地类型(包括城市、农村与独立工矿用地),对其独立工矿用地中盐田等水域部分进行剔除,然后生成250 m×250 m空间栅格数据集。应用2000年与2008年MODIS NDVI 16天250 m数据进行拼接并提取4-10月份最大值;DMSP-OLS 1 km图像进行重采样为250 m×250 m空

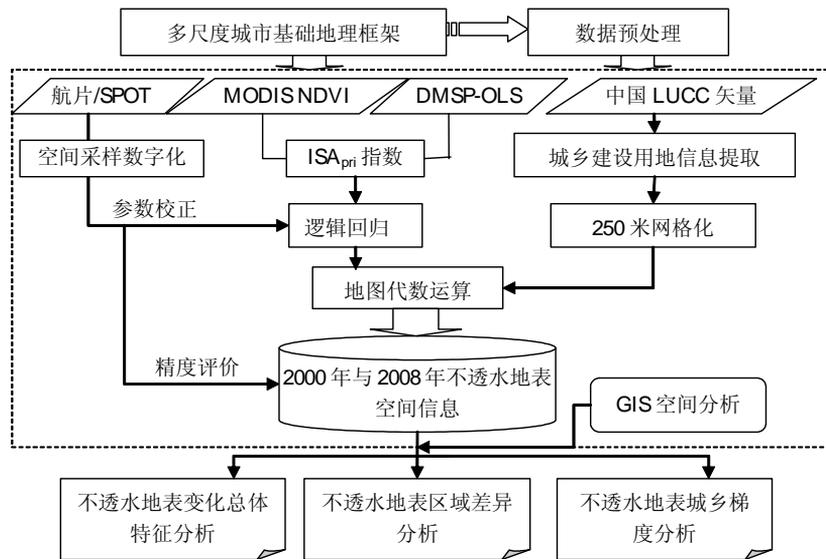


图1 区域尺度不透水地表空间信息提取技术流程图

Fig. 1 The technical process chart with extraction impervious surface area information at regional scale

间分辨率数据。根据 Lu^[33]提出的提取不透水地表空间信息算法, 具体公式如下:

$$ISA_{pri} = \frac{(1 - NDVI_{max}) + OLS_{nor}}{(1 - OLS_{nor}) + NDVI_{max} + OLS_{nor} \times NDVI_{max}} \quad (1)$$

式中: ISA_{pri} 为初步计算的不透水地表指数, $NDVI_{max}$ 为 MODIS NDVI 年中 4-10 月份最大值, OLS_{nor} 为归一化灯光指数 (0~1)。

在研究区内随机选择 203 个采样点将初步计算的不透水地表指数与航空影像和 SPOT 影像人工数字化解译的样本提取的不透水地表真实值进行回归参数校正, 公式如下:

$$ISA_{cal} = 0.657 + 0.241 \times \ln(ISA_{pri}) \quad (2)$$

式中: ISA_{cal} 为校正后的不透水地表指数。

本研究不透水地表指城乡不透水地表, 具体包括城市、农村与独立工矿用地 (去除水域部分), 通过校正后的不透水地表指数与城乡建设用地空间信息进行地图代数运算求交集产生, 具体公式如下:

$$ISA_{index} = ISA_{cal} \cap UR_{mask} \quad (3)$$

式中: ISA_{index} 为最终计算的不透水地表指数, 为 250 m×250 m 网格不透水成份比例数据 (1%-100%); UR_{mask} 为 250 m×250 m 城乡建设用地掩码。

通过上述技术方法获取 2000 年、2008 年海河流域不透水地表数据集, 不透水地表精度验证采用城市—乡村梯度带随机采样 206 个样本点, 对每个样本点选择 3×3 像元窗口作为精度评价单元。将航空像片与 SPOT5 (彩色和全色波段合成 2.5 m) 进行准确的空间定位, 对网格内不透水地表信息数字化交互解译, 进行精度验证与精度评价。由于嵌入人机交互判读的城市 LUCC 信息, 城乡用地判读准确率在 95% 以上^[28-29], 不透水比例误差幅度在 15% 以内, 而且 80% 的网格误差幅度控制在 5% 以内, 满足区域尺度不透水地表信息评估精度要求。

在 GIS 空间分析的支持下, 从海河流域不透水地表空间数据集剪切京津唐城市群界线范围内数据, 分析不透水地表增长的时空格局。

流域地表水环境影响评估采用子流域不透水地表指数模型, 即:

$$WIS(\beta) = \left(\sum_{xy}^m ISA_{index} \times A_{xy} \times N_{xy} \right) / S_{\beta} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $WIS(\beta)$ 是第 β 子流域单元内不透水地表指数; P_{xy} 、 A_{xy} 、 N_{xy} 分别为流域第 (x, y) 单元网格不透水地表比例、像元面积以及数量; S_{β} 是子流域总面积。

长期研究表明,流域内不透水面积比例与流域生态系统健康状况以及水体污染程度呈现显著的相关性。当 $WIS(\beta) \in 0\sim 1\%$, 表示对流域地表水环境基本没有影响; $WIS(\beta) \in 1\sim 5\%$, 表示对流域地表水环境产生轻度影响; $WIS(\beta) \in 5\%\sim 10\%$, 表示对流域地表水环境产生中度影响; $WIS(\beta) \in 10\%\sim 25\%$, 表示对流域地表水环境产生重度影响; $WIS(\beta) \in 25\%\sim 100\%$, 表示导致流域地表水环境严重退化^[5-7];

河流水质监测站点污染浓度与所在子流域不透水地表指数空间关系采用回归模型分析, 即:

$$PS_{(i,p)} = a_i + b_i \times WIS(\beta)_p \quad (5)$$

式中: $PS_{(i,p)}$ 为第 p 个站点监测第 i 种污染物平均浓度; $WIS(\beta)_p$ 为第 p 个站点所在子流域不透水地表指数; a_i 、 b_i 分别为回归系数。

4 结果与分析

4.1 不透水地表增长的时空格局分析

4.1.1 城乡建设用地与不透水地表变化总体特征

基于遥感解译的中国土地利用/覆盖数据分析表明, 2000-2008年京津唐城市群城乡建设用地面积总计增长了1384.53 km², 以每年173.07 km²的速度增长。其中城镇用地增长是其主要增长类型, 占总增长面积的65%, 8年间城镇用地面积增长了899.95 km², 增长面积占2000年城镇用地总面积的44%; 农村用地增长占总增长的11%, 城镇以外的厂矿、大型工业区、交通道路等独立工矿用地增长占总增长面积的24%。

城乡建设用地不透水地表增长遥感信息分析表明, 8年间城乡建设用地不透水地表增长了1160.22 km², 以每年145.03 km²的速度增长, 城镇不透水地表面积占总增长面积的55%, 农村不透水地表面

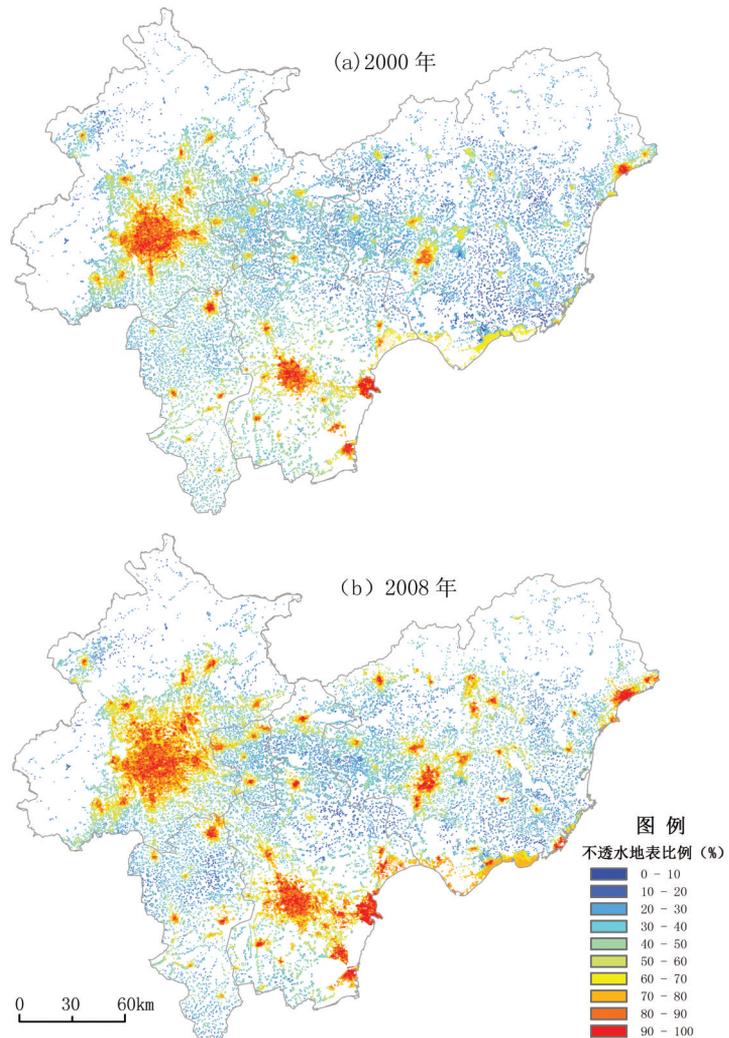


图2 2000年(a)和2008年(b)京津唐不透水地表空间信息
Fig. 2 Spatial information of impervious surface area in 2000 and 2008

积占总增长面积的22%，城乡工矿用地占总增长面积的23% (图2)。研究区8年间城镇不透水地表面积从1579.59 km²增长到2222.95 km²，总计增长了643.36 km²，以每年80.42 km²的速度增长 (图3)。总体上，京津唐城市群在21世纪初8年受国家新一轮国土大开发的影响，作为中国三大城市群新的增长极，城乡建设用地大规模增长，城市呈现快速的向外蔓延态势。

4.1.2 不透水地表面积变化区域差异

京津唐城市群由于北京、天津以及河北唐山、廊坊、秦皇岛三

市的城市性质、规模、职能的不同呈现不均衡的发展态势，2000-2008年城乡建设用地以及不透水地表增长呈现明显的区域差异特征。比较分析2000年与2008年北京、天津以及河北三市城乡建设用地不透水地表所占城乡建设用地比例，发现天津市不透水地表密度最高，其次为北京市；河北唐山、廊坊与秦皇岛城市不透水地表面积比例最低。21世纪初8年京津唐城市群的城乡不透水地表快速增长，北京市作为城市群的首位城市，不透水地表面积以每年41.61 km²的速度增长了332.84 km²，增长比重占2000年不透水地表面积的26.64%；天津市作为城市群的第二大城市，不透水地表以每年39.49 km²的速度增长了315.91 km²，不透水地表增长的比重占2000年不透水地表面积的36.66%；河北三市不透水地表以每年63.93 km²的速度增长了511.47 km²，比重占2000年不透水地表面积的39.62% (表1)。其中河北唐山、廊坊与秦皇岛三市以及天津市城乡不透水面积增长比例相对而言比北京市更快。这受北京特大城市人口—资源—环境的压力与区域发展战略以及土地利用政策调整的影响，21世纪城市群发展重心呈现由特大中心城市向周边城市转移，京津唐城市群经济结构调整以及天津滨海新区快速发展密切相关。由于在2008年奥运会举办期间，北京城市绿化工程建设力度的增加以及北京5环沿线绿化工程初见成效，北京城镇用地不透水地表面积基数较大，增长比例与天津、河北三市相比较小。

4.1.3 城市—乡村不透水地表变化的空间梯度

城市—乡村不透水地表时空变化的空间梯度分析对于认识由人工建筑景观到乡村自然景观过度的时空效应具有重要意义。基于GIS欧几里德(Eucdistance)空间分析功能，以北京、天津与唐山城市中心到乡村划分为城市核心区、城市边缘区、城市近郊区以及乡村地区，将其欧几里德距离与2000年、2008年不透水地表进行空间叠置分析，计算在0~60 km内每隔10 km的城乡不透水用地比例 (图4)，并分别对各梯

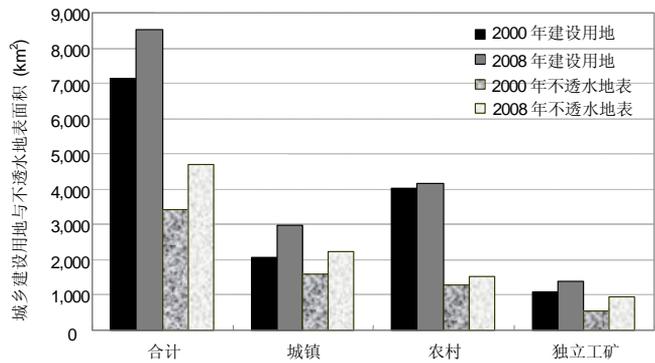


图3 京津唐城市群2000与2008年不同城乡建设用地及不透水地表面积变化图

Fig. 3 The urban-rural land and impervious surface area change from 2000 to 2008

表1 2000-2008年京津唐城市群城乡建设用地不透水面积变化

Tab. 1 Urban-rural constructed impervious surface area change from 2000 to 2008

区域名称	类型	2000年面积 (km ²)	2008年面积 (km ²)	变化面积 (km ²)	增长比例 (%)
北京	不透水地表	1249.40	1582.24	332.84	26.64
天津	不透水地表	861.72	1177.63	315.91	36.66
河北三市	不透水地表	1290.81	1802.28	511.47	39.62
北京	城镇	819.38	1032.63	213.25	26.03
	农村	328.73	447.47	118.74	36.12
	独立工矿	101.29	154.36	53.07	52.40
天津	城镇	443.30	632.57	189.27	42.70
	农村	265.41	289.83	24.41	9.20
	独立工矿	153.01	337.53	184.52	120.59
河北三市	城镇	316.91	557.75	240.84	76.00
	农村	688.92	800.69	111.77	16.22
	独立工矿	284.98	443.84	158.86	55.74

度带反映的城市不透水地表景观特征、建设用地密度进行对应的分析。分析表明,北京城市不透水地表大于50%比例高密度分布区位于城市中心外围的20 km以内,而天津与唐山位于城市中心到外围的10 km以内。

根据距离城市中心到边缘区不透水分布比例可知,距离城市中心10 km之内,北京主要以高密度的居住用地、道路以及商业、公共建筑镶嵌为主。距离城市中心10~30 km属于北京城市边缘区,是2000-2008年城市不透水地表面积集中增长区域;

而对于天津与唐山属于城市的近郊区,城市不透水地表主要以外围工业发展为主呈现一定的增长。距离城市中心30 km以外区域以乡村自然景观为主,平均城乡建设用地不透水比例小于20%,8年间不透水地表面积比例略有增长。结果表明,北京、天津与唐山由于城市规模的大小以及城市发展速度的不同,城市-乡村在空间梯度城市核心区、边缘区、近郊区以及乡村地区的不透水比例增长的分布特征、增长速度具有很大的差异性,也反映了不同空间梯度上人类活动的作用强度。

4.2 不透水地表增长对海河流域地表水环境影响分析

4.2.1 基于子流域单元的不透水地表增长对流域地表水环境影响评价 海河流域主要有海河与滦河两大水系,海河水系由漳卫河、子牙河、大清河、永定河、潮白河、北运河等组成;滦河水系包括滦河和冀东诸河。京津唐城市群主要位于海河流域滦河及冀东沿海、海河北系和海河南系三个二级流域。由于城市不透水地表增长会增加地表径流,降雨携带大量污染物,直接以径流的形式进入河流,对流域地表水环境产生重要影响。依据子流域内不透水地表面积不同阈值范围,将不透水分布对地表水环境影响依次分为无影响、轻度影响、中度影响、重度影响与严重退化。充分考虑京津唐城市群所在流域完整性,本研究基于GIS空间分析方法,统计与制图2000年与2008年海河流域各子流域不透水地表面积比例以及对地表水环境影响的程度(图5)。

由2000年海河流域不透水地表影响空间分布(图5a)分析可知,京津唐城市群所在子流域是海河流域地表水环境影响最为严重的区域。2000年京津唐城市群涉及严重退化子流域1个,面积1790 km²;重度影响子流域主要涉及3个,总计面积5072 km²;中度影响子流域主要涉及4个,总计面积11896 km²;城市群内大部分区域为轻度影响区,只有3个子流域为无影响区。受北京与天津两大城市的影响,地表水影响较重的子流域主要通过永定河、北运河、大清河等水系汇集于海河干流直接流入渤海。

21世纪初8年京津唐城市群不透水地表沿城市周边以及海岸沿线快速增长,导致子流域影响程度加重。1个子流域由重度影响区转化为严重退化子流域,主要位于天津滨海新区海岸带沿线(图5c),面积为1089 km²;有1个子流域由中度影响区转换为重度影响子流域,主要受天津城市增长的影响,面积为2240 km²;有2个子流域由轻度污染转变为中度污染,主要以秦皇岛城市增长影响为主。21世纪初8年城市高速扩张驱动下的不透水地表

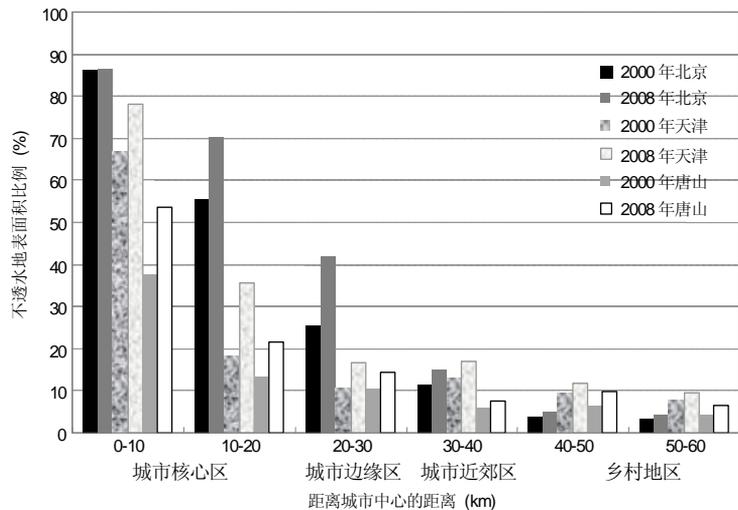


图4 北京—天津—唐山城市—乡村梯度不透水比例空间分布特征
Fig. 4 Impervious surface area percentage from urban to rural gradient belt in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area

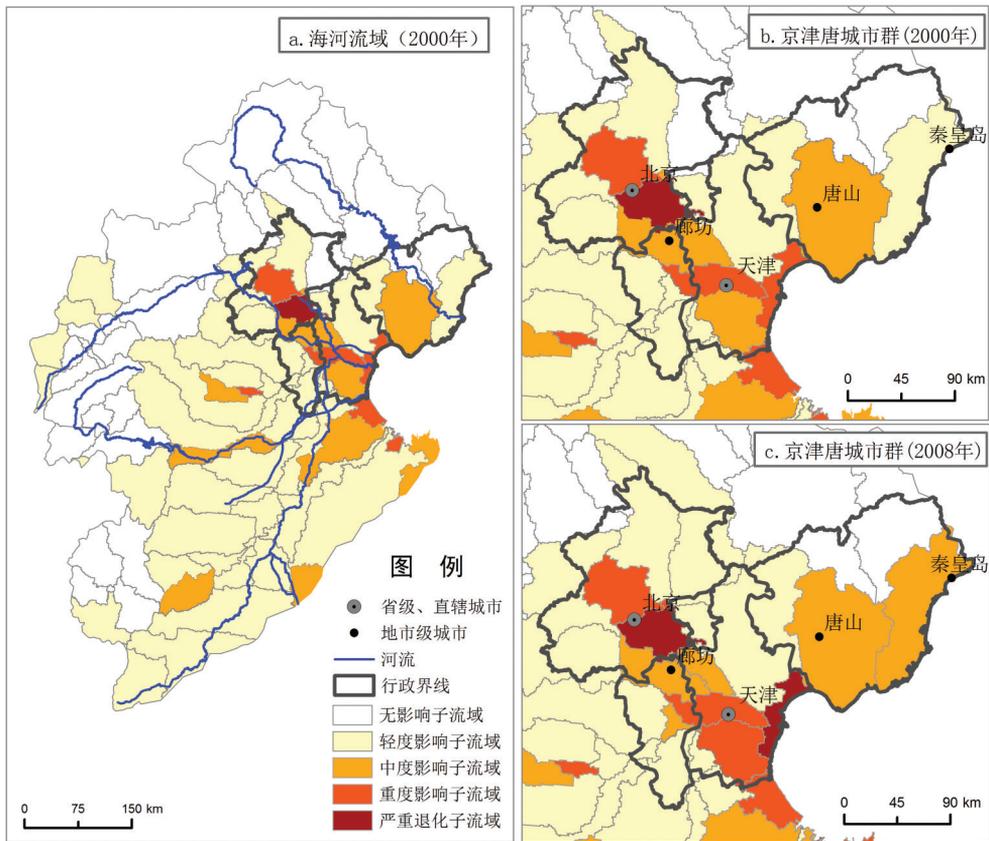


图5 2000-2008年城市群城乡不透水增长对流域地表水环境影响分布图

Fig. 5 Distribution of sub-drainage impacts on aquatic ecosystems by impervious surface area growth from 2000 to 2008

面积增长加剧了流域地表水环境恶化影响程度。

4.2.2 基于河流污染监测站点的不透水地表流域分布与水环境质量关系分析 城市化、工业化进程对流域内河流水质的影响主要表现为高污染工业企业造成的点源污染以及城市不透水地表携带的大量污染物进入河流造成的面源污染。本研究基于国家环境保护部门国家地表水质自动监测站监测数据,包括北京密云古北口、北京门头沟沿河城、天津三岔口与天津

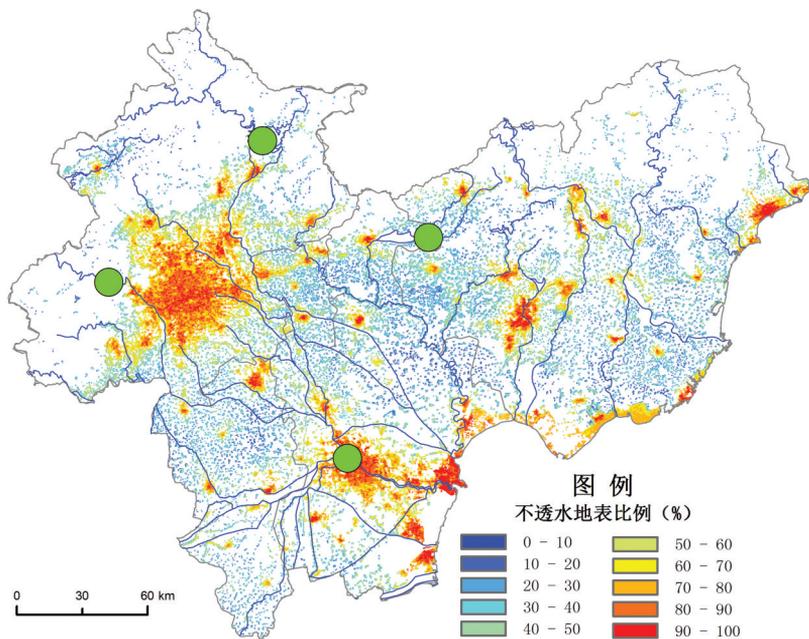


图6 2008年城市群城乡不透水地表与河流水质监测站点分布图

Fig. 6 Impervious surface and river water quality stations distribution in 2008

果河桥4个河流水质监测站点,通过比较不同监测站点所在子流域的不透水地表分布对其影响程度、面积比例与主要污染物(COD、NH₃-N)之间的空间关系以及回归分析研究不透水地表空间分布与流域水环境质量之间的关系。

从站点空间分布来看(图6),北京密云古北口、北京门头沟沿河城站点位于流经北京主城区河流的上游,受城市不透水地表影响甚微,天津果河桥受城市不透水地表分布略有影响,天津三岔口站点在大面积的城市不透水地表包围下,天津等城市地表污染物将直接流入海河干流(入海口),流经天津三岔口站点,该站点受不透水地表分布影响程度最为严重。根据国家环境保护部监测结果^[34],2005-2010年海河流域4个站点污染物COD、NH₃-N浓度平均值最高的是天津三岔口,数值分别为9.18、1.27 mg/L。各监测站点河流水质污染物平均浓度总体上天津高于北京市,天津的三岔口浓度高于果河桥(图7)。从站点监测水质类别分析可知,2005-2010年天津的三岔口劣V类、V类、IV类水质周数最多,天津果河桥II类水质周数最多,相对而言北京密云古北口、北京门头沟沿河城监测的水质状况相对较天津2个站点良好。

通过不同监测站点所在子流域的不透水分布面积比例与主要污染物(COD、NH₃-N)进行回归分析,发现子流域不透水比例与2005-2010年COD、NH₃-N浓度均值呈现显著的线性回归关系,复相关系数分别达到0.94与0.97。结合图7与表2可以发现,子流域单元内不透水地表面积比例与河流水质污染程度密切相关,处于不透水地表高密度分布的子流

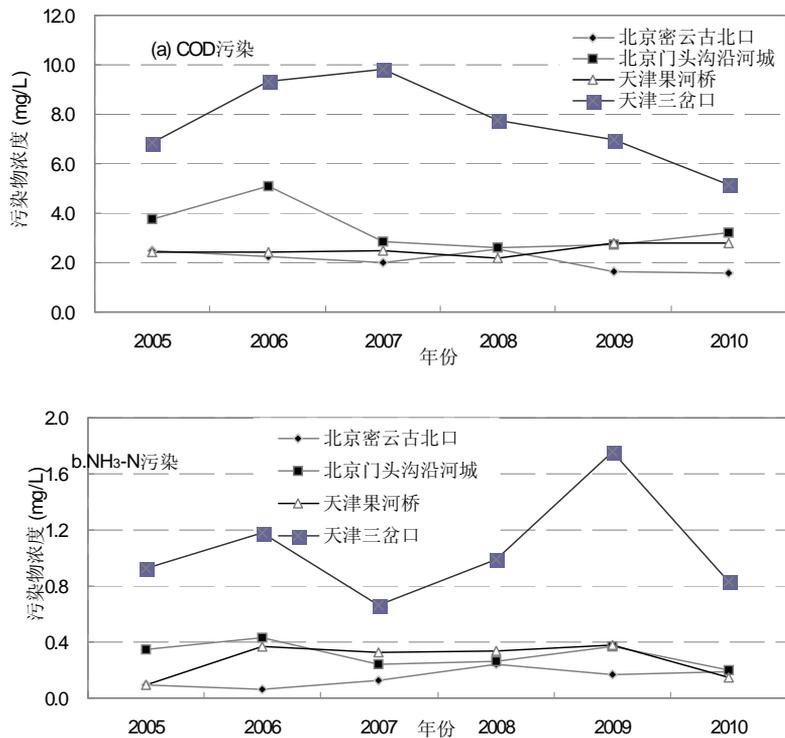


图7 2005-2010年京津唐城市群河流污染监测站点河流水质污染物浓度值
Fig. 7 River pollution concentration changes from monitored stations in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area during 2005-2010

表2 京津唐城市群河流水环境监测站点分布特征以及与河流污染之间关系
Tab. 2 The distribution of monitored river stations and their relationship with river pollution in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area

站点名称	所在子流域不透水地表比例 (%)	所在子流域地表水影响程度	COD 浓度均值 (mg/L)	NH ₃ -N 浓度均值 (mg/L)	子流域不透水比例与 COD 浓度均值关系	子流域不透水比例与 NH ₃ -N 浓度均值关系
北京密云古北口	3	轻度影响	2.49	0.18	y = 0.3225x + 2.0249 R = 0.9391	y = 0.053x + 0.1 R = 0.9726
北京门头沟沿河城	3	轻度影响	4.04	0.37		
天津果河桥	5	轻度影响	3.03	0.33		
天津三岔口	22	重度影响	9.18	1.27		

域内河流的污染程度相对较重。研究表明,海河流域不透水地表对河流地表水环境造成了不同程度的影响,而且随着不透水地表大面积增长,呈现影响程度加重的趋势。

5 结论与讨论

本研究应用最新动态更新的中国土地利用/覆盖变化信息与基于MODIS NDVI、DMSP-OLS反演的不透水地表信息的嵌入,研发了区域不透水地表遥感信息的动态更新方法,进而反演了2000年与2008年京津唐城市群2期250 m城乡不透水地表信息,分析其变化的时空格局;进而从子流域与监测站点两个层次评价不透水地表增长对地表水环境质量的影响程度。研究结论表明:

(1) 在遥感与GIS集成平台支持下,基于MODIS NDVI、DMSP-OLS反演的不透水地表信息,嵌入人工交互遥感解译的中国LUCC城乡建设用地边界信息,提取区域不透水地表空间信息,不仅可以提高不透水地表信息提取的精度,而且可以实现国家或区域尺度不透水地表的快速动态更新。

(2) 京津唐城市群伴随着中国环渤海区域的快速崛起,正成为国家发展战略重要地区。21世纪以来,随着环渤海经济区的大开发,天津滨海等新区建设的启动,导致京津唐城市群8年间城乡建设用地不透水地表以每年145.03 km²的速度增长了1160.22 km²,城镇不透水地地表以每年80.42 km²的速度增长了643.37 km²。城市不透水地表沿着城—乡梯度带、城市之间交通廊道以及海岸沿线呈现高速的增长态势。

(3) 京津唐城市群城乡建设用地不透水地表增长呈现显著的时空差异特征,北京市受城市人口—资源—环境的压力与区域发展战略以及土地利用政策调整的影响,城乡建设用地增长不断向周边地区转移,天津、河北三市与北京市相比不透水地表面积具有更快的增长比例。而且,北京与天津、唐山城市不透水地表增长的城乡梯度效应具有显著差异。

(4) 基于不透水地表空间信息,初步评价对流域地表水环境产生的影响,研究表明,海河流域内不透水地表高密度分布对流域地表水环境产生严重影响,对于海河北系二级子流域影响最为严重。而且21世纪初8年间,流域地表河流水环境重度影响与严重退化面积快速增长,加剧了海河流域河流水质的污染。

(5) 通过子流域不透水比例与研究区内4个国家环境保护部河流水质自动监测数据之间关系分析,发现子流域不透水比例与COD、NH₃-N浓度均值呈现显著的线性回归关系,处于不透水地表高密度分布的子流域内河流的污染程度相对较重。

本研究结合区域尺度不透水地表空间信息,分析京津唐城市群城乡建设用地增长的时空格局,进而评价其地表水环境效应。同时,也应用国家环境保护部监测数据与子流域评价结果进一步作定量关系分析。不透水地表对于河流水环境影响研究仍然需要借助于合理方案的野外实验与模型模拟等手段对不透水地表产生的水环境效应从机理角度进行更深入的研究。

参考文献 (References)

- [1] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E et al. Global change and the ecology of cities. *Science*, 2008, 319: 756-760.
- [2] IHDP Report. Urbanize and global environment change. International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2005, 15: 1-60.
- [3] Alberti M. *Advances in urban Ecology integrating humans and ecological processes in urban ecosystems*. New York: Springer science + business media, 2009.
- [4] Pickett S A, Cadenasso M L, Grove J M et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92: 331-362.
- [5] Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of*

- American Planning Association, 1996, 2: 243-258.
- [6] Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C et al. Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Sensors*, 2007, 7: 1962-1979.
- [7] Bierwagen B G, Theobald D M, Pyke C R et al. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. *PNAS*, 107(49): 20887-20892.
- [8] Madhavan B B, Kubo S, Kurisaki N. Appraising the anatomy and spatial growth of the Bangkok metropolitan area using a vegetation-impervious-soil model through remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(5): 789-806.
- [9] Lu D S, Weng Q H. Use of impervious surface in urban land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 146-160.
- [10] Wu C S, Murray A T. A cokriging method for estimating population density in urban areas. *Computers Environment and Urban Systems*, 2005, 29: 558-579
- [11] Lu D S, Weng Q H, Li G Y. Residential population estimation using a remote sensing derived impervious surface approach. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27: 3553-3570.
- [12] Brabec E, Schulte S, Richards P L. Impervious surface and water quality: A review of current literature and its implications for watershed planning. *Journal of Planning Literature*, 2002, 16: 499-514.
- [13] Ahn J H, Grant S B, Surbeck C Q et al. Coastal water quality impact of storm water runoff from an urban watershed in southern California. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39: 5940-5953.
- [14] Hodgson M E, Jensen J R, Schmidt L et al. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84: 295-308.
- [15] Yang L M, Huang C, Homer C G et al. An approach for mapping large-area impervious surfaces: Synergistic use of Landsat 7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 2: 230-240.
- [16] Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(12): 2165-2185.
- [17] Lu D S, Weng Q H. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28: 823-870.
- [18] Lu D S, Weng Q H. Spectral mixture analysis of ASTER images for examining the relationship between urban thermal features and biophysical descriptors in Indianapolis, Indiana, USA. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 104: 157-167.
- [19] Lu D S, Weng Q H. Use of impervious surface in urban land use classification. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 146-160.
- [20] Hu X F, Weng Q H. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perception neural networks. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113: 2089-2102.
- [21] Wang Hao, Wu Bingfang, Li Xiaosong et al. Extraction of impervious surface in Hai Basin using remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(2): 388-400. [王浩, 吴炳方, 李晓松 等. 流域尺度的不透水面遥感提取. *遥感学报*, 2011, 15(2): 388-400.]
- [22] Booth D B, Jackson C R. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resource Association*, 1997, 33(5): 1077-1089.
- [23] Ren W, Zhong Y, Meligrana J et al. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai 1947-1996. *Environment International*, 2003, 29: 649-659.
- [24] Yin Z, Walcott S, Kaplan B et al. An analysis of the relationship between spatial patterns of water quality and urban development in Shanghai, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29: 197-221.
- [25] Lu Dadao. Urbanization process and spatial sprawl in China. *Urban Planning Forum*, 2007, (4): 47-52. [陆大道. 我国的城镇化进程与空间扩张. *城市规划学刊*, 2007, (4): 47-52.]
- [26] Yao Shimou, Wang Chen, Zhang Luocheng et al. The influencing factors of resources and environments in the process of urbanization of China. *Progress in Geography*, 2008, 27(3): 94-100. [姚士谋, 王辰, 张落成 等. 我国资源环境对城镇化问题的影响因素. *地理科学进展*, 2008, 27(3): 94-100.]
- [27] Kuang Wenhui. Simulating dynamic urban expansion at regional scale in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(1): 317-330.
- [28] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995-2000. *Science in China: Series D*, 2003, 46(4): 373-384.
- [29] Liu Jiyuan, Zhang Zengxiang, Zhuang Dafang et al. A study on the spatial-temporal dynamic changes of land-use and driving forces analyses of China in the 1990s. *Geographical Research*, 2003, 22(1): 1-12. [刘纪远, 张增祥, 庄大方 等. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. *地理研究*, 2003, 22(1): 1-12.]

- [30] U.S. Geological Survey. HYDRO1k Elevation Derivative Database. http://eros.usgs.gov/#Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30/hydro/asia.
- [31] U.S. Geological Survey. MODIS NDVI production. <http://glovis.usgs.gov>.
- [32] NOAA. Global dmsp-ols nighttime lights time series 1992 - 2009 (version 4) (<http://www.ngdc.noaa.gov/dmsp/sensors/ols.html>)
- [33] Lu D S, Tian H Q, Zhou G M. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensory remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*. 2008, 112, 3668-3679.
- [34] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. National surface water quality automatic monitoring and real-time publishing system. <http://58.68.130.147/#>. 2011. [中国环境保护部. 国家地表水水质自动监测实时数据发布系统, 2011.]

Pattern of Impervious Surface Change and Its Effect on Water Environment in the Beijing–Tianjin–Tangshan Metropolitan Area

KUANG Wenhui¹, LIU Jiyuan¹, LU Dengsheng²

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

2. *Indiana University, Indiana 47405, USA*)

Abstract: The impervious surface area (ISA) at the regional scale is one of important environmental factors for examining the interaction and mechanism of Land Use/Cover Change (LUCC) - ecosystem processes - regional climate change under the interactions of urbanization and global environment change. The timely and accurate extraction of ISA from remotely sensed data at the regional scale is becoming a bottle-neck issue. This study improved the MODIS NDVI and DMSP-OLS based ISA extraction method by incorporating LULC information of China. ISA datasets in Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area (BTTMA) in 2000 and 2008 at a spatial resolution of 250 m were developed, their spatial-temporal changes were analyzed, and their impacts on water quality were evaluated. The results indicated that ISA in BTTMA has rapidly increased along urban fringe and urban transportation corridors and coastal belt both in intensity and extents from 2000 to 2008. The growth rates of ISA in Tianjin and three cities (Tangshan, Langfang, and Qinhuangdao) in Hebei Province were greater than that in Beijing. The ISA increase has great impacts on water quality; particularly, the water pollution in the Haihe River has deteriorated due to the increase and intensification of impervious surface areas.

Key words: impervious surface; water environment; urban area; remote sensing; Beijing-Tianjin-Tangshan Metropolitan Area