

21 世纪初中国人工建设不透水地表遥感监测与时空分析

匡文慧^①, 刘纪远^{①*}, 张增祥^②, LU DengSheng^③, 香宝^④

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101;

③ Michigan State University, East Lansing, MI48824, USA;

④ 中国环境科学研究院, 北京 100012

* 联系人, E-mail: liujy@igsrr.ac.cn

2012-08-26 收稿, 2012-10-26 接受

国家自然科学基金青年科学基金(40901224)、国家重点基础研究发展计划(2010CB95090100)、国家科技支撑计划(2012BAJ15B02)、国家水专项(2009ZX07207-011)和国家高技术研究发展计划(2009AA122002-3)资助

摘要 进入 21 世纪中国快速的城市化、工业化受到世界瞩目。基于国家资源环境遥感时空信息平台动态更新的中国土地利用/覆盖变化(LUCC)数据集以及人工建设不透水地表(ISA)空间数据集,在国家尺度监测 21 世纪初(2000~2008 年)人工建设用地与不透水地表的生长。结果表明,我国 21 世纪初 8 年间受新一轮国土开发战略、社会经济高速增长等因素的影响,全国人工建设用地与不透水地表面积分别以 3468.30, 2212.24 km²/a 的速度高速增长,到 2008 年不透水地表面积占国土总面积的 0.86%。2000~2008 年城市用地扩张速度是 20 世纪 90 年代的 2.18 倍,以 1788.22 km²/a 的平均速度扩张了 2000 年面积的 43.46%,其中城市不透水地表面积以 1348.85 km²/a 的速度增长了 2000 年面积的 53.30%。总体上,8 年间中国城市不透水地表面积呈现高速增长的态势,京津冀、珠三角与长三角三大城市群以及西部地区属于快速增长的区域。8 年间,我国七大流域地表水环境均不同程度地受到不透水地表增长的潜在影响,而且不透水地表面积比例大于 10%的子流域面积显著增加,集中分布在海河、长江、珠江三大流域。到 2008 年我国国土流域面积的 14.42%不同程度地受到不透水地表分布的影响。

关键词

人工建设用地
城市增长
不透水地表
遥感

城市生态与全球变化^[1-3]、城市化与全球环境变化^[4,5]、城市化与全球气候变化^[6,7]正成为 21 世纪科学界、政治界以及社会公众关注的焦点问题。人工建设用地扩张作为人类活动导致土地利用/覆盖变化的主要形式——自然覆盖状态向人工建设用地转换,对局地、区域乃至全球尺度的生物地球化学循环、水文过程、气候变化以及生物多样性产生深远影响^[1-4]。全球环境变化视角下的城市生态学、城市环境学正成为新兴的研究领域。

21 世纪全球城市人口快速增长,2008 年世界城市人口超过 50%,特别是亚州与非州等地区的发展中国家正经历更快的发展速度^[8,9]。21 世纪以来,中国城市人口以年均 1.2%的速度增长,2008 年中国城市化比率达到 45.68%^[10]。期间受到“西部大开发”等国家层面国土开发战略、国际大都市(都市圈)等区域开发策略、重大建设工程实施等一系列因素的影响,加之中国经济快速增长,导致中国人工建设用地快速扩张,由此也引起了科学家的关注与担忧,认为中

引用格式: 匡文慧, 刘纪远, 张增祥, 等. 21 世纪初中国人工建设不透水地表遥感监测与时空分析. 科学通报, 2013, 58: 465-478

英文版见: Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, et al. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5568-2

国 21 世纪正经历“冒进式增长”或“大跃进”等城市化现象^[11,12]。中国的快速城市化过程带来的严重的生态环境问题受到科学家的广泛关注^[13,14]。

人工建设不透水地表(impermeable surface areas, ISA)作为刻画与评价不同时空尺度自然生态系统向人工生态系统转换带来的生态环境以及气候效应的重要指标,在城市化与全球环境变化、全球城市生态科学研究中具有重要的理论与现实意义^[1-4,6,15,16]。前人在定量评估城市扩张、生态效应、流域环境污染以及气候影响方面取得重要研究进展^[6,15-25]。Ridd^[19]构建了基于遥感信息的 V-I-S (vegetation-impermeable surface-soil)模型,将城市土地覆盖分植被、不透水地表与裸土,广泛应用于不透水地表遥感分类。美国地质调查局(USGS)应用 Landsat TM 遥感影像建立了 2001 与 2006 年国家尺度高分辨率不透水地表数据集^[20,21],成为国家土地覆盖数据库的重要组成部分;美国环境保护局(EPA)集成全球气候影响评估方案预测未来美国不透水地表增长情景以及对地表水环境影响时空格局^[6];美国国家海洋和大气管理局(NOAA)基于夜间灯光指数(DMSP-OLS)发展了全球 1 km 建设用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,美国、欧洲、日本、中国和印度由于不透水地表面积增长造成地表水环境受到不同程度的影响^[16],该数据集主要反映城市外在边界,无法刻画城市内部不同地表覆盖特征,难以满足国家、区域或局地尺度的应用需求。

21 世纪在中国快速的城市化背景下,其国家尺度人工建设用地增长的范围、幅度、机制以及造成的生态、气候、环境等方面的影响,正成为科学家关注的焦点问题^[26-30]。在国家资源环境遥感时空信息平台支持下继续开展 21 世纪中国土地利用/覆盖变化动态监测^[29,30],基于高分辨率遥感信息人机交互数字化解译的人工建设用地边界信息具有较高的精度。但是,人工建设用地主要反映的是城乡以及工矿的建成用地^[30],而无法区分其内部不透水地表、生态用地、裸地等覆盖类型。因此,量化评价与分析城市化过程对生态、环境以及气候产生的影响受到一定的限制。不透水地表指标的介入有助于定量城市内部产业、生态等各功能用地结构,对于城市生态管理与规划具有重要意义。中国尚待开展国家尺度的人工建设不透水地表遥感制图,为城市化以及土地利用/覆盖变化对区域生态、环境以及气候系统模拟与评估

提供前提研究基础。

21 世纪我国快速城市化导致的人工建设用地、不透水地表增长的时空分布格局如何?本研究针对上述问题在国家尺度引入不透水地表指标定量评估我国 21 世纪初 8 年(2000~2008 年)人工建设用地增长时空特征,可以为我国城市/区域发展战略规划以及决策提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 数据源与信息获取

数据源包括 2000 与 2008 年中国土地利用/覆盖现状以及动态信息^[29,30],嵌入 LUCC 信息的 MODIS NDVI 与夜间灯光指数(DMSP-OLS)获得的不透水地表信息,中国子流域和行政界线数据。中国 LUCC 数据源中,2000 年应用 Landsat TM 高分辨率遥感影像,2008 年应用 Landsat TM 与中巴地球资源二号卫星(CBERS-2)的 CCD 图像,经过高精度纠正等预处理后,通过全数字人机交互解译方法,建立 1:10 万比例尺中国土地利用/覆盖现状以及动态数据集^[29,30]。中国子流域数据来源于 USGS 1 km DEM 信息提取的流域界线(http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30/hydro/asia),中国一级、二级流域数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,行政界线来源于国家基础地理信息数据库。对于流域信息与国家一级、二级流域信息进一步整合修改,产生高精度的流域边界数据。

人工建设用地是指反映人类高强度土地利用活动中建造建筑物、构筑物的土地,在遥感制图分类中包括城市、农村与独立工矿用地(独立工矿用地去除坑塘等水域部分)^[29-31];城市用地指大、中、小城市及县镇以上建成用地,包括城市产业用地(住宅、商业、工业等),交通、广场等设施用地,水域与绿地等生态用地^[32];不透水地表是指受人为土地利用活动影响产生的不可渗透的地表特征,包括房屋屋顶、沥青水泥道路、停车场等^[23-25]。不透水地表空间信息获取算法来源于居民地指数(human settlement index, HSI),指单位空间网格内满足人类生产、生活等土地利用行为构筑的房屋建筑、道路广场等用地比例,主要通过夜间灯光指数(DMSP-OLS)与植被指数(NDVI)计算获取^[22]。中国人工建设不透水地表信息提取应用 2000 年、2008 年 4~9 月 MODIS NDVI 最

大值和相应年份 DMSP-OLS 建立的居民地指数与 2 期中国人工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:

$$ISA_{index} = HSI \cap ACIS_{mask}, \quad (1)$$

式中, ISA_{index} 为不透水地表指数计算结果(%), 是 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 空间分辨率网格内不透水成分比例数据(1%~100%); $ACIS_{mask}$ 为 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 空间分辨率人工建设用地掩码; HSI 为基于遥感反演的居民地指数(%).

1.2 精度评价

人工建设用地以及不透水地表精度评价应用的高分辨率图像包括 2008 年北京市航空像片(分辨率 0.2 m), 长春市 Quickbird 图像(分辨率 0.61 m), 以及覆盖海岸带地区的天津市、上海市、河北省、广东省、山东省、福建省、辽宁省、广东省 2007~2008 年 ALOS, SPOT5 影像(彩色和全色波段合成分辨率均为 2.5 m); 中西部部分地区验证数据来源于 Google Earth 获取的 2008 年 Quickbird 图像(重采样后分辨率 2.5 m). 在 GIS 的支持下根据建立的中国 1:10 万以及覆盖中国 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 空间网格生成城市基础地理空间定位系统. 高分辨率遥感图像进行精纠正生成具有统一坐标系的数据基础^[32].

人工建设用地空间数据精度验证, 应用 2008 年秋季(北方)至 2009 年春季(南方)在全国开展的 2 次野外考察, 实地调查了除台湾以外各省(直辖市、自治区)人工建设用地增长的基本状况和变化特点, 获取了大量的外业调查记录、照片、视频第一手资料, 有效地支持人工建设用地遥感监测制图. 通过对野外调查资料与外业实地记录, 按照 10% 的县数比例随机抽取进行精度验证. 结果表明, 土地利用/覆盖类型综合评价精度达到 95% 以上, 其中城乡居民地和交通建设用地人工解译精度达 98%^[29,30].

选择具有不透水地表分布区域采取随机采样方法, 针对局部特大城市采取加密, 在全国范围内采样 676 个样点. 为减少影像配准误差产生的影响, 对每个采样点采取 $3 \times 3 (750\text{ m} \times 750\text{ m})$ 像元窗口应用精纠正的高分辨率图像人工数字化解译方式提取不透水地表信息, 将其面积比例与遥感反演获取信息对应结果进行比较. 同时也对北京、天津、哈尔滨、呼和浩特城市内采样点进行地面的实地调查工作, 对解

译结果进行校正与验证. 不透水地表信息的精度评价采用相关系数和平均相对误差 2 个指标来检验^[25], 具体见公式(2)与公式(3):

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n (|x_i - y_i|/y_i)}{n}, \quad (3)$$

式中, R , MRE 分别为相关系数和平均相对误差; x_i , y_i 分别为 3×3 像元遥感反演与地面采样高分辨率遥感解译获取不透水地表信息面积比例(%); n 为样本个数; \bar{x} , \bar{y} 分别为遥感反演与地面采样不透水地表面积统计平均值(%).

由高分辨率遥感交互解译获取的中国土地利用/覆盖现状以及动态信息对于反映人工建设用地与城市用地边界特征具有较高的精度与可靠性, 但是对与生态/气候影响密切相关的内部结构无法反映. MODIS NDVI 与 DMSP-OLS 直接获得的 HSI 信息可以快速实现人工建设与城市不透水地表的遥感定量提取, 二者取交集不仅可以提高信息提取的精度, 而且可以实现人工建设用地与城市用地内部不透水地表面积比例的探测. 分析表明, 精纠正的高分辨率图像与遥感反演获取信息相关系数为 0.921, 平均相对误差为 0.64%. 由于嵌入人机交互判读的城乡 LUCC 信息, 城乡用地边界信息精度达到 98%, 不透水地表面积比例误差幅度基本控制在 20% 以内(图 1), 满足国家尺度不透水地表评估精度要求.

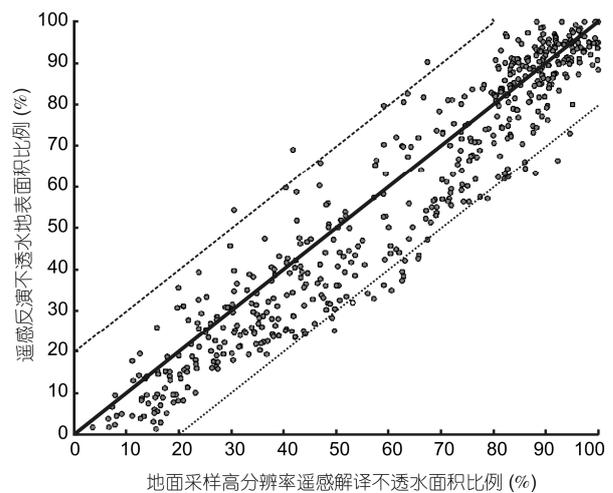


图 1 遥感估算与地面验证不透水比例分布关系图

1.3 空间分析方法

人工建设用地、城市用地以及不透水地表增长区域差异分析应用土地利用动态度模型^[30],

$$S = \left\{ \sum_{ij}^n (\Delta S_{i-j} / S_i) \right\} \times (1/t) \times 100\%, \quad (4)$$

式中, S_i 是监测开始时期人工建设用地、城市用地与不透水地表总面积(km^2); ΔS_{i-j} 是由监测开始至监测结束时段内从 i 类型用地转换到人工建设用地、城市用地与不透水地表增长面积(km^2); t 为时间段(年); S 为人工建设用地、城市用地与不透水地表增长动态度(%).

不透水地表信息遥感调查以及生态环境影响观测实验研究,发现流域内不透水地表面积比例与生态系统潜在健康状况存在显著的相关性^[15,16,33-36]. Bierwagen 等人^[6]评价未来城市不透水地表增长对流域水生态系统健康以及水环境的潜在状况影响.不透水地表面积增加将加速地表径流,将污染物直接以径流的形式带入河流,对河流水生态系统造成严重影响,加剧流域水生态系统的脆弱性.当流域内不透水地表面积比例 $<1\%$,对流域水生态系统无影响;当流域内不透水地表面积比例为 $1\% \sim 5\%$,造成轻微影响;当不透水地表面积比例为 $5\% \sim 10\%$,造成中度影响;当不透水地表面积比例为 $10\% \sim 25\%$,造成重度影响;当流域不透水地表面积比例 $>25\%$,将产生严重影响^[6].

子流域不透水地表指数模型公式如下:

$$\text{WIS}(\beta)_{\text{index}} = \left(\sum_{n=1}^{m_\beta} P_{\beta,n} \times A_{\beta,n} \right) / S_\beta \times 100\%, \quad (5)$$

式中, $\text{WIS}(\beta)_{\text{index}}$ 为第 β 个子流域内不透水地表指数(%); $P_{\beta,n}, A_{\beta,n}$ 为子流域第 n 个单元网格不透水地表比例(%)与像元面积(km^2); m_β 为第 β 个子流域像元总数; S_β 为第 β 个子流域总面积(km^2).

流域内不透水面积比例不同阈值等级对流域生态系统健康状况产生的潜在影响具体公式如下^[6,15,16]:

$$\text{WIS}(\beta)_{\text{index}} \in \begin{cases} 0 \sim 1\% & \text{无影响,} \\ 1\% \sim 5\% & \text{轻度影响,} \\ 5\% \sim 10\% & \text{中度影响,} \\ 10\% \sim 25\% & \text{重度影响,} \\ 25\% \sim 100\% & \text{严重影响.} \end{cases} \quad (6)$$

2 结果分析

2.1 中国人工建设用地增长时空特征分析

基于2000与2008年中国人工建设用地现状以及动态信息,分析人工建设用地与城市增长时空特征.由表1可知,2000~2008年中国人工建设用地增加总面积27746.39 km^2 ,增加面积为2000年人工建设用地面积的16%,其中城市用地增长面积14305.74 km^2 ,是2000年城市用地面积的43.46%,占人工建设用地增长总面积约1/2.分析可知,21世纪初8年间中国经历了快速的人工建设用地与城市用地增长过程,分别以3468.30, 1788.22 km^2/a 的速度增长.中国进入21世纪以来,随着快速的城市化、工业化过程,人工建设用地与城市土地面积快速扩张,加速了我国自然或半自然用地向人工建筑用地的转换.

人工建设用地增长存在显著的区域差异特征(图2).结合表1可知,广东与山东增长面积最大,均超过3000 km^2 ;增长面积超过2000 km^2 的省份为江苏与浙江;河北、安徽、福建、河南增长面积均大于1000 km^2 ;西藏、贵州等地区增长面积不足100 km^2 .增长动态度超过10%的省(直辖市)有2个,分别是福建和重庆;动态度超过5%的省(直辖市)为长三角城市群浙江、上海与珠三角城市群广东;京津冀城市群2个主要城市北京和天津的人工建设用地增长动态度均超过3%;20世纪末期我国实施西部大开发战略,西部地区人工建设用地增长速度相对较快,青海、宁夏人工建设用地扩张动态度超过了4%,四川、西藏动态度高于3%.我国的中部地区(湖北、湖南、山东等)动态度为1%~3%,处于相对中等级别人工建设用地增长速度.东北、华北地区(吉林、辽宁、黑龙江、内蒙古等)人工建设用地增长动态度普遍小于1%,增长速度相对缓慢.分析可知,21世纪初8年人工建设用地增长总体分布格局是京津冀、长三角、珠三角三大城市群增长速度相对较快,相对而言,长三角城市群增长速度最快(图2).其次为西部主要省份.中部地区人工建设用地增长速度相对较慢,增长速度最慢的为传统老工业基地东北地区.

城市用地扩张作为人工建设用地主要的增长类型,期间广东省城市增长面积最大,超过2000 km^2 ,其次为山东、浙江、江苏,增长面积超过1000 km^2 ,海南、贵州、西藏、甘肃、青海等地增长面积均不足100 km^2 .由中国城市增长动态度分析来看,其8年

表1 中国人工建设用地面积变化以及动态度

行政区	人工建设用地面积变化		城市用地面积变化	
	2000~2008 年增长(km ²)	动态度(%)	2000~2008 年增长(km ²)	动态度(%)
北京	567.19	3.15	387.36	4.68
天津	498.80	3.42	315.53	7.11
河北	1354.35	1.25	637.40	4.14
山西	615.43	1.81	242.10	3.07
内蒙古	650.09	0.72	193.71	2.09
辽宁	514.28	0.73	240.69	1.92
吉林	243.90	0.46	205.70	2.52
黑龙江	267.87	0.38	101.02	0.92
上海	784.97	6.83	221.40	3.56
江苏	2741.34	2.35	1268.79	5.60
浙江	2718.57	9.84	1311.26	14.31
安徽	1058.61	1.14	583.09	7.17
福建	1941.86	10.59	633.77	12.39
江西	651.66	2.85	339.88	7.27
山东	3147.46	2.01	1852.73	7.46
河南	1006.67	0.72	843.27	4.87
湖北	655.39	1.59	303.06	3.27
湖南	626.79	2.70	271.44	3.55
广东	3283.07	5.01	2428.37	12.49
广西	266.07	0.75	186.76	2.85
海南	101.70	1.69	68.36	5.48
重庆	495.74	10.16	307.22	11.70
四川	784.47	3.28	415.67	5.74
贵州	83.82	1.74	40.46	2.01
云南	316.87	1.94	175.63	4.20
西藏	32.63	3.16	22.92	5.42
陕西	468.61	1.86	164.61	3.73
甘肃	291.55	1.02	94.22	2.90
青海	383.89	4.76	22.48	2.17
宁夏	322.71	3.96	127.74	11.68
新疆	641.00	1.83	181.06	2.20
台湾	222.26	1.64	112.31	1.29
香港	6.77	0.55	5.73	0.60
全国	27746.39	2.00	14305.74	5.43

间增长最为迅速的是浙江、福建、广东、重庆和宁夏,这5个地区的生长动态度均超过了10%,其中前三者是沿海省份,主要受到外向型经济发展的影响,城市增长速度较快,重庆、宁夏受到西部大开发战略城市固定资产投资增长的影响。城市增长动态度超过5%的有海岸沿线的天津、山东和海南,中部省份有江苏、安徽、江西以及西部地区四川、西藏共计8个省(自治区、直辖市)。京津冀城市群的北京、河北,华北地区的山西,长三角城市群的上海,华中地区的湖南、湖

北以及西部地区的陕西,城市生长的动态度为3%~5%。内蒙古自治区与东北三省,西部地区青海、新疆等省(自治区、直辖市)城市生长的速度最慢,动态度均小于2%。由此可知,21世纪以来在中国快速的城市化、工业化带动下,城市用地外延式高速增长。从全国总体分布特征来看,呈现华南、东南沿海、西部、华北、华中、东北城市增长速度逐渐递减的态势。长三角城市群城市增长速度最快,其次为珠三角。但是,北京与上海分别作为京津冀城市群与长三角地区城市群

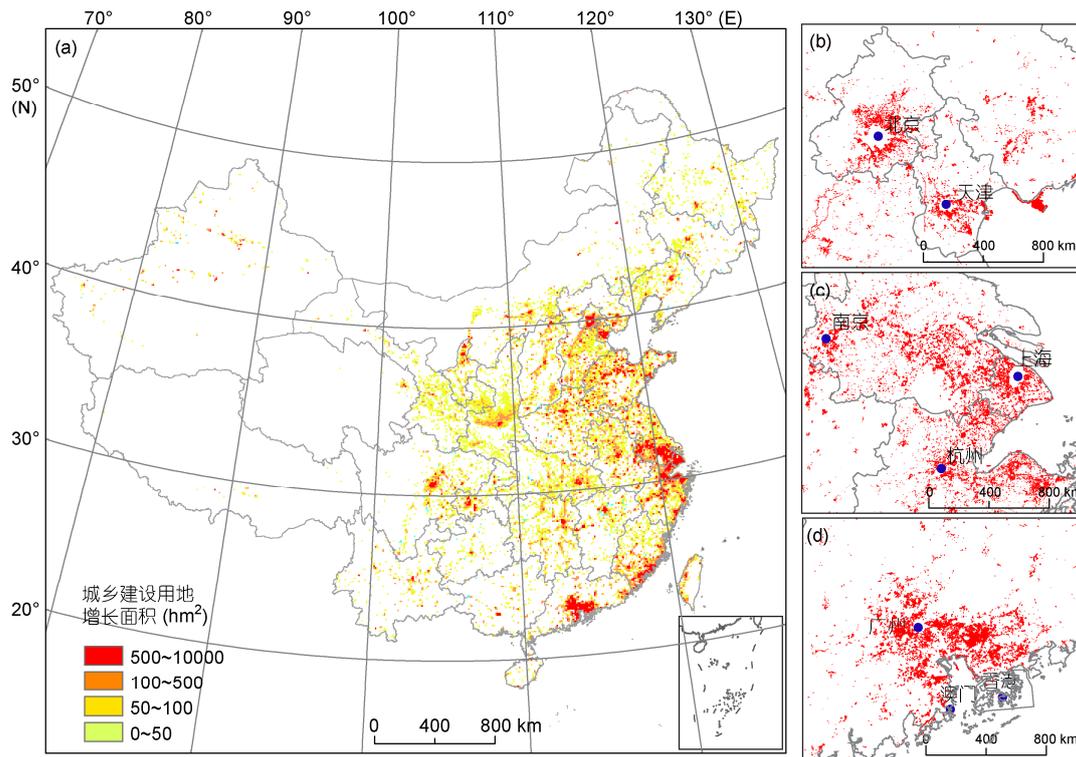


图2 21世纪初8年人工建设用地增长格局

(a) 中国 10 km×10 km 栅格内人工建设用地增长面积; (b) 京津冀城市群人工建设用地增长矢量图; (c) 长三角城市群人工建设用地增长矢量图; (d) 珠三角城市群人工建设用地增长矢量图

首位城市,受资源环境约束与产业向周边转移的影响,增长速度相对放缓. 21世纪初我国城市增长格局与我国国土开发战略、宏观政策导向、沿海区位优势等因素密切相关.

2.2 中国不透水地表增长格局以及时空特征分析

基于 2000 与 2008 年不透水地表空间信息分析(图 3), 中国 21 世纪初 8 年间不透水地表面积增长了 17697.88 km², 其中城市不透水地表面积增长 10790.80 km², 占不透水地表面积增长的 60.97%(表 2). 从增长速度来看, 不透水地表以 2212.24 km²/a 的速度增长, 其中城市不透水地表以 1348.85 km²/a 的速度增长. 从增长比例来看, 21 世纪初 8 年间中国人工建设不透水地表与城市不透水地表面积分别占 2000 年不透水地表与城市不透水地表面积 的 28.02% 和 53.30%. 从 2000~2008 年, 中国不透水地表面积占人工建设用地的平均比率从 36.42% 增长到 41.08%. 城市不透水地表面积占城市用地平均比率从 61.50% 增长到 65.91%. 由此可见, 城市建成区不透水地表

密度远远高于由农村居民地以及交通独立工矿用地组成的人工建设用地. 从全国范围总体情况来看, 人工建设用地与城市用地的人工硬化地表建筑密度略有升高. 特别是城市内部的建筑屋顶、道路路面、硬化广场等不透水地表面积比例增加, 反而绿地、水域等生态用地以及被包围的裸土、农田等比例下降. 21 世纪初 8 年间, 随着城市化、工业化进程加快, 不仅不透水地表面积高速增长, 而且城市内部人工硬化建筑地表的密度也呈现增加的态势.

不透水地表增长的整体空间特征与人工建设用地增长的态势基本相似. 期间广东、江苏、浙江、山东人工建设不透水地表增长面积均超过 1000 km², 广东省 8 年间不透水地表面积增加了 1940.98 km², 仅次于长三角区域内的江苏省(增长面积 1980.10 km²). 河北、上海、安徽、福建、河南、四川、新疆地区人工建设不透水地表增长面积超过 500 km², 陕西、甘肃、宁夏等增加面积基本上保持在 200 km² 左右. 从增长的动态来看, 不透水地表增长速度最快的是浙江与福建, 增长动态均超过了 10%. 从增长的面

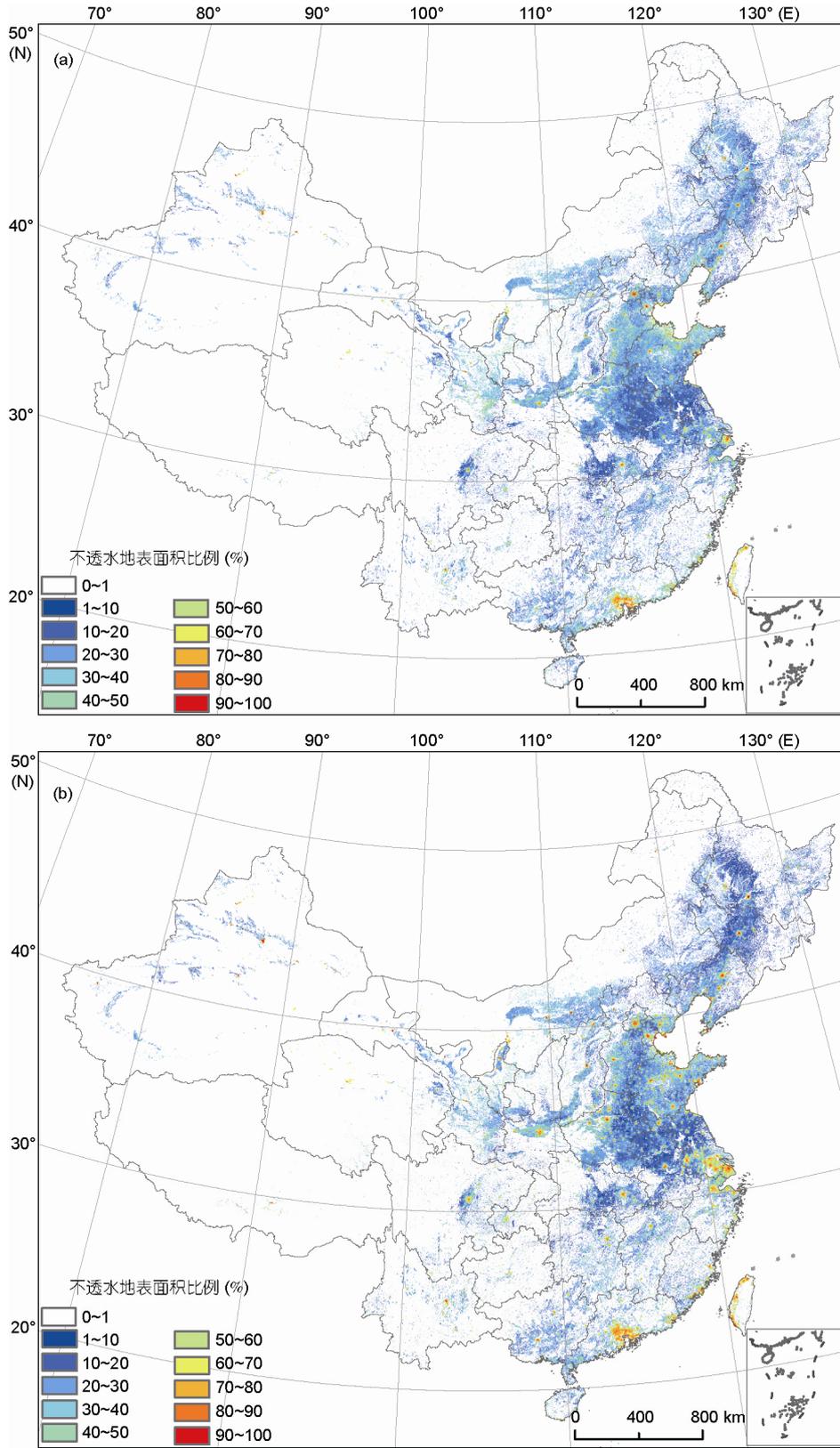


图3 中国不透水地表空间分布图
(a) 2000年; (b) 2008年

表2 中国不透水地表增长面积与动态度

行政区	不透水地表变化		城市不透水地表变化		
	2000~2008年 增长(km ²)	动态度(%)	2000~2008年 增长(km ²)	2008年不透水地表 面积比例(%)	动态度(%)
北京	332.84	3.33	213.25	72.60	3.25
天津	315.91	4.18	189.27	74.01	5.34
河北	767.03	1.79	481.62	67.09	4.87
山西	457.56	3.43	260.22	74.45	4.97
内蒙古	470.61	1.56	262.58	71.37	4.66
辽宁	396.82	1.41	241.28	72.40	2.83
吉林	194.29	1.17	171.03	67.80	3.24
黑龙江	220.34	0.91	159.35	71.00	2.26
上海	525.00	7.23	207.62	79.52	4.43
江苏	1980.10	5.41	1210.41	65.73	10.19
浙江	1536.23	13.67	851.80	61.05	16.63
安徽	668.28	3.04	484.18	62.23	11.85
福建	982.00	11.21	371.86	60.96	11.84
江西	414.73	5.88	269.73	58.49	12.44
山东	1830.10	3.01	1187.67	63.58	7.62
河南	921.38	2.24	755.92	65.86	7.72
湖北	363.56	3.00	242.52	57.09	5.12
湖南	398.04	5.51	264.54	56.40	7.73
广东	1940.98	5.44	1210.03	62.18	8.50
广西	248.86	2.16	194.51	63.53	5.47
海南	70.48	2.96	47.34	64.70	6.15
重庆	204.31	9.77	138.79	49.25	9.96
四川	505.89	6.55	358.91	61.19	9.99
贵州	72.27	3.70	47.34	59.66	4.66
云南	205.21	3.12	136.68	66.99	5.16
西藏	32.61	6.29	25.59	79.99	9.13
陕西	235.55	2.54	151.55	66.96	5.78
甘肃	177.54	1.64	107.38	78.53	4.70
青海	263.25	7.51	24.56	71.91	3.61
宁夏	217.57	6.69	118.57	82.40	14.93
新疆	533.90	3.75	247.69	78.52	4.40
台湾	214.65	2.37	156.99	77.22	2.56
香港	2.88	0.32	2.88	74.20	0.40
全国	17697.88	3.50	10790.80	65.91	6.66

积来看,珠三角、长三角、京津冀城市群同为我国社会经济发展的三大增长极,不透水地表面积增长较快(图4)。由于西部大开发战略的实施,西部部分地区不透水地表增速明显,重庆、西藏、宁夏、四川等省(自治区、直辖市)保持较高的动态度(6%~10%),增幅最大的是新疆,增加面积达到533.90 km²。我国的东部地区不透水地表面积增长速度相对较慢。

城市不透水地表增长存在显著的区域差异,由

表2分析可知,江苏、山东、广东城市不透水地表面积均超过1000 km²,城市不透水地表增长面积介于500~1000 km²的有2个省份,为浙江与河南,海南、贵州、西藏、青海、香港地区城市不透水地表增长面积分别不到100 km²。21世纪初8年间城市不透水地表增长速度最快的是我国的浙江、江苏、福建沿海省份,中部的江西、安徽以及西部宁夏,城市不透水地表增长的动态度均大于10%。其次为西部地区四川、西

藏、重庆,城市不透水地表增长的动态度均为9%~10%。再次为中国中部的湖南、湖北、河南等省份。我国的黑龙江、吉林等东部地区城市不透水地表动态度相对较低。结合表2与图4可知,8年间城市不透水地表增长的总体趋势是,长三角、珠三角与京津冀城市群以及西部部分省份增长速度较快,其中长三角城市群增长的速度最快,其次为珠三角城市群。

受城市形成的自然地理基础、城市形态和城市规划等的影响,各省份城市不透水地表的覆盖比例差异较大。西部地区由于受到地形地貌的影响以及布局相对紧凑,不透水地表密度也相对较高。东南部多数城市依山傍水,建成区内受河流分割等的影响,不透水地表比例相对较低。分析可知,中国城市内部空间结构组成的基本规律为城市面积越大,不透水地表比例相对越高;低纬度城市(东南方城市)比高纬度城市(西北方城市)的不透水建筑密度要低。由图4发现,城市不透水地表主要沿着城市边缘增长。特大城市相对中小城市具有相对更高的不透水地表面积比例。

通过中国人工建设与城市不透水地表增长分析表明,21世纪初8年沿海省份以及传统的三大城市群

不透水面积增长较快,尤其是长三角城市群不透水地表增长速度最快。但是,三大城市群的首位城市,由于资源环境压力,城市的发展重心呈现由特大中心城市向周边城市转移,如北京、上海等城市总体增长的动态程度放缓,反而其周边城市不透水地表的生长速度大幅增加。受西部大开发战略的影响,西部主要城市的不透水地表增长动态度显著增加。人工建设不透水地表的快速增长在一定程度上增加我国沿海地区以及西部地区的生态环境脆弱性。我国东北与中部省份尽管期间受到东北老工业基地振兴以及中部崛起等国家国土开发战略的影响,但是,总体上不透水地表增长速度缓慢。

2.3 中国子流域不透水面积比例阈值等级分布特征分析

根据中国流域单元划分包括长江、黄河、珠江、淮河、辽河、海河、松花江7个一级流域和西南、西北、东南诸河3个内陆河,全国共计79个二级流域以及2768个子流域。基于2000与2008年不透水地表空间信息与中国子流域界线叠置分析(图5),并结

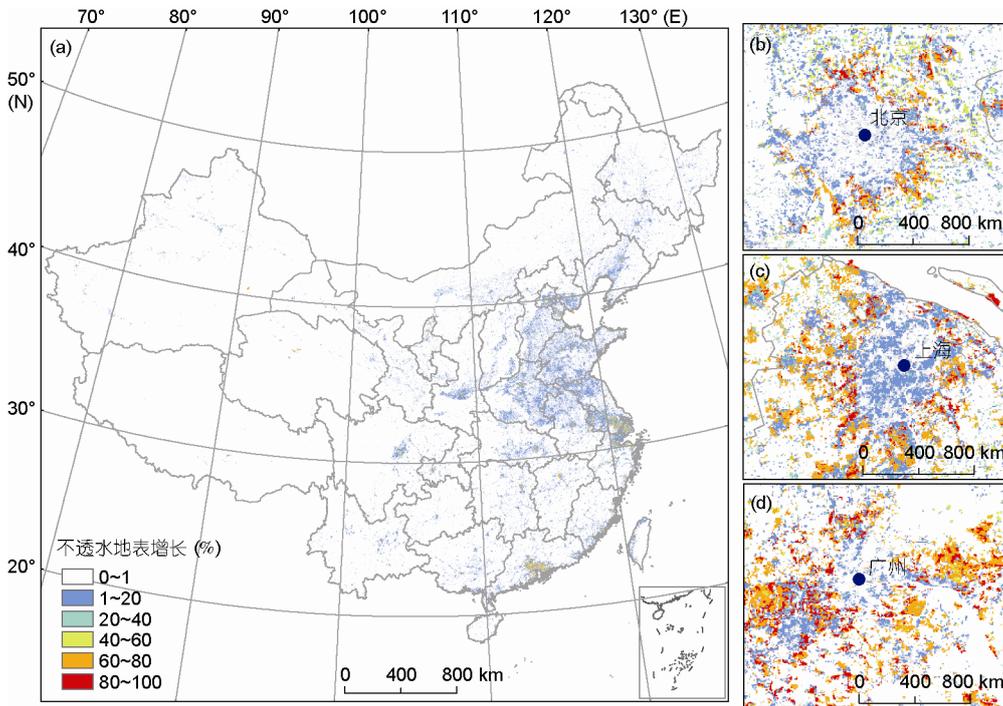


图4 21世纪初8年不透水地表增长格局

(a) 中国 1 km×1 km 栅格内不透水地表增长比例; (b) 北京 500 m×500 m 栅格内不透水地表增长比例; (c) 上海 250 m×250 m 栅格内不透水地表增长比例; (d) 广州 250 m×250 m 栅格内不透水地表增长比例

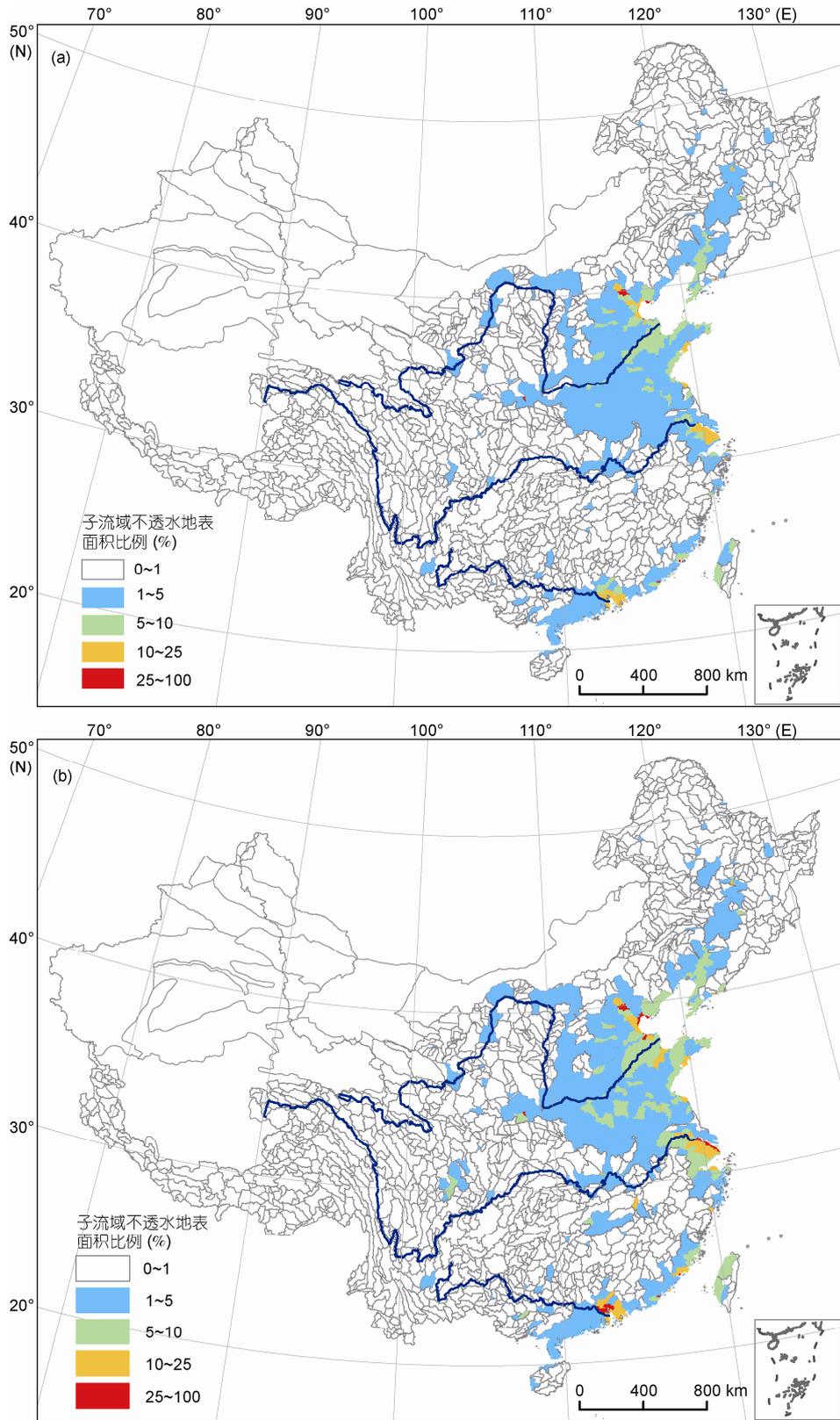


图5 中国各等级不透水地表子流域空间分布图

(a) 2000年; (b) 2008年

合表 3 分析可知, 2000 年中国不透水地表面积比例高于 1% 的子流域总面积为 $117.96 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占国土总面积的 12.43%。其中, 不透水地表面积比例为 1%~5% 与 5%~25% 的子流域面积分别占到国土总面积的 10.55% 与 1.85%; 不透水地表面积比例大于 25% 子流域面积为 2845 km^2 , 占国土总面积的 0.03%, 主要分布在海河流域。期间中国不透水地表面积比例高于 1% 的流域增长了 $18.83 \times 10^4 \text{ km}^2$, 到 2008 年占国土总面积的 14.42%, 其中不透水地表面积比例大于 25% 的子流域面积增长了 7409.58 km^2 , 与 2000 年相比增加了 2.6 倍, 主要集中于海河流域、长江和珠江流域。由图 5 可以发现, 子流域不透水地表面积比例大于 25% (高密度分布区) 以及 8 年间不透水地表面积集中增长的子流域主要分布在我国沿海人口相对密集、耕作条件较好的农区。

除西南与西北诸河外, 8 年间受不透水地表快速增长的影响, 中国其他流域呈现子流域不透水面积比例等级不同程度加重的态势, 集中分布在淮河、海河、黄河、长江与珠江五大流域(图 6)。8 年间导致部分子流域不透水地表面积比例加重 2 个等级, 主要包括从子流域不透水面积比例 0~1% 到 5%~10%, 从 1%~5% 到 10%~25% 或 5%~10% 到 25%~100%, 共有 65 个子流域, 约 $19.79 \times 10^4 \text{ km}^2$; 子流域不透水地表面积比例加重 1 个等级, 如从 10%~25% 到 25%~100%, 共有 79 个子流域, 约 $17.30 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。由此可见, 21 世纪以来随着中国快速的城市化、工业化, 人工建设用地的高速增长, 我国七大流域均受到人工建设不

透水地表分布带来的压力与影响, 其中海河、淮河、长江、黄河以及珠江流域最为严重。8 年间出现子流域不透水地表面积比例大于 25% 阈值等级的流域由 1 个增长到 3 个, 其中长江流域与珠江流域增长最快。我国沿海三大城市群——长三角、珠三角以及京津冀城市群是人工建设不透水地表增长最快的区域, 也是子流域不透水地表高密度集中分布的区域。

3 问题与讨论

应用国家资源环境遥感时空信息平台更新的中国 21 世纪初 LUCC 数据与 1990 年代每 5 年动态更新数据比较分析, 10 年间中国城市扩展了 $82 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[37,38]。但 21 世纪初 8 年间城市用地增长了 $143 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。21 世纪初城市增长速度是 20 世纪末的 2.18 倍。本文遥感监测的 21 世纪初 8 年与王雷等人^[28]研究 2000~2010 年城市用地年均增长速度基本一致。伴随着中国快速的城市扩张, 城市不透水地表以 $1348.85 \text{ km}^2/\text{a}$ 的速度增长, 2008 年中国不透水地表面积占国土总面积的 0.86%。由此可以推断, 21 世纪初 8 年城市扩张的速度是自改革开放以来最快的, 也是我国历史上史无前例的。我国的 20 世纪 90 年代前 5 年曾因“开发区热”与“房地产热”以及大量外来投资的引入出现了大规模的人工建设用地扩张占用农田, 政府及时发现这一势头, 紧急实施严格的基本农田保护制度以及土地法规的修订, 20 世纪 90 年代后 5 年人工建设用地扩张的速度明显减缓^[38]。21 世纪以来, 我国在新一轮的国土大开发驱动下, 人工建设用地进入最

表 3 中国各流域不透水地表各等级比例子流域面积

流域	2000 年子流域面积(km ²)				2008 年子流域面积(km ²)			
	1%~5%	5%~10%	10%~25%	25%~100%	1%~5%	5%~10%	10%~25%	25%~100%
长江流域	127662	8057	10397	2	149689	38128	17365	2292
黄河流域	167785	14458	0	325	204601	18734	582	325
珠江流域	104708	9252	8031	191	112651	3552	12274	3559
松花江流域	53479	1276	676	19	65315	1730	676	19
辽河流域	72403	21119	114	12	69934	27112	115	12
淮河流域	256082	46340	3357	15	221356	82562	9283	23
海河流域	159096	30067	8643	2168	152987	48165	10057	3901
西北诸河	15236	0	0	0	15592	0	0	0
西南诸河	1642	0	0	0	1642	0	0	0
东南诸河	43084	13846	20	113	57832	30484	5277	125
总计	1001177	144415	31238	2845	1051599	250467	55629	10256

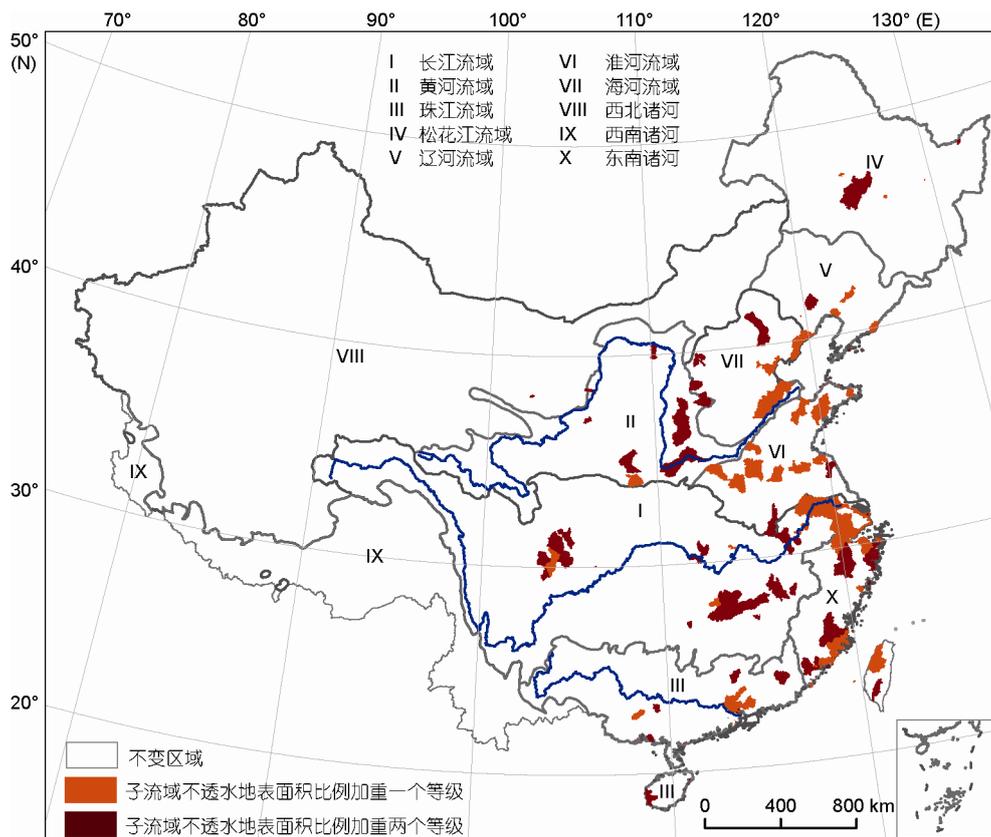


图 6 中国 21 世纪初 8 年子流域不透水地表面积阈值等级加重分布图

快的增长速度，“十二五”期间是否继续保持这一速度，国家应该在宏观层面制定科学政策，采取切实措施，保持包容性的适度增长，防止步入城市化的误区^[11,12]。

根据美国环境保护局评价标准^[6]，进一步开展中国不透水地表空间分布对流域地表水生态系统健康状况的潜在影响评估。2000 年受不透水地表轻度影响(不透水比例高于1%)的子流域总面积为 $117.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，占国土总面积的 12.43%。不透水地表面积比例大于 25%，将对流域地表水生态系统健康状况产生严重的影响，8 年间严重影响的子流域面积增长了 2.6 倍，主要集中于海河、长江和珠江流域。根据评估，尽管到 2008 年不透水地表空间分布对流域水生态系统健康状况产生潜在影响的面积仅占中国国土总面积的 14.42%，但是这一不到 15% 的比例对地表水生态系统健康状况的潜在影响不容忽视。由于这些区域集中分布在我国人口密集、人居环境适宜程度高的地区，主要位于黄淮海平原以及沿海地区，是我国的优质农田集中分布与重点产粮区。我国水环

境监测网络结果表明，海河、淮河等流域监测断面水污染严重，受人工建设与工业化影响程度较重^[39,40]。根据《2009 年中国海洋环境质量公报》长江口、珠江口等和部分大中城市近岸局部水域受到严重污染 (<http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2011/3/245327.shtm>)。由此可见，21 世纪初 8 年不透水地表快速增长加剧了我国主要流域，特别是沿海地区生态系统健康状况的潜在危险性。

低海岸区(low elevation coastal zones, LECZ)作为全球气候变化的敏感区域，受到国际社会的广泛关注^[7]。伴随着 21 世纪以来我国海岸带沿线不透水地表面积的高速增长，城市人口与建筑重心正快速向海岸带移动，意味着有更多的人口与城市建筑分布向 LECZ 集中，加之全球气候变化大背景下海岸带洪水、飓风、海啸等极端事件的加剧，我国海岸带人口密集区正面临着气候变化带来的巨大的威胁，这种现象正呈现日益增长的态势。中国海岸带城市快速增长正面临着全球气候变化严峻的挑战，20 世纪中国 LECZ 的城市人口增长超过了全国增长率的 3

倍^[7]。因此,低海岸区城市建设中应充分考虑自然灾害等气候变化适应性规划,加强其对极端气候的预警与应急能力,减少城市发展与人口增长带来的风险性。

本研究从国家尺度对我国 21 世纪初 8 年间人工建设用地以及不透水地表增长的时空特征进行分析,进而探讨对流域地表水生态系统健康产生的潜在影响。有待于针对海河、珠江、长江等流域重点区域通过野外实测、机理模型等对城市不透水地表增长的生态环境效应进行深入的机理研究。进而在获取的不透水地表动态信息基础上,进一步借助于大尺度城市增长模拟模型(Reg-UGM)^[31,32]、城市面源污染模型^[41]、生态系统过程模型(DLEM)^[42]以及区域气候模式(RIEMS)^[43]模拟不透水地表增长导致的城市面源污染,生态系统碳、氮、水物质循环以及对于气候变化产生的影响,从而揭示国家尺度城市化过程-土地利用/覆盖变化-生态系统过程-气候变化-环境效应以及之间的交互机理,建成跨学科的服务于科学家、公众与政治决策的城市环境变化综合探测与模拟系统。

4 结论

中国 21 世纪以来受新一轮的国土开发政策、经济高速增长等因素驱动,人工建设用地以及不透水

地表快速增长,而且区域空间梯度差异显著。2000~2008 年间全国人工建设用地总体增长了 16%,城市以 1788.22 km²/a 的速度增长了 43.46%,京津冀、珠三角与长三角三大城市群以及西部地区成为人工建设用地增长最为集中的区域。不透水地表 8 年间以 2212.24 km²/a 的速度增长了 28.02%。城市不透水地表以 1348.85 km²/a 的速度增长了 53.30%,城市不透水地表占城市建成用地比率从 61.50%增长到 65.91%。城市不仅呈现大面积的外延性扩展,而且内部结构人工建筑地表密度也呈现升高的趋势。传统的三大城市群与西部地区不透水地表增长速度较快。但是,城市群首位城市,如北京、上海等特大城市,受到资源环境的约束以及工业企业向周边城市转移,其增长速度相对周边城市不透水地表增长速度有所放缓。

在中国 21 世纪初土地利用/覆盖发生巨大变化的前提下,伴随着人工建设不透水地表的高速增长,我国的 7 大流域不同程度地受到不透水地表增长对流域地表水生态系统健康状况的潜在影响增加。到 2008 年我国国土流域面积的 14.42%受到负面影响,其中,海河、长江与珠江流域三大流域在 21 世纪初 8 年间流域内子流域不透水地表面积比例等级呈现加重的态势,该 3 个流域由于人工建设不透水地表增长对流域生态系统的潜在影响加大。

致谢 感谢中国科学院东北地理与农业生态研究所张树文研究员,中国科学院新疆生态与地理研究所吴世新研究员,中国科学院成都山地灾害与环境研究所周万村研究员,中国科学院地理科学与资源研究所徐新良副研究员,中国科学院测量与地球物理研究所李仁东研究员,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所颜长珍研究员,中国科学院南京土壤研究所潘贤章研究员,中国科学院南京地理与湖泊研究所江南研究员。以及科研团队在中国土地利用/覆盖变化动态更新中付出的辛勤劳动。

参考文献

- 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 Alberti M. *Advances in Urban Ecology Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. New York: Springer, 2009. 61-65
- 3 Pickett S A, Cadenasso M L, Grove J M, et al. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *J Environ Manage*, 2011, 92: 331-362
- 4 Sánchez-Rodríguez R, Seto K C, Simon D. Science Plan Urbanization and Global Environment Change. IHDP Report No. 15. 2005
- 5 Parrish D D, Zhu T. Clean air for megacities. *Science*, 2009, 326: 674-675
- 6 Bierwagen B G, Theobald D T, Pyke C R, et al. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 10: 1073-1078
- 7 McGranahan G, Balk D, Anderson B. The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environ Urban*, 2007, 19: 17-37
- 8 Montgomery M R. The urban transformation of the developing world. *Science*, 2008, 319: 761-764

- 9 United Nations. World Urbanization Prospects: The 2009 Revision. New York: United Nations, 2008
- 10 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2009年). 北京: 中国统计出版社, 2009. 89-90
- 11 陆大道, 叶大年. 采取综合措施遏制冒进式城市化和空间失控趋势. 科学新闻, 2007, 8: 5-9
- 12 陆大道. 还没摆脱城市化冒进误区. 人民论坛, 2010, 7: 26
- 13 Richard S. Beijing's marathon run to clean foul air nears finish line. Science, 2008, 321: 636-637
- 14 Normile D. China's living laboratory in urbanization. Science, 2008, 319: 740-743
- 15 Arnold C L, Gibbons C J. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. J Am Plann Assoc, 1996, 2: 243-258
- 16 Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C, et al. Global distribution and density of constructed impervious surfaces. Sensor, 2007, 7: 1962-1979
- 17 Lu D S, Weng Q H. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. Int J Remote Sens, 2007, 28: 823-870
- 18 刘珍珠, 王仰麟, 彭建. 不透水表面遥感监测及其应用研究进展. 地理科学进展, 2010, 29: 1143-1152
- 19 Ridd M K. Exploring a V-I-S (Vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: Comparative anatomy for cities. Int J Remote Sens, 1995, 16: 2165-2185
- 20 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. Can J Remote Sens, 2003, 2: 230-240
- 21 Xian G, Homer C. Updating the 2001 National Land Cover Database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods. Remote Sens Environ, 2010, 114: 1676-1686
- 22 Lu D S, Tian H Q, Zhou G, et al. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multi-sensor remotely sensed data. Remote Sens Environ, 2008, 112: 3668-3679
- 23 Lu D S, Weng Q H. Extraction of urban impervious surfaces from an IKONOS image. Int J Remote Sens, 2009, 30: 1297-1311
- 24 Slonecker E T, Jennings D, Garofalo D. Remote sensing of impervious surface: A review. Remote Sens Rev, 2001, 20: 227-255
- 25 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: 388-400
- 26 Foley J A, DeFries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use. Science, 2005, 309: 570-574
- 27 王芳, 葛全胜. 根据卫星观测的城市用地变化估算中国 1980~2009 年城市热岛效应. 科学通报, 2012, 57: 951-958
- 28 王雷, 李丛丛, 应清, 等. 中国 1990~2010 城市扩张卫星遥感制图. 科学通报, 2012, 57: 1388-1399
- 29 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32: 1031-1043
- 30 Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, et al. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. J Geogr Sci, 2010, 20: 483-494
- 31 Kuang W H. Simulating dynamic urban expansion at regional scale in Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. J Geogr Sci, 2011, 21: 317-330
- 32 匡文慧. 城市土地利用时空信息数字重建、分析与模拟. 北京: 科学出版社, 2012. 43-45
- 33 Klein R D. Urbanization and stream quality impairment. Water Resour Bull, 1979, 15: 948-963
- 34 Griffin D M, Grizzard T J, Randall C W, et al. Analysis of non-point pollution export from small catchments. J Water Pollut Control Fed, 1980, 52: 780-90
- 35 Schueler T K. Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs. Washington: MFCOG, 1987. 1-10
- 36 Schueler T K. The importance of imperviousness. Wat Prot Tech, 1994, 1: 100-101
- 37 Tian G J, Liu J Y, Xie Y C, et al. Analysis of spatio-temporal dynamic pattern and driving forces of urban land in China in 1990s using TM images and GIS. Cities, 2005, 22: 400-410
- 38 Liu J Y, Zhan J Y, Deng X Z. Spatio-temporal patterns and driving forces of urban land expansion in China during the Economic Reform Era. AMBIO, 2005, 34: 444-449
- 39 孟伟, 苏一兵, 郑丙辉. 中国流域水污染现状与控制策略的探讨. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2: 242-246
- 40 尹澄清. 城市面源污染问题: 我国城市化进程的新挑战——“城市面源污染研究”专栏序言. 环境科学学报, 2006, 26: 1053-1056
- 41 叶闽, 杨国胜, 张万顺. 城市面源污染特性及污染负荷预测模型研究. 环境科学与技术, 2006, 29: 67-69
- 42 Tian H Q, Liu M L, Zhang C, et al. The dynamic land ecosystem model (DLEM) for simulating terrestrial processes and interactions in the context of multifactor global change. Acta Geogr Sci, 2010, 65: 1027-1047
- 43 Xiong Z, Fu C B, Zhang Q. On the ability of the regional climate model RIEMS to simulate the present climate over Asia. Adv Atmos Sci, 2006, 3: 784-791