



论文

GlobeLand30 遥感制图创新与大数据分析专题

亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析

匡文慧^{①*}, 陈利军^②, 刘纪远^①, XIANG WeiNing^{③④}, 迟文峰^①, LU DengSheng^{⑤⑥}, 杨天荣^{①⑧}, 潘涛^{⑦⑧}, 刘爱琳^{①⑧}

① 中国科学院地理科学与资源研究所陆地表层格局与模拟院重点实验室, 北京 100101;

② 国家基础地理信息中心, 北京 100830;

③ 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海 200241;

④ University of North Carolina at Charlotte, NC 28223, USA;

⑤ 浙江农林大学环境与资源学院, 杭州 311300;

⑥ Michigan State University, East Lansing 48823, USA;

⑦ 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;

⑧ 中国科学院大学环境与资源学院, 北京 100049

* E-mail: kuangwh@igsnrr.ac.cn

收稿日期: 2015-05-28; 接受日期: 2016-02-16; 网络版发表日期: 2016-08-25

国家高技术研究发展计划项目(编号: 2013AA122802)、国家自然科学基金项目(批准号: 41371408)和国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2014CB954302)资助

摘要 人造地表覆盖是刻画人类活动对陆地表层生态系统影响的重要因素, 具有高度动态、结构复杂和类型镶嵌等特征. 由于当前缺乏有效的洲际尺度人造地表覆盖精细化遥感探测方法和高精度的数据产品, 由此影响了城市化对区域气候、生态系统过程和全球环境变化影响评估的可靠性. 本研究构建了人造地表覆盖等级层次结构分类系统, 发展了基于 2010 年全球地表覆盖 30m 分辨率产品(GlobeLand30)的人造地表覆盖二级类型像元组分提取的技术方法, 研发了亚洲 2010 年高精度城市建成区及其内部城市不透水地表和植被覆盖组分比例数据产品. 基于多源数据融合和专家知识方法获取的城市建成区及其内部组分分类的总体精度为 90.79%; 城市内部不透水地表比例组分信息提取平均相对误差为 0.87, 总体上数据产品具有较高的质量和可靠性. 遥感精细化信息提取局部误差与不同气候带城市建筑与植被镶嵌程度密切相关. 遥感精细化分类表明, 亚洲城市建成区面积 181785.96km², 占亚洲陆表面积的 0.59%; 城市内部结构组分中, 城市不透水地表总面积为 116504.72km², 占亚洲城市建成区面积的 64.09%, 植被和裸土面积占 34.56%. 在空间上, 城市不透水地表自东向西呈现集聚式、分散式和无显著分布特征三级梯度. 中国、印度和日本等国家, 城市不透水地表总面积排在前三位, 分别占亚洲城市不透水地表面积的 32.77%、16.10%和 11.93%. 研究发现, 城市建成区内部不透水地表与植被覆盖组分比例与

中文引用格式: 匡文慧, 陈利军, 刘纪远, Xiang W N, 迟文峰, Lu D S, 杨天荣, 潘涛, 刘爱琳. 2016. 亚洲人造地表覆盖遥感精细化分类与分布特征分析. 中国科学: 地球科学, 46: 1162–1179, doi: 10.1360/N072015-00267

英文引用格式: Kuang W H, Chen L J, Liu J Y, Xiang W N, Chi W F, Lu D S, Yang T R, Pan T, Liu A L. 2016. Remote sensing-based artificial surface cover classification in Asia and spatial pattern analysis. Science China Earth Sciences, 59: 1720–1737, doi: 10.1007/s11430-016-5295-7

国家的经济发展程度及区域气候环境密切相关,对于经济较为发达的国家,城市建成区内部镶嵌类型中不透水地表比例相对较低,如韩国、新加坡城市不透水地表比例约为 50~60%,公共绿地植被面积比例相对较高,而对于经济发展水平较低的国家,城市建成区内部镶嵌类型中城市不透水地表比例则接近或超过 80%. 城市建成区内不透水地表、植被组分及空间分布特征集中反映了亚洲地区人口集聚和经济发展水平以及对流域健康状况影响程度.

关键词 人造地表覆盖, 城市, 不透水地表, 植被覆盖, 遥感分类, 亚洲

1 引言

人类活动行为对地球表层生态、环境及气候的影响程度不仅在局地 and 区域上呈现加剧态势,而且其空间范围具有全球性分布特征(Messerli等, 2000; 陆大道, 2014). “未来地球(Future Earth)”研究战略框架更加强调全球可持续研究,注重动态星球中地球、环境与社会系统趋势、驱动力、过程以及之间交互的观测、解释、理解和预测,其中挑战之一是通过城市环境改善和资源足迹消耗方式的改革创新塑造和构建健康、弹性、高效城市(www.futureearth.org). 土地利用/覆盖变化是表征人类行为活动对地球表层环境变化影响的最直接的信号,会以生物地球物理和生物地球化学方式,影响地表辐射能量平衡、生态系统碳收支以及陆表水循环(Sterling等, 2013; Boyse等, 2014). 城市不透水地表增加会影响局地 and 区域气候,加剧城市热岛,同时也会对流域水环境带来污染(Arnold和Gibbons, 1996; Grimmond, 2007; Grimm等, 2008; Zhao等, 2014; Bierwagen等, 2010; Kuang等, 2015a, 2015b).

城市土地利用/覆盖、城市建成区以及不透水地表是量测和评估城市发展程度和城市化水平的重要指标. Elvidge等(2007)报道应用夜间灯光指数(DMSP-OLS)发展了全球1km建设用地不透水地表数据,估测2000年全球不透水地表面积为579703km²,占世界陆表面积的0.43%. Schneider等(2009)应用2001~2002年MODIS 500m分辨率遥感数据提取城市空间范围,评估全球城市覆盖面积为65.7×10⁴km². 美国地质调查局(USGS)基于国家土地覆盖数据集(NLCD)应用Landsat TM数据研制了30m分辨率国家不透水地表数据集(Yang等, 2003; Xian和Homer, 2010). Kuang等(2013)基于中国土地利用/覆盖变化数

据集,应用MODIS NDVI和DMSP-OLS发展的人居用地指数监测了中国21世纪初8年城市扩张和不透水地表面积变化(Lu等, 2008; Kuang, 2012a; Kuang等, 2013). Landsat TM和HJ-1A/1B等中分辨率遥感图像主要应用于城市群或特定城市不透水地表面积的遥感监测.

城市土地面积究竟占陆地表层多大面积? 大量文献评估认为城市土地面积占全球陆表面积的1~3%(Liu等, 2014a). 各自研究评估的城市面积差异显著,究其原因,主要由于科学概念和分类系统界定不一致,城市分类遥感数据源和方法的差异导致现有分类结果存在较大差异. 应用遥感监测土地利用/覆盖变化, Landsat TM/ETM+影像等数据源30m分辨率被认为是像元尺度探测土地利用变化信息的最佳尺度(Liu等, 2010, 2014b; Chen等, 2014, 2015; 曹鑫等, 2014). 但对于城市内部土地覆盖而言,即使是30m空间分辨率像元,也存在不透水地表和植被组合的混合像元(Lu等, 2014a; Kuang等, 2014). Kuang等(2013, 2014)基于Landsat TM/ETM+ 30m分辨率影像评估了中国和美国6个超大城市不透水地表面积时空差异特征,认为中国城市不透水地表像元面积比例集中于60~83%(匡文慧等, 2013),而美国城市不透水地表像元面积比例集中于45~78%. 美国城市景观更多由不透水地表和树木镶嵌而成(Nowak和Greenfield, 2012). 因此,应用500m分辨率MODIS遥感影像开展城市面积制图会影响分类信息空间范围或统计面积的精准性.

中国于2009年率先开展了全球地表覆盖高精度遥感制图工作,利用Landsat TM和HJ-1A等高分辨率遥感数据,研制了首套全球地表覆盖30m分辨率产品(GlobeLand30),获取了包括人造覆盖在内的全球10个一级类型地表覆盖类型,总体分类精度达到80%以

上, 其中人造地表覆盖分类的用户精度为86.7%(陈军等, 2014; 廖安平等, 2014; Chen等, 2014, 2015; 曹鑫等, 2014). 当前, 有效的洲际尺度人造地表覆盖精细化遥感探测方法和高精度的数据产品, 对于进一步开展洲际尺度城市化对区域气候、生态系统过程和全球环境变化影响等相关研究具有重要需求. 城市不透水地表遥感分类基本方法包括人机交互解译、光谱特征应用类以及模型应用三类(Slonecker等, 2001). 近年来, 城市不透水地表信息提取一些新的技术方法研究取得重要进展, 主要的方法包括逐像元影像分类法(Hodgson等, 2003)、神经网络法(Hu和Weng, 2009)、回归树模型(Yang等, 2003; Xian和Crane, 2005)以及混合像元分解方法(Lu和Weng, 2004)等, 这些方法在城市、城市群和国家尺度具有较好的应用效果(Lu等, 2014a). 通过多源遥感数据的融合, 集成上述关键技术方法, 将人造覆盖地表和城市不透水地表组分遥感分类拓展到洲际尺度具有高度的可行性和现实性.

与世界其他地区相比较, 亚洲正处于快速的城市人口集聚和城市扩张时期, 2010年亚洲城市人口占全球城市人口的43%, 到2050年预期将达到63%, 使其成为千万级人口超大城市 and 城市群集中的区域. 近30年来亚洲城市化进程加快, 随之也带来了一系列如城市大气污染、洪涝灾害和热岛加剧等城市生态环境问题. 本研究主要目标是提出城市内部结构组份理念并设计地表等级层次结构分类系统, 研发人造地表覆盖精细化分类技术方法; 同时应用多源遥感数据融合方法, 基于GlobeLand30一级人造地表覆盖产品对亚洲城市建成区及其内部不透水地表和植被的分布特征进行准确核定和制图, 进而比较分析不同国家经济发展水平与城市结构组份时空关系, 研究成果可为亚洲城市健康人居环境的建设及可持续发展战略, 乃至“一带一路”战略实施提供重要参考信息.

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区与数据集

以亚洲为研究区, 涉及东亚中国、日本、朝鲜、韩国和蒙古5国, 东南亚越南、菲律宾和新加坡等11国, 南亚印度、孟加拉国和印度尼西亚等17国, 中亚

哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦5国, 西亚阿富汗、伊朗和伊拉克等17国, 共计48个国家, 陆地总面积 $3072 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占世界陆地面积近五分之一. 由于俄罗斯横跨欧洲和亚洲大陆, 但其人口、产业多集中于西部地区, 故本次研究未将其划入研究范围(图1). 数据源主要应用2010年GlobeLand30全球地表覆盖制图30m空间分辨率产品, 欧洲太空局(欧空局)2008~2012年300m全球土地覆盖数据集, 2010年MODIS NDVI 16天250m合成数据, 2010年全球1km夜间灯光指数数据(DMSP-OLS), 美国地质调查局2010年Landsat TM遥感影像等. 亚洲子流域分布数据来源于美国地质调查局1km DEM信息提取的流域界线. 区域性数据还包括2010年中国土地利用/覆盖现状1:10万矢量数据. 验证样本来源于Google Earth下载的2010年高分辨率影像数据. 详细数据源见表1.

2.2 分类系统定义

为科学量测人造地表时空范围和分布特征, 我们设置三级分类系统, 包括人造地表覆盖、城市建成区以及其内部不透水地表、绿地植被和水域等组分. 人造地表覆盖指由城乡建设用地、工矿用地及其范围内生物和非生物环境共同构成的人工生态系统, 界线范围为城镇、乡村住宅、独立工矿用地以及基本制图单元界线内部的绿地植被与水域等, 主要包括城市建成区、农村居住、独立工矿以及附属建筑和构筑物用地; 城市建成区包括城市不透水地表、水域、植被和裸土地表覆盖类型; 不透水地表主要由城市建成区内建筑屋顶、水泥和沥青道路、大理石广场以及混凝土等组成, 是城镇建设用地内主要的土地覆盖类型(匡文慧, 2012; Kuang, 2012b; Lu等, 2014b; Kuang等, 2014). 城市植被主要以城市绿地等类型为主, 在部分温带和寒带地区, 植被呈现夏天枝叶茂盛而冬天落叶, 季节性差异显著, 当落叶后影像上通常显示裸土状态. 受Landsat TM和HJ-1A等影像季相影响, 本研究将高度混合的绿地和裸土分为城市植被类型, 主要以草坪和树木植被为主, 含有少量的裸土(图2).

2.3 遥感精细化分类方法

为实现人造地表覆盖空间上的科学量测, 满足城市等级地表结构遥感监测与生态调控应用需求,

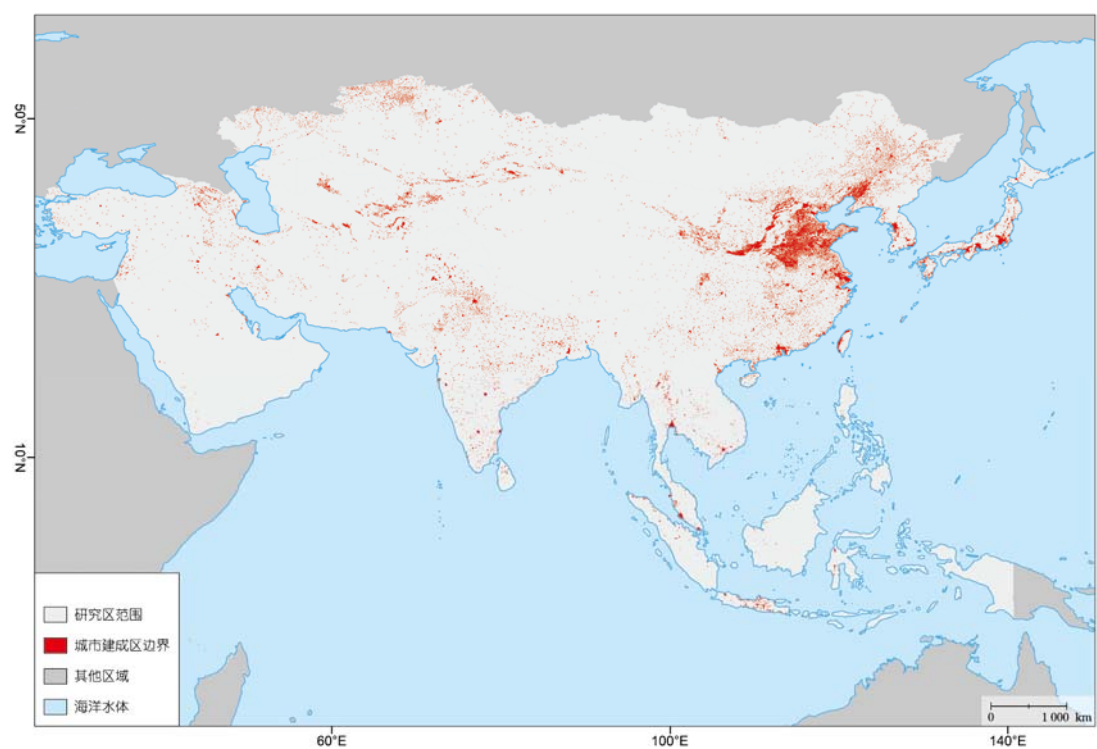


图 1 研究区分布示意图

表 1 数据源详细信息

数据类型	数据源名称	分辨率、数据类型	数据来源	遥感分类作用
分类信息源	GlobeLand30	30m分辨率栅格数据	http://www.globeland30.org	获取人造地表覆盖30m分辨率一级类数据, 准确界定城市和乡村边界信息
	MODIS NDVI	16天250m合成栅格数据	http://modis.gsfc.nasa.gov	用于分类城市内部结构信息, 反映城市绿地草坪和树木组分状况
	DMSP-OLS	1km分辨率栅格数据	http://ngdc.noaa.gov	用于分类城市内部结构信息, 反映城市边界分布和不透水地表组分状况
	欧空局全球土地覆盖数据	300m分辨率栅格数据	http://maps.elie.ucl.ac.be	对GlobeLand30城市边界校验, 从GlobeLand30获取城市植被和水域信息
	Landsat TM	30m分辨率纠正图像	http://glovis.usgs.gov	获取更高精度典型城市的城市不透水地表、绿地组分, 校正250m不透水地表和绿地组分数据
辅助数据	中国土地利用/覆盖现状	30m分辨率栅格数据	中国科学院地理科学与资源研究所	用于人造地表覆盖等级类型分割阈值获取, 城市边界界定
	子流域界线	矢量界线	http://webgis.wr.usgs.gov	分析亚洲各子流域不透水地表比例等级
验证数据	Google Earth	高分辨率纠正影像	http://google-earth.en.softonic.com	从分类正确性、组分比例误差两个方面开展数据精度评价高精度图像源

需要对人造覆盖亚类信息进行精细化分类. GlobeLand30产品共分10个一级类型, 该产品“人造覆盖”空间范围上主要包括遥感上可识别的去除城市植被、水域、裸土后的城市建成区、农村居民地以及交通、工矿建筑和构筑用地等固定栅格类型值. 事实上即使30m像元尺度, 每个像元包括0~100数值的不透水

地表、植被及裸土等面积比例(0代表不含不透水地表, 100代表像元被不透水地表完全覆盖)(图2). 因此, 直接从GlobeLand30产品提取的城市用地空间范围要比城市建成区范围小, 要比城市不透水地表范围大. 为此, 本研究开展人造地表覆盖精细化分类, 具体分为四个步骤, 主要包括基于多源数据融合方法获取全

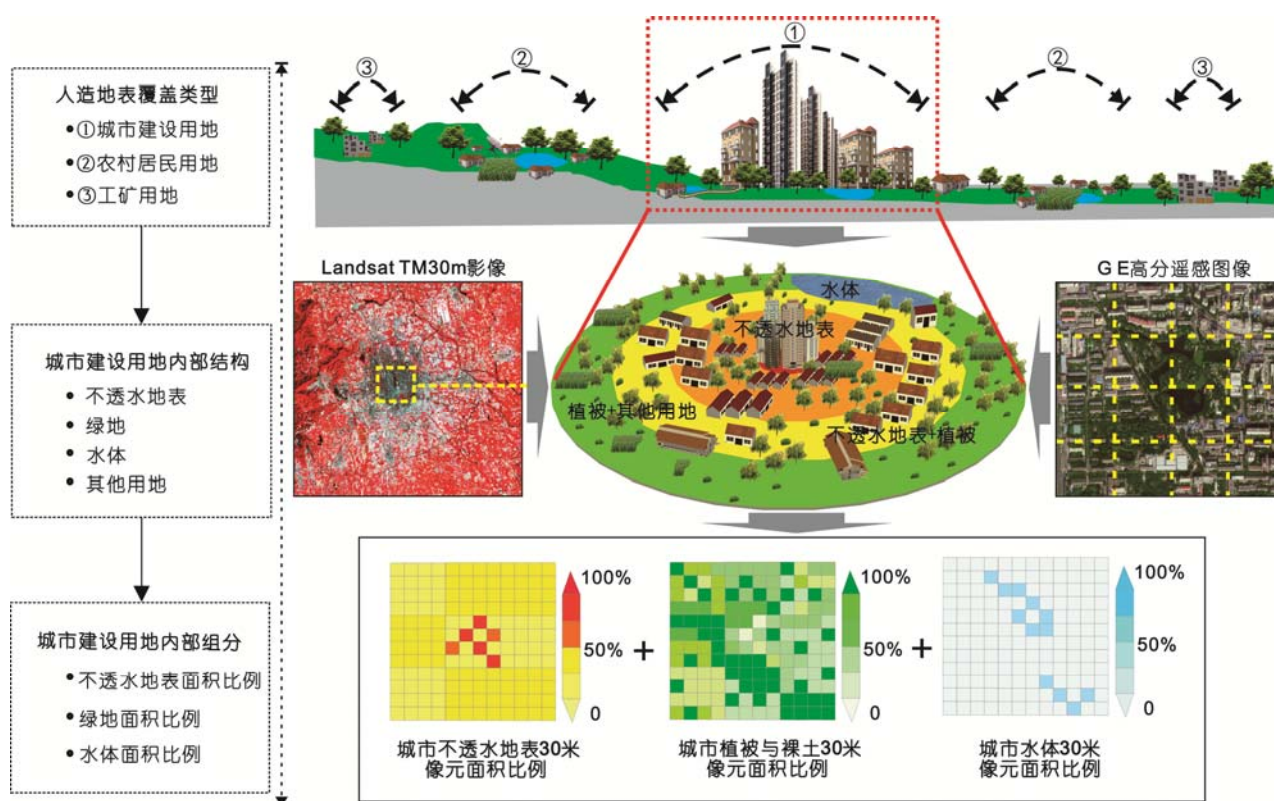


图2 人造地表覆盖分类系统和城市建成区内部组分示意图

球30m分辨率完整的人造覆盖信息,对照2010年Landsat TM和HJ-1A纠正后的影像结合专家知识订正人造覆盖边界信息,对30m像元尺度信息开展混合像元分解,经空间运算获取人造覆盖精细化分类结果,技术流程见图3。

第一步,多源数据融合处理。对获取的GlobeLand30产品进行数据格式转换、投影转换、图幅拼接工作,欧空局300m土地覆盖数据(ESR GLC300)、MODIS NDVI 250m数据、DMSP-OLS 1km数据进行格式转换和投影转换,数据处理统一应用Grid格式,制图应用WGS84投影,空间运算和面积统计采用割圆锥等面积投影(Albers)。

提取GlobeLand30产品30m人造覆盖一级类型和ESR GLC300城市用地类型。以ESR GLC300为空间掩膜,像元设置为30m基础上,提取GlobeLand30全要素类型,将获取的林地、草地作为城乡建设用地内植被覆盖,水域作为城乡建设用地内水域,所有其他类型归并为城乡建设用地其他类型。进一步将GlobeLand30产品30m人造覆盖和ESR GLC300掩

膜后的植被、水域和其他类型,进行合并,产生城乡建设用地边界信息。

应用MODIS NDVI 250m数据和DMSP-OLS 1km数据,制作250m建筑密度指数(building density, BD),采用公式如下:

$$BD = \frac{(1 - NDVI_{\max}) + OLS_{\text{nor}}}{(1 - OLS_{\text{nor}}) + NDVI_{\max} + OLS_{\text{nor}} \times NDVI_{\max}}, \quad (1)$$

式中, BD为建筑密度指数, $NDVI_{\max}$ 为MODIS NDVI年中最大值, OLS_{nor} 为归一化灯光指数(0~1) (Lu等, 2008; Kuang, 2012a; Kuang等, 2013)。

将ESR GLC300城市用地类型、MODIS NDVI 250m数据和DMSP-OLS 1km数据制作的城乡建设用地边界信息以及GlobeLand30掩膜处理后类型合并信息,作进一步的多源数据融合、空间判断,产生城乡建设用地30m分辨率数据集。

第二步,分类结果专家知识修订。将产生的亚洲城乡建设用地30m数据集转换为矢量格式,通过面积阈值分割,将面积大于10km²图斑划分为城市,提取城市边界,将其他类型划分为农村等其他用地类型。

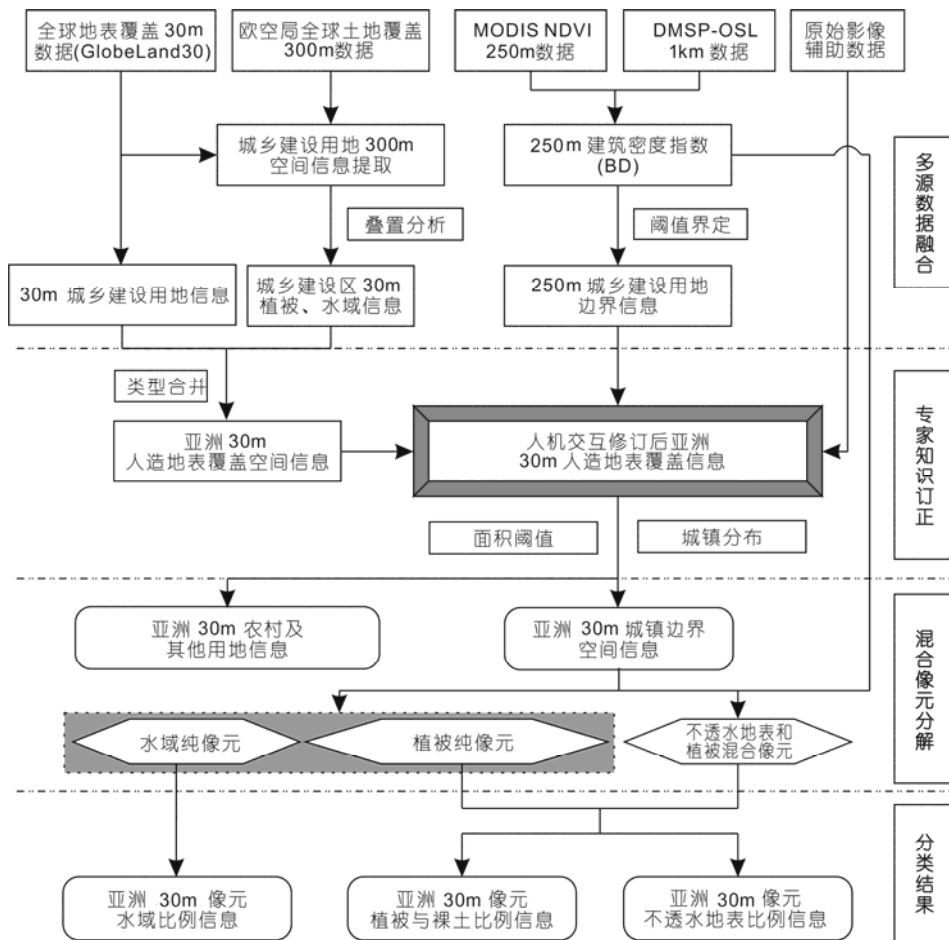


图3 基于多源数据融合的人造地表覆盖遥感分类技术流程图

对照2010年Landsat TM和HJ-1A遥感图像,结合城市点状分布信息,遍历全部城乡建设用地空间信息,应用ARCGIS界面,在专家知识参与下订正分类结果。

第三步,对城镇不透水地表和植被混合像元分解。将修订后的城市边界信息(GlobeLand30-Urban)与GlobeLand30产品再进行掩膜分析,产生城市不透水地表和植被混合像元类型、植被、水域和其他信息完全覆盖类型。对城市不透水地表和植被混合像元类型应用250m建筑密度(BD)与Landsat TM混合像元分解方法获取的不透水地表信息建立相关关系,获取混合像元中城市不透水地表面积比例。

第四步,获取精确城市亚类信息精细化分类结果。将混合像元分解的30m像元不透水地表比例(0~100%)信息作为最终(GlobeLand30-Impervious)制图成果,将混合像元分解的植被信息与分类产生的城市植被全覆盖信息(以100%处理)空间加和运算产

生最终(GlobeLand30-Urbanvegetation)制图成果(图4)。

2.4 分类精度评价方法

本研究既考虑人造地表覆盖分类的正确性,也考虑像元尺度不透水地表或植被空间分布面积比率提取误差,从城市建成区像元分类的总体精度和城市内部各组分的生产者精度、用户精度以及内部组分复相关系数(R^2)、平均相对误差(MRE)两个方面开展分类精度的评价。采用分级随机采样方法,应用Google Earth 2010年影像开展精度验证,为减少影像配准误差产生的影响,对每个采样点采取3×3(750m×750m)像元窗口应用精纠正的高分辨率图像专家人工判读和数字化解译获取验证样本信息,亚洲各国家总计获取2725个样本。用目视解译数字化不透水地表、植被和裸土以及水域面积比例,代表地面真实验证值(图5)。

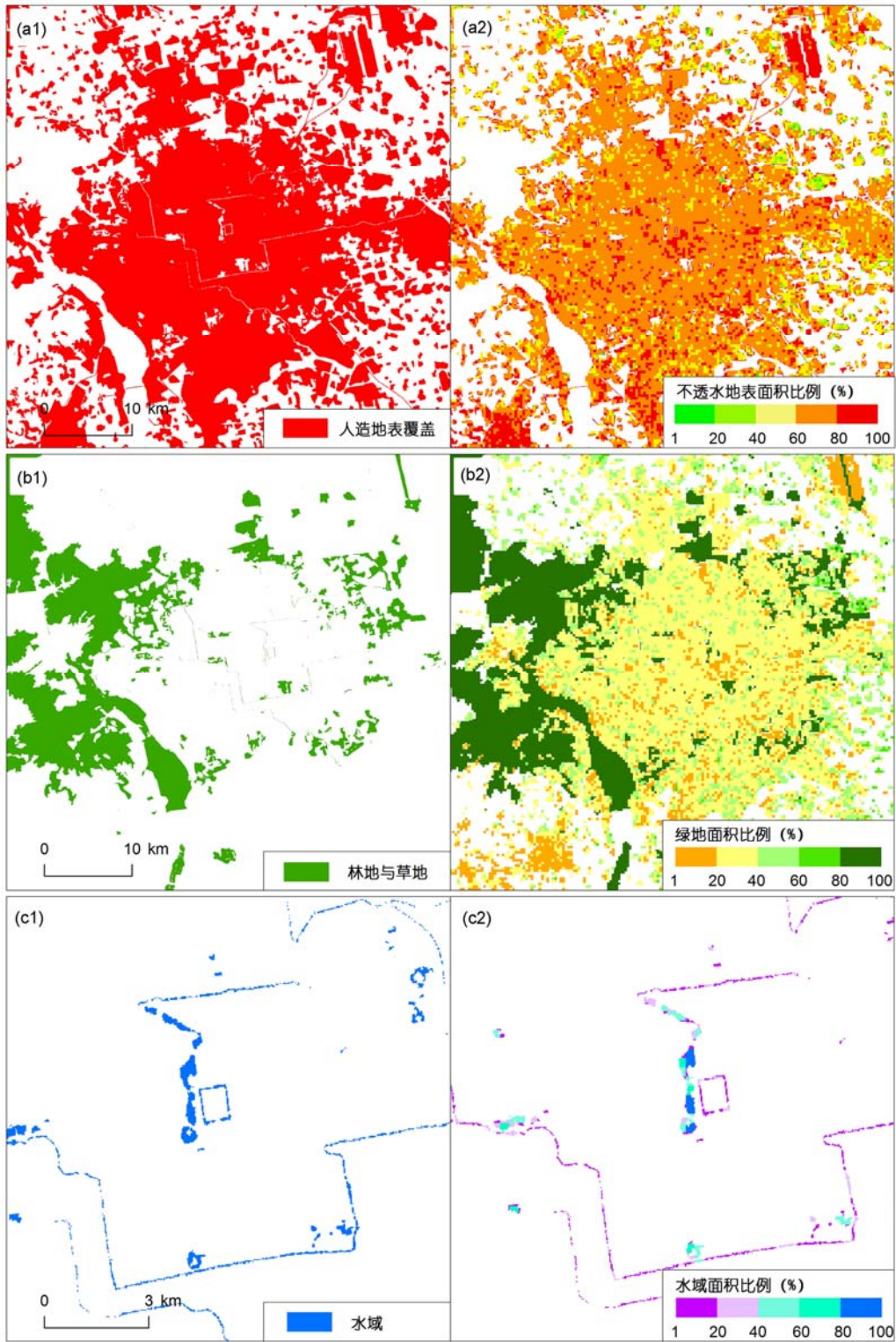


图 4 人造覆盖遥感精细化分类处理结果——以北京城市为例

(a1) 30m 分辨率人造地表覆盖信息; (a2) 250m 分辨率城市不透水地面积比例信息; (b1) 30m 林地与草地信息; (b2) 250m 分辨率城市植被面积比例信息; (c1) 30m 分辨率水域信息; (c2) 250m 分辨率城市水域面积比例信息

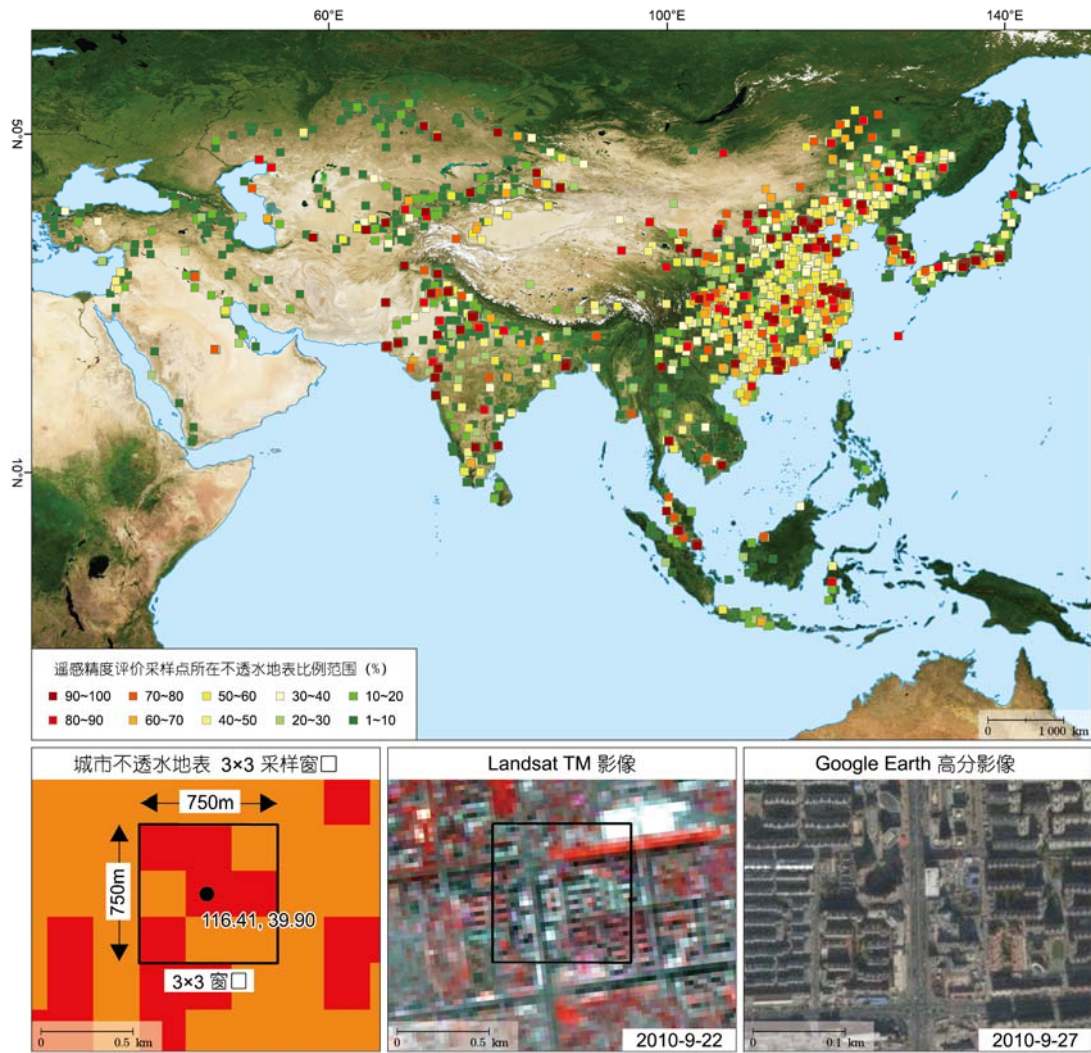


图5 城市建成区及内部组分分类精度评价采样点分布与采样方案

MRE评价每个像元不透水地表和植被组分信息提取的精度, 公式如下:

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{|x_i - y_i|}{y_i} \right)}{n}, \quad (2)$$

式中, MRE为平均相对误差; x_i , y_i 分别为3×3像元提取组分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.

2.5 分布特征分析方法

为了科学量测和制图亚洲人造地表分布格局, 比较洲际内人造覆盖分布差异特征, 从亚洲、国别以及子流域三个尺度开展分布特征分析. 对流域人造

地表分布强度指数做如下定义:

$$WIS(\beta)_{\text{index}} = \left(\sum_{n=1}^{m_\beta} P_{\beta,n} \times A_{\beta,n} \right) / S_\beta \times 100\%, \quad (3)$$

式中, $WIS(\beta)_{\text{index}}$ 指第 β 个子流域内不透水地表指数; $P_{\beta,n}$ 、 $A_{\beta,n}$ 指子第 β 个流域第 n 个单元网格不透水地表比例与像元面积; m_β 指第 β 个子流域像元总数; S_β 是第 β 个子流域总面积. 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1~5%, 造成轻微影响; 当不透水地表面积比例为5~10%, 造成中度影响; 当不透水地表面积比例为10~25%, 造成重度影响; 当不透水地表面积比例大于25%, 将产生严重影响(Arnold和Gibbons,

1996; Bierwagen等, 2010; Kuang, 2012a; Kuang等, 2013).

3 结果与分析

3.1 分类精度评价

由于城市内部不透水地表和植被高度镶嵌, 对于城市等级结构精细化分类结果采取两种方法开展精度评价, 一方面考虑分类的正确性, 另一方面考虑组分比例的合理性. 由表2知, 城市建成区及其内部组分分类的总体精度为90.79%, 与GlaobeLand30相比较, 经过精细化分类和专家知识改进, 分类精度提升了4.54%. 城市内部结构中, 植被与裸土组分的用户精度和生产者精度分别为88.56%和87.58%; 水域的分类精度最高, 用户精度和生产者精度分别为95.89%和95.83%; 城市地表主要覆盖组分中主导类型不透水地表组分分类精度的复相关系数(R^2)和平均相对误差(MRE)均为0.87. 城市建成区及其内部组分总体分类精度较高, 满足城市地表覆盖格局比较分析与城市内部结构遥感探测的精度要求(匡文慧等, 2015; Kuang等, 2013)(表2).

城市地表精细化分类结果分析表明, 整体分类精度高低与气候地带性和不同国家经济发展水平、城市规模密切相关. 城市地表分类结果中城市不透水地表主要以建筑、道路、广场等为主. 植被与裸土中主要类型为城市内部公园绿地、生产绿地和道路绿地. 在亚洲北部温带和寒温带气候区城市植被呈现显著的季节性特征, 冬春季以落叶、枯萎植被和裸土

为主, 而夏秋季以绿色植被为主, 而且随着南北纬度的不同物候期也呈现较大的差异. 由于Landsat TM和HJ-1A每景影像获取的时间不同, 对分类结果造成较大的差异. 在分类结果中, 不同国别之间分类精度差异显著, 主要有两类问题, 一类问题是干旱半干旱气候区城市下垫面与荒漠、裸土难以区分, 容易导致高估或低估不透水地表组分密度; 另一类问题是, 热带与亚热带区城市高大树冠对城市建筑存在严重的遮挡, 容易导致低估不透水地表组分密度. 针对这两类问题, 我们前期做了长期的典型实验研究工作, 在中国乌鲁木齐、北京、广州、上海等城市做了野外实测、0.61m航空影像、合成正射影像2.1m高分辨率ZY-3卫星图像间对比分析与系数校正工作(匡文慧, 2012; 匡文慧等, 2015; Kuang, 2012a; Kuang等, 2013).

3.2 亚洲城市覆盖范围与组分分布特征分析

从亚洲地区30m分辨率城市覆盖遥感精细化分类数据分析, 亚洲城市建成区面积为181785.961km², 占亚洲陆地地表总面积的0.59%(图6和表3). 从建成区内部结构组分来看, 亚洲城市土地覆盖以城市不透水地表及植被为主, 水域及其他类型所占比重较小. 其中, 城市不透水地表覆盖总面积为116504.72km², 占亚洲陆地地表总面积的0.38%, 占亚洲城市建成区总面积的64.09%; 植被与裸土面积为62823.39km², 占亚洲城市建成区总面积的34.56%; 水域与其他类型面积分别为1872.05和585.80km², 分别占城市建成区总面积的1.03%和0.32%.

表2 不同国别城市建成区分类与内部组分提取精度评价表

主要国别	样本数	城市建成区总分 类精度(%)	城市内部组分					
			城市植被与裸土		城市水域		不透水地表组分	
			用户精度 (%)	生产者精度 (%)	用户精度 (%)	生产者精度 (%)	复相关系数 (R^2)	平均相对误差 (MRE)
中国	1615	91.33	89.47	88.14	96.88	96.44	0.91	0.73
印度	283	90.11	88.56	87.17	95.89	95.38	0.84	0.95
日本	161	86.96	86.71	84.91	93.9	92.91	0.88	0.86
哈萨克斯坦	126	90.48	90.18	88.21	97.65	96.52	0.89	0.79
韩国	66	90.91	90.33	90.38	97.82	98.9	0.9	0.81
巴基斯坦	65	89.23	87.62	87.99	94.87	96.28	0.86	0.91
乌兹别克斯坦	51	88.24	89.03	88.08	96.41	96.38	0.85	0.88
印度尼西亚	48	85.42	86.67	86.22	93.84	94.34	0.86	0.73
其他国家	310	90.00	88.46	87.1	95.79	95.3	0.88	0.9
合计	2725	90.79	88.56	87.58	95.89	95.83	0.87	0.87

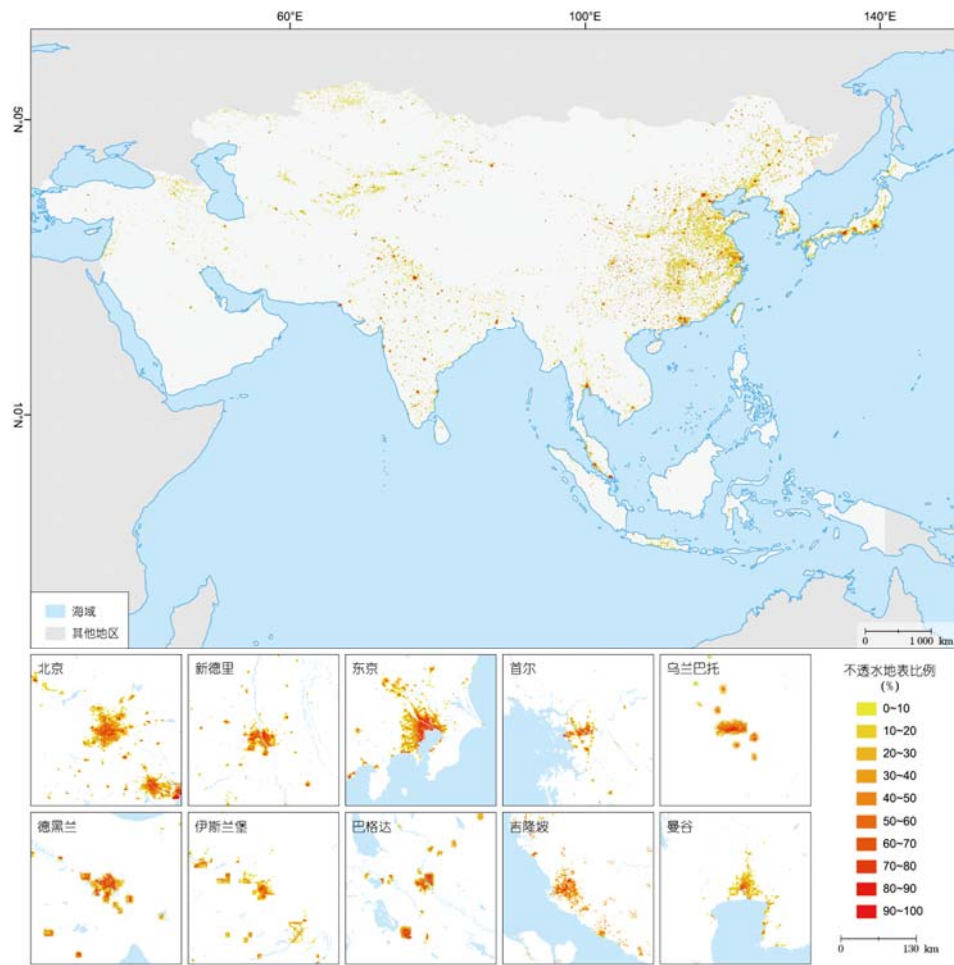


图 6 亚洲人造地表覆盖空间分布范围与面积比例

从亚洲各国家分布来看,中国城市建成区内不透水地表覆盖组分面积最大,共计 36525.81km^2 ,占亚洲地区不透水地表总面积的32.77%;其次为印度,其不透水地表面积为 17946.69km^2 ,占总面积的16.10%;再次为日本,面积为 13292.03km^2 ,占总面积的11.93%。综合考虑亚洲各个国家的经济发展程度,发达国家(如日本、韩国、新加坡等)与发展中国家(如中国、印度等)的城市发展程度也不尽相同,城市中不透水分布面积及比例也有较大差异,以各国首都不透水分布强度为例,东京、首尔、新加坡市比德黑兰、伊斯兰堡、巴格达等发展中国家首都整体不透水地表面积分布范围更广;其次,基于不同国家城市不透水地表面积占其国土总面积的比例统计分析,经济发达国家中,新加坡城市不透水地表总面积占其国土总面积的17.12%,日本、韩国城市不透水地表

总面积占其国土总面积分别为4.88%和3.56%;与此相比,发展中国家如中国,其不透水地表仅占国土总面积的0.39%,印度也仅占0.57%。这种发展程度不同的国家城市不透水地表分布的大幅度差异与各国城市化水平、人口规模、产业结构等密切相关。

从亚洲城市不透水地表空间分布强度分析,亚洲不透水分布强度与比例呈现自东向西三级梯度逐级显著降低的趋势,其中第一级梯度为亚洲东部区域,包括日本、韩国、中国东部沿海城市不透水地表强度较大,表现出空间显著集聚式分布,其中中国东部沿海城市不透水地表面积分布比重与强度指数最高,主要表现为城市群不透水地表连绵状态分布特征(Kuang等, 2013, 2014);第二级梯度为亚洲中部区域,以中国新疆西部、中亚五国、印度等为代表国家,其城市不透水地表覆盖呈现出大范围散点状分布特

表 3 不同国家城市土地覆盖结构面积统计

亚区	国别	城市不透水地表		城市植被与裸地		城市水域		城市建成区	
		总面积(km ²)	占国土面积比例(%)	面积(km ²)	占国土面积比例(%)	面积(km ²)	占国土面积比例(%)	面积(km ²)	占国土面积比例(%)
东亚	中国	36525.81	0.39	20526.93	0.22	664.89	0.01	57924.97	0.62
	日本	13292.03	3.56	7778.68	2.10	347.24	0.09	21496.52	5.75
	韩国	4839.52	4.88	3261.94	3.33	52.56	0.05	8186.97	8.26
	朝鲜	460.21	0.38	418.61	0.35	9.44	0.01	892.49	0.73
	蒙古	315.88	0.02	69.72	0.00	4.53	0.00	390.83	0.02
东南亚	泰国	2992.75	0.58	3138.1	0.62	55.51	0.01	6218.06	1.21
	马来西亚	2985.38	0.91	1972.96	0.60	24.28	0.01	5002.55	1.52
	越南	1420.36	0.43	614.78	0.19	18.42	0.01	2059.77	0.63
	缅甸	712.98	0.11	385.52	0.06	11.99	0.00	1114.38	0.17
	印度尼西亚	5371.66	0.28	4926.61	0.26	111.15	0.01	10409.42	0.55
	菲律宾	294.28	0.10	285.3	0.10	2.81	0.00	585.27	0.20
	柬埔寨	191.57	0.11	128.17	0.07	1.32	0.00	322.35	0.18
	新加坡	101.67	17.12	109.76	18.66	5.65	0.95	218.19	36.73
	老挝	48.75	0.02	38.7	0.02	1.25	0.00	89.09	0.04
	东帝汶	9.41	0.06	11.63	0.08	0.27	0.00	21.43	0.14
	文莱	42.69	0.74	27.12	0.47	0.66	0.01	71.28	1.24
南亚	印度	17946.69	0.57	3820.99	0.12	239.65	0.01	22045.93	0.70
	巴基斯坦	4880.12	0.01	961.27	0.01	18.08	0.00	5869.18	0.02
	孟加拉国	522.10	0.38	148.94	0.11	7.58	0.01	680.12	0.50
	斯里兰卡	438.21	0.66	127.92	0.19	3.5	0.01	570.92	0.86
	尼泊尔	54.36	0.04	16.32	0.01	1.17	0.00	72.01	0.05
	不丹	42.15	0.09	23.71	0.05	0.71	0.00	66.91	0.15
	马尔代夫	0.69	0.23	0.32	0.11	0.02	0.01	1.04	0.35
中亚	哈萨克斯坦	8069.48	0.30	2021.67	0.08	43.11	0.00	10154.68	0.38
	乌兹别克斯坦	3539.20	0.82	1528.01	0.36	48.19	0.01	5130.83	1.18
	土库曼斯坦	1599.15	0.33	1473.6	0.30	17.05	0.00	3104.68	0.63
	吉尔吉斯斯坦	1082.24	0.54	779.12	0.39	16.01	0.01	1885.24	0.95
	塔吉克斯坦	587.09	0.41	505.07	0.36	12.39	0.01	1109.65	0.78
西亚	伊朗	1692.82	0.10	1890.32	0.12	24.02	0.00	3626.25	0.22
	土耳其	1108.09	0.14	1072.13	0.14	24.95	0.00	2216	0.28
	沙特阿拉伯	793.07	0.04	736.55	0.04	13.49	0.00	1550.55	0.08
	伊拉克	782.13	0.18	749.64	0.17	14.23	0.00	1553.57	0.36
	格鲁吉亚	631.55	0.90	565.52	0.82	11.58	0.02	1214.36	1.74
	阿塞拜疆	579.58	0.67	546.29	0.64	10.26	0.01	1141.65	1.32
	以色列	450.26	2.05	515.64	2.37	10.76	0.05	981.87	4.47
	亚美尼亚	418.95	1.41	392.76	1.34	10.25	0.03	825.93	2.78
	阿富汗	415.35	0.06	140.58	0.02	6.63	0.00	563.98	0.09
	叙利亚	278.67	0.15	201.86	0.11	3.81	0.00	486.38	0.26
	科威特	258.08	1.49	247.15	1.44	5.1	0.03	512.83	2.96
	阿联酋	180.65	0.26	96.89	0.14	3.71	0.01	282.23	0.40
	约旦	119.62	0.13	138.48	0.16	2.52	0.00	262.02	0.29
	黎巴嫩	99.91	0.99	91.58	0.91	2.41	0.02	194.83	1.92
	卡塔尔	78.65	0.69	87.88	0.78	2.13	0.02	169.55	1.49
	塞浦路斯	73.61	0.82	79.07	0.89	2.41	0.03	155.89	1.73
	也门	56.56	0.01	81.69	0.02	1.66	0.00	140.74	0.03
	巴林	32.91	4.89	28.24	4.24	0.76	0.11	62.2	9.24
	阿曼	21.43	0.01	28.74	0.01	0.8	0.00	51.26	0.02
	巴勒斯坦	66.40	0.56	30.91	0.11	1.14	0.00	99.11	0.67
	合计	116504.72	0.38	62823.39	0.18	1872.05	0.01	181785.961	0.59

征,这主要与中心城市离散特征分布密切相关;第三级梯度为亚洲西部区域,以阿拉伯半岛地区各国家为代表,城市不透水强度指数反映不明显,这与半岛地区气候、地形地貌分布及人口稀少等因素密切相关.

从城市内部土地覆盖组分结构来说,城市地表各组分的空间结构分布受自然条件、城市规划、城市功能分布和城市发展程度等因素影响.由表3及上述分析可知,亚洲各国家城市内部土地覆盖结构差异较大,主要表现为城市不透水地表、植被、水域和其他用地等比例结构的差异.由图7通过分析可知,亚洲城市不透水空间结构分布的基本规律主要表现为各国家不透水比例均相对越高,植被与裸土、水域及其他用地比例则相对较小且保持大致相似比例;亚洲中部国家城市(如印度、哈萨克斯坦、巴基斯坦等)的不透水与植被的比例高于亚洲东部国家(如日本、中国、菲律宾、新加坡等),亚洲西部干旱区国家(如以色列、约旦、阿曼、也门等)的不透水地表与植被面积比例低于亚洲中部和东部.基于亚洲城市内部土地覆盖结构组分信息统计,城市土地覆盖结构受经济制度及国家发达程度影响较大,在经济较为发达的城市,城市不透水地表比例约为50~60%(如韩国、新加坡等);日本、中国达到60%以上.而在城市化率较低、发展程度较低的国家,如印度、巴基斯坦等国家城市不透水比例则接近或超过80%,而植被占

比例相对较低.

3.3 亚洲子流域城市不透水地表面积比例空间分布特征分析

亚洲地区共计有7788个子流域.将城市不透水地表信息与亚洲子流域进行空间叠置分析,统计不同子流域城市不透水地表面积比例(图8),2010年亚洲城市不透水地表面积比例低于1%的子流域总面积为2818435.05km²,占亚洲陆表总面积的88.19%.其中,城市不透水地表面积比例为1~5%与5~25%的子流域面积分别占亚洲陆表总面积的9.17%与2.29%.从其空间分布看,城市不透水地表面积比例大于25%的子流域面积为10621432km²,占亚洲陆表总面积的0.35%,主要集中在亚洲东部国家,如日本、韩国、中国东部沿海区域,其中可以明显看出中国的京津冀地区、长江三角洲地区、珠江三角洲地区及台湾西部沿海地区、日本太平洋沿岸具有非常高的城市不透水地表面积比例分布.

基于对亚洲各个国家流域内城市不透水面积及比例统计(表4),城市不透水地表面积比例为1~5%的流域中,中国所占面积最大,达1276160.17km²,占中国国土总面积的13.21%;其次为印度,共467388.30km²,占印度国土总面积的15.68%;再次为哈萨克斯坦和日本,分别占国土面积的8.17%和35.5%.城市不透水地表面积比例为5~25%的流域中,

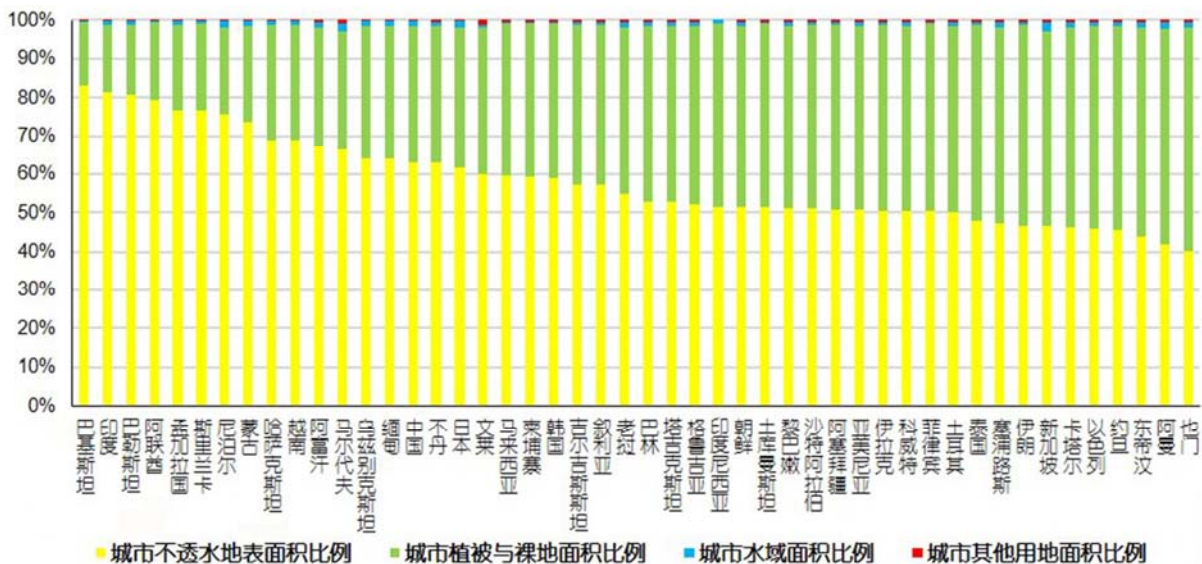


图7 亚洲各国城市土地覆盖组分面积比例

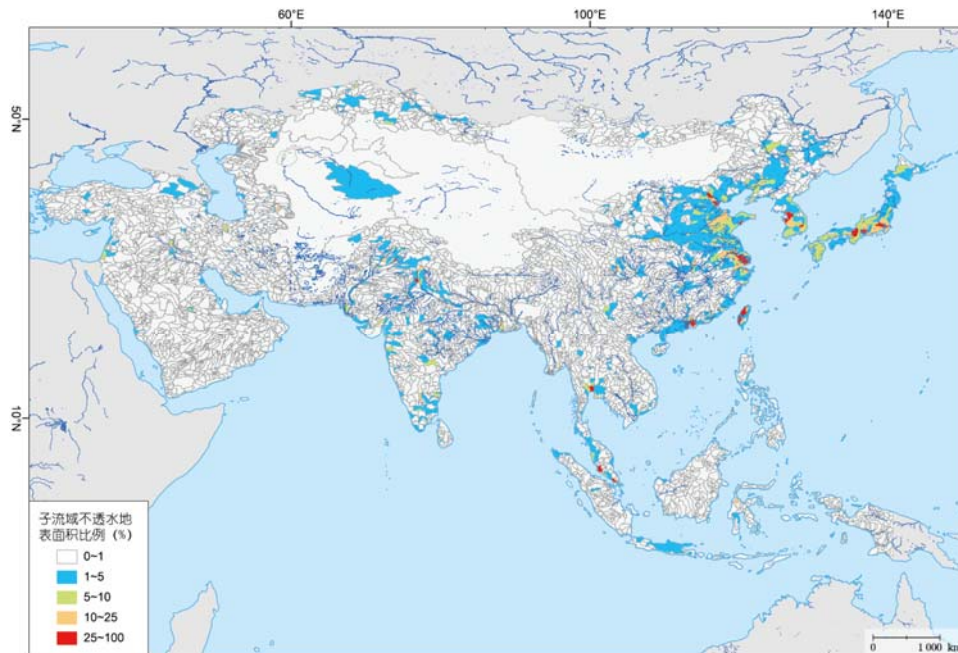


图8 亚洲各等级城市不透水地表子流域空间分布图

中国亦占最大面积,共355574.04km²,占国土面积的3.7%;再次为日本、印度,分别占其国土面积的41.54%和2.14%。而城市不透水地表面积比例大于25%的流域中,中国仍居首位,达55500.91km²,占国土面积的0.58%;其次为日本,占国土面积的5.19%(表4)。

对于中国流域特征而言,中国各主要流域中、上游地区均很少或甚至不受城市不透水地表带来的影响,如长江、黄河、珠江和松花江等流域中、上游地区,只有受轻微影响的少量子流域散落分布;而在各主要流域下游地区,生态系统的健康状况则受轻微或严重的影响,以松花江、辽河流域为主东北地区,受城市不透水地表影响程度为轻度的子流域面积分布最广,其次在哈尔滨、沈阳城市建成区地区以受中度、重度影响为主;以黄河、海河、淮河等流域为主的华中地区,受城市不透水地表轻度影响的子流域面积分布十分广阔,占了华中地区的绝大部分,其次在山东、河南地区则主要受中度、重度影响,而在京津冀地区、山东半岛南部则明显分布有大面积受严重影响地区;以长江流域为主的长江下游地区(即浙、江、沪地区),以上海都市圈为主的地区以受严重影响为主,分布十分明显,其次在江、浙、皖接合处,也

分布有大量受轻度、中度、重度影响的区域;以珠江流域为主的珠江三角洲地区,在广东、珠海、香港、澳门等城市分布子流域地区受城市不透水地表严重影响,其他子流域以受轻度影响为主(表5和图8)。

基于以上分析,中国七大河各流域内受不透水地表影响程度的空间分布,自北向南各流域所受轻度影响的子流域面积比重逐步下降,而受严重影响的面积比重则逐步上升,即自北向南各流域所受不透水影响的严重程度逐步加深。由表5可知,自北向南逐个对中国七大河流子流域受影响程度进行分析有松花江流域主要受轻度、中度影响,面积分别为3435.03和1175.14km²;辽河流域受轻度影响和严重影响的子流域面积相当,均约2000km²;海河流域受轻度影响面积最大,面积为5557.36km²,受严重影响面积为4433.04km²;黄河流域则主要受轻微影响,受影响子流域面积约5412.63km²;淮河流域受轻度、中度、重度影响面积均较大,受严重影响面积则相对很小;长江流域则主要受严重影响的子流域所占面积最大,面积约8120.88km²,其他各级影响程度分布面积相对较小但也不可忽视;珠江流域也以受严重影响为主,面积约5052.11km²,其次受轻度影响面积为主。

表 4 亚洲各流域城市不透水地表各等级比例子流域面积

亚区	国家	不透水地表比例 占1~5%子流域 面积(km ²)	不透水地表比 例占5~10%子流域面积 (km ²)	不透水地表比例 占10~25% 子流域面积(km ²)	不透水地表比例占25~100% 子流域面积(km ²)
东亚	中国	1276160.17	236399.21	119174.83	55500.91
	日本	132654.26	114517.10	40716.55	19400.77
	韩国	31726.92	28121.98	14139.86	12759.89
	朝鲜	26781.48	10145.78	2.37	12.55
	蒙古	7188.24	0.00	0.00	0.00
东南亚	泰国	73512.00	10201.10	2906.79	5777.72
	马来西亚	40887.31	4693.55	4260.62	7434.43
	越南	38889.57	0.00	2158.17	7.00
	印尼	105789.55	2.00	3030.80	1.19
	菲律宾	3922.14	0.00	0.00	0.00
	柬埔寨	3233.93	0.00	0.00	0.00
	新加坡	0.00	0.00	0.00	575.26
	老挝	43.78	552.71	0.00	0.00
南亚	文莱	4447.18	0.00	0.00	0.00
	印度	467388.30	38952.80	24830.38	3212.33
	巴基斯坦	69294.95	13047.25	4383.15	1274.60
	孟加拉国	72.51	223.84	0.00	0.00
	斯里兰卡	2684.02	488.59	1150.07	0.00
	不丹	28371.24	0.00	0.00	0.00
中亚	马尔代夫	0.00	0.00	0.00	0.00
	哈萨克斯坦	221059.25	7336.25	548.07	235.01
	乌兹别克斯坦	73797.99	0.00	0.00	0.00
	土库曼斯坦	9090.10	0.00	2088.18	0.00
	吉尔吉斯斯坦	58713.37	0.00	0.00	0.00
西亚	塔吉克斯坦	12878.18	0.00	0.00	0.00
	伊朗	11557.38	4286.01	108.90	0.00
	土耳其	33571.72	0.00	0.00	17.96
	沙特阿拉伯	10709.66	2193.08	0.00	0.00
	伊拉克	8850.76	6193.12	0.00	0.00
	格鲁吉亚	21296.27	0.00	0.00	0.00
	阿塞拜疆	16674.38	76.02	0.00	0.00
	以色列	1152.03	5042.64	0.00	0.00
	亚美尼亚	18464.41	0.00	0.00	0.00
	阿富汗	14463.52	0.00	0.00	0.00
	叙利亚	4763.26	0.00	0.00	0.00
	科威特	2999.94	0.00	0.00	0.00
	阿联酋	3884.02	0.00	0.00	0.00
	约旦	5643.14	0.00	0.00	0.00
	黎巴嫩	3843.95	411.00	0.00	0.00
	塞浦路斯	2170.76	0.00	0.00	0.00
	也门	0.00	0.00	0.00	4.71
	巴林	398.81	0.00	0.00	0.00
	巴勒斯坦	3683.57	0.00	0.00	0.00
	加沙地带	2222.99	2138.91	0.00	0.00
合计		2818435.05	485022.94	219498.72	106214.32

表 5 中国主要流域不透水地表分布面积比例

流域	不透水地表比例占1~5% 子流域面积(km ²)	不透水地表比例占5~10% 子流域面积(km ²)	不透水地表比例占10~25% 子流域面积(km ²)	不透水地表比例占25~100% 子流域面积(km ²)
海河	5557.36	2377.14	835.21	4433.04
淮河	5469.41	4496.33	4563.44	939.53
黄河	5412.63	1292.57	727.07	323.14
长江	4060.44	3137.61	4429.57	8120.88
珠江	2056.09	881.18	1351.14	5052.11
松花江	3435.03	1175.14	361.58	361.58
辽河	1974.39	0.00	1410.28	1974.39

4 讨论

4.1 城市内部结构组分遥感精细化探测

城市景观具有高度动态性、结构复杂性和类型镶嵌等特征,城市内部不透水地表与绿地结构组分对城市热岛等生态环境影响存在截然不同贡献。当前城市土地利用/覆盖变化研究中,缺乏对城市扩张进程中内部异质性或结构组分的精细刻画,由此也影响城市地表热收支模拟和生态系统服务评估的可靠性(Kuang等, 2015a; 2015b)。国际上先后研发的全球或洲际城市建成区或不透水地表数据主要集中于500m或1km(Yang等, 2003; Schneider等, 2009)。通过比较分析本研究成果与国际上研发的同类数据集,发现分类系统、空间分辨率以及数据获取的时间不同对数据产品结果产生影响(Liu等, 2014a)。总结相关研究文献,发现城市相关概念定义的不同以及对城市内部不透水地表和绿地组分混合认识的不足是导致遥感监测结果差异的主要原因(Lu等, 2014b; Kuang等, 2014)。

Elvidge等(2007)应用夜间灯光指数(DMSP)评估全球不透水地表面积,由于获取的1km分辨率图像,对城市内部异质性刻画不足,一定程度高估了不透水地表面积。Wu和David (2002)、Liu等(2014a)提出了城市用地分为城市地区、城市建成区和不透水地表三级分类体系,评价了国际大量研究成果,认为城市不透水地表面积占亚洲总面积的0.60%,亚洲城市不透水地表与建成区面积比率为1:1.5(Wu和David, 2002; Liu等, 2014a)。本研究评估2010年亚洲城市建成区面积为181785.961km²,占亚洲陆表面积的0.59%;城市内部覆盖组分中,不透水地表总面积达116504.72km²,占亚洲城市建成区面积64.09%,植被与裸土面积占34.56%。这一评价结果与Liu等(2014a)

评价结果更接近。

4.2 亚洲城市建设发展强度及影响因素

亚洲不透水分布强度与比例呈现自东向西三级梯度逐级显著降低的趋势,这一趋势主要由亚洲整体自然地理环境,各国发展历史阶段以及临海外向型经济决定的。空间分布上集中反映了亚洲城市建设发展强度的现状态势,总体上第一级梯度以东亚中国、日本、韩国为主,表现出城市集聚式分布,以城市群不透水地表连绵状态分布特征,如京津唐、珠三角、长三角以及日本太平洋沿岸城市群,这一梯度主要与临海城市外向型经济密切相关;第二级梯度为亚洲中部区域,以中亚、东南亚与南亚国家为主,其最大城市不透水地表分布国家为印度,这一梯度与各国发展的历史程度具有更大的关系;第三级梯度以西亚国家为主,这些国家人口密度小,受自然环境约束更为显著。从历史观点与人口现状来看,中国和印度同属四大文明古国,又是人口大国,在亚洲城市建成区面积排在前两位,在亚洲城市化进程中作用明显。

各国的城市建设发展状况与城市人口现状、经济水平密切相关,分析各国家城市不透水地表面积与城市人口、经济之间的关系,二者之间复相关系数(R^2)分别为0.80和0.87(图9)。城市不透水地表与城市人口和GDP之间呈线性关系。从各国城市建成区面积与内部不透水地表组分比例来看,发达国家与发展中国家之间差异显著,发展中国家主要以增加城市不透水面积来提升城市化率,而考虑城市绿地植被的生态服务作用相对较少;而发达国家,更注重城市内部绿化和人居环境建设。因此,发达国家相对比发展中国家具有更低的城市内部不透水地表组分面积比例,这一结果与我们在中美两国超大城市国际

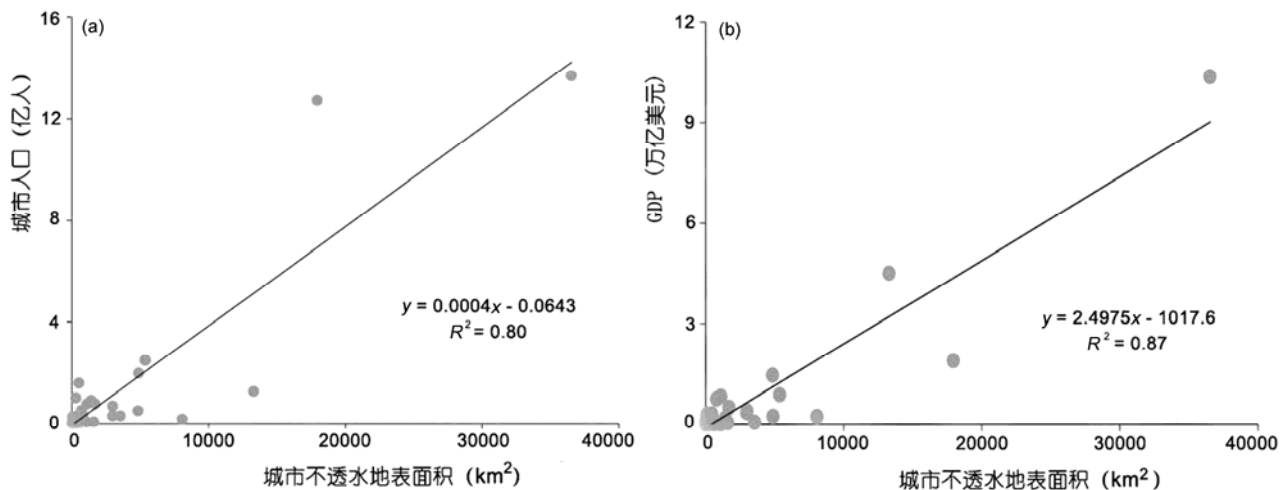


图9 2010年亚洲城市不透水地表与城市人口、GDP拟合曲线图

对比中获得的规律是一致的(Kuang等, 2014).

4.3 亚洲城市化对子流域环境影响及主要问题

亚洲正经历快速的城市化进程, 到2010年亚洲城市人口约占全部人口的43%. 总体上经历了20世纪80年代日本和韩国快速城市化, 中国、印度、孟加拉国等新兴国家加速发展阶段. 随着亚洲城市化加速发展, 对流域生态环境产生一定的影响, 根据我们评估城市不透水地表面积比例大于25%的子流域面积为106214.32km², 城市不透水地表面积比例大于25%的流域中, 中国仍居首位, 达55500.91km², 占国土面积的0.58%; 其次为日本, 占国土面积的5.19%, 集中分布在中国和日本东海岸城市群地区(Kuang, 2012a; Kuang等, 2013). 由于亚洲大部分国家城市和工业发展以资源消耗型和传统制造业工业为主, 城市不透水地表高密度分布带来一系列生态环境问题. 亚洲城市化进程中正面临着人居环境改善、环境污染治理以及基础设施改善等问题, 对于实现亚洲城市可持续发展面临着严峻的挑战(Wu, 2013; 匡文慧等, 2015).

5 结论

本研究构建了人造地表覆盖、城市建成区以及不透水地表、植被等覆盖组分等级结构遥感精细化分类体系, 发展了基于全球地表覆盖30m分辨率产品(GlobeLand30)的人造地表亚类覆盖像元组分提取的

技术方法, 研发了亚洲2010年30m分辨率城市建成区以及不透水地表、植被等250m分辨率覆盖组分比例数据产品. 基于多源信息数据融合和专家知识参与的亚洲2010年城市建成区分类精度达到91%, 不透水地表组分信息提取精度平均相对误差为0.87, 该方法能够很好地实现城市内部结构精细化探测和精确估算. 亚洲城市建成区面积181785.96km², 占亚洲陆表面积的0.59%; 城市内部覆盖组分中, 不透水地表总面积达116504.72km², 占亚洲城市面积64.09%, 植被与裸土面积占34.56%, 这一格局充分反映了城市建设等人类活动对流域生态系统影响的空间分布强度.

亚洲城市不透水分布强度与比例自东向西呈现连绵式、中心城市离散式到无显著分布三级梯度分布模式. 亚洲各国中, 中国拥有面积最多的城市不透水地表面积, 占亚洲不透水地表总面积的31.36%; 其次分别为印度、日本. 总体而言, 发达国家比发展中国家具有更高的城市不透水面积比例. 但就城市内部结构而言, 在经济较为发达的城市, 城市建成区内部不透水地表比例低于发展程度较低的国家.

亚洲子流域中城市不透水地表面积比例大于25%的子流域面积占亚洲陆表总面积的0.35%, 主要集中在亚洲东部国家, 如日本、韩国、中国东部沿海区域. 各主要流域下游地区, 生态系统的健康状况受到一定的影响. 亚洲各国不同的城市化、工业化以及经济发展水平, 导致城市建成区以及内部不透水地表、绿地组分结构之间呈现显著的差异.

参考文献

- 曹鑫, 陈军, 陈利军, 廖安平, 孙芳蒂, 李阳, 李磊, 林忠辉, 庞治国, 陈晋, 何超英, 彭舒. 2014. 全球陆表水体空间格局与波动初步分析. 中国科学: 地球科学, 44: 1661–1670
- 陈军, 陈晋, 廖安平, 曹鑫, 陈利军, 陈学泓, 彭舒, 韩刚, 张宏伟, 何超英, 武昊, 陆苗. 2014. 全球30m地表覆盖遥感制图的总体技术. 测绘学报, 43: 551–557
- 匡文慧. 2012. 城市土地利用时空信息数字重建、分析与模拟(地球信息科学基础丛书). 北京: 科学出版社
- 匡文慧, 刘纪远, 张增祥, Lu D S, 香宝. 2013. 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, 58: 465–478
- 匡文慧, 迟文峰, Lu D S. 2015. 城市地表热环境遥感分析与生态调控. 地球观测与导航技术丛书. 北京: 科学出版社
- 廖安平, 陈利军, 陈军, 何超英, 曹鑫, 陈晋, 彭舒, 孙芳蒂, 宫鹏. 2014. 全球陆表水体高分辨率遥感制图. 中国科学: 地球科学, 44: 1634–1645
- 陆大道. 2014. “未来地球”框架文件与中国地理科学的发展——从“未来地球”框架文件看黄秉维先生论断的前瞻性. 地理学报, 69: 1043–1051
- Arnold C L, Gibbons C J. 1996. Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. J Am Plann Assoc, 62: 243–258
- Bierwagen B G, Theobald D M, Pyke C R, Choate A, Groth P, Thomas J V, Morefield P. 2010. National housing and impervious surface scenarios for integrated climate impact assessments. Proc Natl Acad Sci USA, 10: 1073–1078
- Boyce L R, Brovkin V, Arora V K, Cadule P, de Noblet-Ducoudré N, Kato E, Pongratz J, Gayler V. 2014. Global and regional effects of land-use change on climate in 21st century simulations with interactive carbon cycle. Earth Syst Dyn, 5: 309–319
- Chen J, Ban Y F, Li S N. 2014. China: Open access to Earth land-cover map. Nature, 514: 434
- Chen J, Chen J, Liao A P, Cao X, Chen L J, Chen X H, He C Y, Han G, Peng S, Lu M, Zhang W W, Tong X H, Mills J. 2015. Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. ISPRS-J Photogramm Remote Sens, 103: 7–27
- Elvidge C D, Tuttle B T, Sutton P C, Baugh K E, Howard A T, Milesi C, Bhaduri B, Nemani R. 2007. Global distribution and density of constructed impervious surfaces. Sensors, 7: 1962–1979
- Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J G, Bai X M, Briggs J M. 2008. Global change and the ecology of cities. Science, 319: 756–760
- Grimmond S. 2007. Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. J Geogr Syst, 173: 83–88
- Hodgson M E, Jensen J R, Schmidt L, Schill S, Davis B. 2003. An evaluation of LIDAR- and IFSAR-derived digital elevation models in leaf-on conditions with USGS Level 1 and Level 2 DEMs. Remote Sens Environ, 84: 295–308
- Hu X F, Weng Q H. 2009. Estimating impervious surfaces from medium spatial resolution imagery using the self-organizing map and multi-layer perceptron neural networks. Remote Sens Environ, 113: 2089–2102
- Kuang W H. 2012a. Evaluating impervious surface growth and its impacts on water environment in Beijing-Tianjin-Tangshan metropolitan area. J Geogr Sci, 22: 535–547
- Kuang W H. 2012b. Spatio-temporal patterns of intra-urban land use change in Beijing, China between 1984 and 2008. J Geogr Sci, 22: 210–220
- Kuang W H, Liu J Y, Zhang Z X, Lu D S, Xiang B. 2013. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century. Chin Sci Bull, 58: 1–11
- Kuang W H, Chi W F, Lu D S, Dou Y Y. 2014. A comparative analysis of megacity expansions in China and the US: Patterns, rates and driving forces. Landscape Urban Plan, 132: 121–135
- Kuang W H, Liu Y, Dou Y Y, Chi W F, Chen G S, Gao C F, Yang T R, Liu J Y, Zhang R H. 2015a. What are hot and what are not in an urban landscape: Quantifying and explaining the land surface temperature pattern in Beijing, China. Landscape Ecol, 30: 357–373
- Kuang W H, Dou Y Y, Zhang C, Chi W F, Liu A L, Liu Y, Zhang R H, Liu J Y. 2015b. Quantifying the heat flux regulation of metropolitan land-use/land-cover components by coupling remote sensing-modelling with *in situ* measurement. J Geophys Res-Atmos, 120: 113–130
- Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, Kuang W H, Zhou M C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Yu D S, Wu S X, Jiang N. 2010. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. J Geogr Sci, 20: 483–494
- Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, Xu X L, Qin Y W, Ning J, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Wu S X, Shi X Z, Jiang N, Yu D S, Pan X Z, Chi W F. 2014b. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s. J Geogr Sci, 24: 195–210
- Liu Z F, He C Y, Zhou Y Y, Wu J G. 2014a. How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. Landscape Ecol, 29: 763–771
- Lu D S, Weng Q H. 2004. Spectral mixture analysis of the urban landscapes in Indianapolis with Landsat ETM+ imagery. Photogramm Eng Remote Sens, 70: 1053–1062
- Lu D S, Tian H Q, Zhou G M, Ge H L. 2008. Regional mapping of human settlements in southeastern China with multisensory remotely sensed data. Remote Sens Environ, 112: 3668–3679
- Lu D S, Li G Y, Moran E. 2014a. Current situation and needs of change detection techniques. Int J Image Data Fusion, 5: 13–38
- Lu D S, Li G Y, Kuang W H, Moran E. 2014b. Methods to extract impervious surface areas from satellite images. Int J Digit Earth, 7: 93–112
- Messerli B, Grosjean M, Hofer T, Núñez L, Pfister C. 2000. From nature-dominated to human-dominated environmental changes.

- IGU Bull, 50: 23–38
- Nowak D J, Greenfield E J. 2012. Tree and impervious cover in the United States. *Landscape Urban Plan*, 107: 21–30
- Slonecker E T, Jennings D B, Garofalo D. 2001. Remote sensing of impervious surface: A review. *Remote Sens Rev*, 20: 227–255
- Schneider A, Friedl M A, Potere D. 2009. A new map of global urban extent from MODIS data. *Environ Chem Lett*, 4: 940–941
- Sterling S M, Ducharme A, Polcher J. 2013. The impact of global land-cover change on the terrestrial water cycle. *Nat Clim Change*, 3: 385–390
- Wu J G, David J L. 2002. A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: Theory and applications. *Ecol Model*, 153: 7–26
- Wu J G. 2013. Landscape sustainability science: Ecosystem services and human well-being in changing landscape. *Landscape Ecol*, 28: 999–1023
- Xian G, Crane M. 2005. Assessments of urban growth in the Tampa Bay watershed using remote sensing data. *Remote Sens Environ*, 97: 203–215
- Xian G, Homer C. 2010. Updating the 2001 national land cover database impervious surface products to 2006 using Landsat imagery change detection methods. *Remote Sens Environ*, 114: 1676–1686
- Yang L, Huang C Q, Homer C G, Wylie B K, Coan M J. 2003. An approach for mapping large-area impervious surfaces: Synergistic use of landsat-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Can J Remote Sens*, 29: 230–240
- Zhao L, Lee X H, Smith R B, Oleson K. 2014. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511: 216–219