科学通报 2012 年 第 57 卷 第 16 期：1379 ~ 1387
专题：中国环境变化遥感 评 述 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

拓展与深化中国全境的环境变化遥感应用

宫鹏①②

① 清华大学地球系统科学研究中心, 地球系统数值模拟教育部重点实验室, 北京 100084;
② 中国科学院遥感应用研究所, 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101
E-mail: penggong@tsinghua.edu.cn

2012-02-09 收稿, 2012-03-30 接受
国家高技术研究发展计划(2009AA12200101)资助

摘要 中国幅员辽阔, 仅靠局部定点环境监测, 远不能满足社会需求. 而对大空间范围来说, 遥感是唯一可行的环境变化监测手段. 虽然国内外拥有强大的卫星数据获取能力和大量的卫星遥感数据, 以中国全境为对象的遥感环境变化研究并不多. 本文将环境变化过程归纳为环境变化驱动力、环境变化、物质迁移与转化、物质浓度与富集度变化、人或生态系统暴露与感染变化及环境变化影响等方面内容. 评估了遥感对这些环节的潜力, 评述了中国环境变化遥感已取得的进展. 指出遥感对于研究中国环境变化在方法体系上不但要支撑实验与观测、理解与认识, 还要重视和模拟与预测的衔接从而支持环境政策研究. 在应用层面, 应突破常规遥感观测项目, 在物种多样性、生物入侵、公众健康、空气和水质量变化监测等新的领域取得突破. 在技术层面全面系统加强实用化和自动化研究.

关键词
环境变化
遥感
模拟与预测
环境政策

地球系统科学伙伴计划(Earth System Science Partnership)将全球环境变化特别定义为由人类活动引起的物理和生物地球化学环境的变化[1]. 例如气候变化和干旱半干旱区荒漠化是广为关注的物理环境变化[2~4]. 而大气、土壤、水体的污染是严重的生物地球化学环境变化. 人类活动包括森林砍伐、化石燃料燃烧、城市化、土地垦殖、农业施肥和撒药、淡水采集、水产过度捕捞和垃圾生产等. 只有当人们能够准确地辨别和探测到这些变化的类型, 测量到这些变化的强度和持续的时间, 才能更好地理解变化过程, 模拟过去预测未来, 从而制定合理的政策以采取相应的环境管理、修复、或适应措施, 最大程度减轻环境变化的负面影响.

常规的野外观测只能在局部地点和特定的时间获得相关的环境数据. 例如, 我国环境部的环境监测数据主要局限在 100 多个地级市的城区, 国家气象局的气候数据主要来自全国 2000 多个气象台站, 它们相距几十到数百千米. 而不同国家的测量更有所用仪器的不一致性和监测密度的高低不同, 因此在大空间尺度上, 难以获取确定性高而且全面的数据. 中国幅员广阔, 常规野外定点监测难度大, 耗费高. 如何获得中国全境的环境变化信息是一个不仅中国自己而且国际社会均广为关注的难题. 近 30 年来, 国家虽然投入巨大, 但是和经济发展、人民需求相比仍然有捉襟见肘之感. 2011 年之前, 我国城市空气监测普遍不包含小于 2.5 μm 的颗粒物就是其中一例.

国际社会对自下而上层层上报的数据所存在的不确定性虽有认识, 也常常感到无能为力. 因为资金和技术原因都会制约环境变化测量的种类和精度. 举例来说, 联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)过去对全球森林覆盖的状况主要依赖各国提交的报告. 直到 2011 年才对全球的森林覆盖, 根据美国免费提供的陆地卫星影像, 按 1%的采样密度完成全球 1990, 2000, 2005 年森林覆盖的统计. 结果发现卫星采样调查的全球森林覆盖总面积与同期各个国家报告森林覆盖

英文版见: Gong P. Remote sensing of environmental change over China: A review. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5268-y

面积之和相差约 10%[5,6]. 在全球汇总面积状况下这个差别都如此之大, 局部区域或个别国家的面积差别会更大.

对于大空间范围来说, 遥感是唯一可行的环境变化监测手段. 然而在全球尺度, 这种技术也只是利用千米级尺度的气象卫星数据在陆地和海洋生产力等有限的几个领域取得学术界和社会较能够接受的成果[7,8]. 进入 21 世纪, 中国发射了包括中巴资源卫星、风云、海洋、环境与减灾、国土测绘等一系列具有国际先进水平的卫星, 但在接收到数据的处理、存储及应用方面还相对落后. 作为卫星遥感的一个重要应用领域——中国全境的环境变化遥感, 如何从卫星遥感数据中获取有用信息, 还存在许多重大挑战. 应对这一挑战首先要解决一个基本问题, 即卫星遥感到底能有效监测哪些人们关注的环境变化? 而没有对所有人们关注的环境变化都做全面系统的试验研究, 又不可能圆满解答这个问题.

1 环境变化遥感的基本内容与方法

环境变化的空间尺度小到一个水塘、一块田地、一个社区或一个小流域, 大到一个大陆甚至整个地球或宇宙. 其时间尺度短到秒级瞬间由闪电、地震引起的变化, 分钟至小时级的飓风和洪水造成的变化, 或季节性与年际的植被变化, 长到成百上千年的种群演替, 甚至百万年以上计的大陆漂移, 物种兴衰. 图 1 概括了环境在环境变化驱动力的作用下发生演变, 引起人类与生态系统变化, 最后又对环境变化的人为驱动力产生反馈的过程. 遥感技术在这个过程中各个环节的特定时空尺度上都可能发挥重要作用.

表 1 把遥感有可能探测的环境变化按 6 大类进行初步归类, 供大家增删或细化. 这是一个期望清单, 要达到有效监测表里提到的变化, 还需要做大量的研究. 地表面以下的环境变量一般难于用遥感探测, 这里没有包括进来. 当然, 地下水位的高度和地下水丰富度变化, 可以通过重力或植被长势变化间接估测[9,10].

表 1 在细分类型中列出的种类、火迹地、水体、不透水层、冰雪覆盖等很多定性的变化与土地利用和土地覆盖变化(land-use and land-cover change, LUCC)有关. 甚至有人把这个领域称为土地变化科学[11]. 土地利用与土地覆盖变化作为地表的表现通过土地利用承接着人类活动驱动力, 通过土地覆盖作用于自然环境系统(图2). 图 2 中的指向只是简单反映主要的因果关系, 实际过程应是多指向的. 图中的内容也做了简化. 遥感监测土地覆盖与土地利用变化在理解和模拟人类活动及自然过程, 认识两者之间的相互作用方面具有重要作用.

遥感应用于 LUCC 的监测与制图有广泛研究. 这类变化的遥感识别一般通过确定阈值或者分类的方法进行[12~16]. 多数其他变化类型是可定量描述和表达的. 这些变化要么需要通过直接测量得到[17~19], 要么通过统计回归模型估算[20~23]、物理模型反演[24~26]、或通过数据同化的方法得到[27,28]. 随时间变化的幅度可以通过差值、比值、趋势分析和直接变化

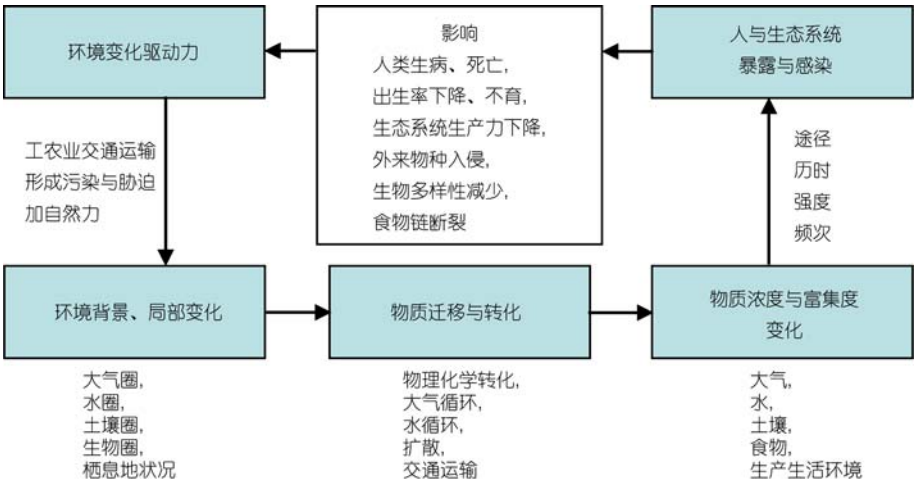


图 1 简化的环境变化过程概念图

实际过程可能是多指向和多向的复杂过程

表 1　遥感有可能探测到的环境变化

环境变化大类	细分的环境变化类型
森林主导的环境	种类, 物候, 高度和郁闭度, 物种丰富度, 树龄, 演替, 气候适应, 气象灾害, 火灾, 病虫害, 污染, 外来物种入侵, 修剪、间伐和采伐, 种植, 生物量, 叶面积指数, 叶绿素含量和氮含量等生化参数, 森林湿地面积等 20 项以上
灌丛草地	种类, 物候, 盖度和高度, 物种丰富度, 演替, 气候适应, 气象灾害, 火, 病虫害, 污染, 放牧, 外来物种入侵, 叶面积指数, 种植, 生产力等 15 项以上
农业	土壤物理化学性质(类型、温度、含水量、有机质含量、重金属含量等), 作物种类, 种植面积, 叶面积指数, 物候, 洪涝, 干旱, 病虫害, 污染, 收获, 火, 产量等 15 项以上
无光合作用地表	不透水层, 建筑密度和高度, 屋顶材料, 路面材料, 裸露地表类型等 6 项以上
水环境	水面高度和淹没范围, 水下地形, 温度, 波浪, 洋流速度, 泥沙含量, 盐度, 浊度, 酸度, 有色溶解有机物含量, 有害藻类含量, 污染物含量, 生物入侵, 物种丰富度, 水生生物生产力, 冻融状态, 封冻时间, 冰盖或雪盖类型、厚度及范围等 18 项以上
大气环境	温度, 湿度, 气压, 风速风向, 大气化学组分柱浓度及垂直分布, 气溶胶光学厚度、大小、形状, 云的高度、盖度、厚度、水汽含量, 闪电位置与频率等 20 项以上

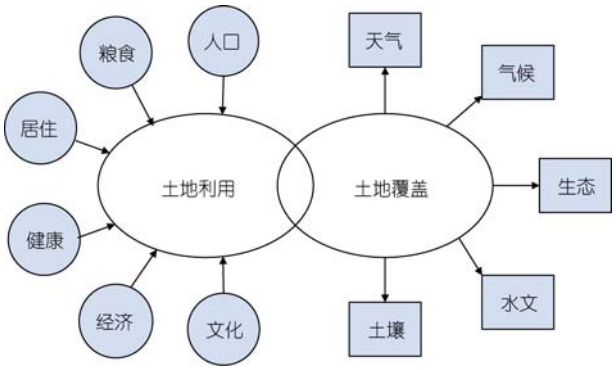


图 2　土地利用和土地覆盖与人类活动驱动力和自然系统的简要关系

识别实现[29,30].

2　中国全境环境变化遥感的进展

与世界其他国家类似, 中国也依赖自下而上的报告系统来汇总环境变化信息. 经过 30 多年的经济快速发展, 中国的环境变化巨大, 在城市化发展速度、碳排放、农业化肥和农药大量施用等方面均处于世界之首. 而我们对环境变化的监测能力远滞后于环境本身的变化速度. 因此, 迫切需要建立准确探测中国全境环境变化的能力, 以卫星遥感为重要技术手段监测中国全境环境变化.

然而, 在 ISI Web of Knowledge 中以“environmental change and China and remote sensing”为关键词进行检索, 我们只得到 154 篇论文(2012 年 2 月 4 日检索). 除了针对中国境内局部地区或城市开展的研究之外, 面向中国全境的仅 10 余篇. 在 LUCC 方面, 中国已经通过人工解译卫星遥感影像完成 20 世纪 80 年代, 1990, 1995, 2000, 2005 年的全国土地利用制图, 并正在完成 2010 年的全国土地利用图. 有了这些数据就可以研究土地利用变化的特征及多重环境效应[31,32]. 在城市扩张方面, 设计并实现了 20 世纪 90 年代中国 LUCC 动态数据库中定量提取城市扩张信息的方法, 分析了中国城市土地利用变化的现代过程, 指出了中国城市扩展的主要时空模式. 建立了主要城市扩展驱动力的定量分析模型, 归纳出中国主要城市扩展的驱动机制差异规律[33]. 在陆地生态系统净初级生产力和固碳能力方面, 利用遥感绿度指数、生态模型和大气反演获得了中国 20 世纪 80~90 年代的净初级生产力和碳源汇分布[34,35]. 通过对 1981~2003 年绿度指数和净初级生产力的趋势分析得出中国土地退化和改良的区域[36]. 近年来, 对特定的生态系统如湿地的类型及分布也通过解译 1990 和 2000 基准年遥感图像完成了全国层面的变化监测[37]. 虽然也开展了利用遥感资料估算全国粮食产量的大量研究, 但是发表较少[38,39]. 中国人口密度从县级空间尺度到 1 km^2 格网的空间细化也可以利用遥感得到的土地利用变化资料来实现[40]. 在湖泊方面, 利用遥感图像解译结合历史时期的地形图确定了近 50 年中国全境大于 1 km^2 的湖泊的演变[41]. 在海洋环境方面, 利用中国海大陆架以上洋区透光层深度测量数据验证了卫星测量数据产品的精度[42].

本专题 7 篇中国环境变化遥感的论文. 涵盖城

市、湿地、土壤水分、森林叶面积指数、中国植被绿度、空气中氮氧化物和臭氧浓度分布随时间的变化. 这里简要介绍其内容及意义.

中国建材消耗进入 21 世纪以来已经达到占世界生产量的一半左右[43], 其中很大部分用于城市和交通建设. 中国城市化在提高人民生活水平的同时, 引起交通堵塞和城市增温[44], 增加空气污染影响居民健康[45,46], 增加土壤重金属污染降低土壤质量[47]. 因此, 到底中国应该如何走城市化道路成为社会关注的焦点[48]. 但是, 对进入 21 世纪中国全境城市扩张的空间分布和发展速度, 至今没有较完整的论述. 王雷等人[49]利用 1990, 2000, 2010 年三期陆地卫星影像主要通过人工解译首次获得了中国(含港澳台地区)所有 660 余座城市的空间分布, 并根据所得建成区面积数据获得了我国的城市化发展速度、城市化占用的农业用地面积、单位 GDP 土地利用强度和按建成区面积计算的城市人口密度. 该数据在建成区面积的统计数据以外, 构成了一个相对独立的城市扩张面积的新数据源, 为全国土地管理和城市规划与管理提供了新的依据.

中国湿地变化研究继续拓展. 牛振国等人[50]不仅通过遥感图像解译增加了 1978 和 2008 年两期新的全国湿地分布图, 还通过多期影像一致性检查和大量野外考察工作, 获得了 1978~2008 年 30 年间 4 个时间基准点(1978, 1990, 2000, 2008 年)的中国湿地类型变化. 我国 1992 年加入国际湿地公约组织, 并且增设了一批湿地保护区. 以 1990 年后湿地变化的遥感监测数据为基础结合其他相关资料, 完成了对全国 91 个国家级湿地保护区的保护效果评价[51]. 在全国层面, 从遥感数据到保护区评价, 设计了一整套技术和方法, 并首次提出国家保护区优先关注排行榜, 为国家实施保护区投入提供了较客观的依据.

中国人均淡水资源远低于世界平均水平. 虽然北方缺水严重, 但是中国粮食生产的重心近些年已经移向北方[52]. 近年来频繁的干旱对中国粮食安全、生态安全甚至是国家安全构成了威胁. 国家虽然拥有大量的水文站和土壤墒情测量点, 但是还远不能准确反映全境水资源时空变化的状况. 卢麾和施建成[53]比较了 3 种根据卫星携带的微波辐射计数据提取的 2003~2010 年 25 km 分辨率地表土壤水的月平均数据, 通过对 3 种数据标准化处理后再集合分析合成了新的土壤水月平均数据集. 和降水资料相比, 土壤水分的状况与植物生长关系更加紧密. 对时间序列数据进行线性拟合得到不同区域变湿或变干的趋势. 结合同期地表温度变化数据, 对中国全境 8 年来土壤湿度和地表温度变化趋势组合进行制图. 结果显示中国东部粮食主产区以南方降湿增温为主, 而北方降湿降温为主, 均对农业生产不利.

用卫星资料计算的植被指数与植被长势呈正相关. 常常被用作计算植被叶面积指数、以及净初级生产力的基础. 在植被稀疏地区, 植被指数与植被覆盖度有较好的线性相关性. 在这种情况下, 一般植被覆盖率越高就越绿. 因此, 人们常用植被绿度代表植被长势. 植被指数成为植被绿度的替代指标. 分析中国植被指数时空变化特征的报告较多, 但使用的资料一般是 2003 年以前的. 还没有 21 世纪以来中国绿度变化特征的分析报告. 刘爽和宫鹏[54]利用 2000~2010 年 500 m 的月植被指数最大值合成数据得到 4~8 月生长季植被指数的最大值, 进行 11 年的趋势分析. 结果发现中国整体上在变绿, 特别是荒漠地区的面积呈减少趋势. 局部农业地区绿度变差的区域与城市化扩张[49]有较好的对应关系.

叶面积指数是表征生态系统状况与生产力的一个重要指标, 也是计算生态系统净初级生产力乃至生态系统碳平衡的基础. 利用遥感数据提取叶面积指数经历了基于各种植被指数的经验回归模型[55]到基于辐射传输模型的反演模型的发展过程. 柳艺博等人利用基于 4-尺度几何光学的叶面积指数反演[56]和叶片聚集度反演方法[57], 生成了中国 2000~2010 年每 8 天的 500 m 分辨率的森林叶面积指数[58]. 用 6 个森林样区的实地观测数据与 30 m 分辨率遥感数据结合估算的叶面积指数对其进行了验证. 样点验证的 R^2 在 0.69~0.80 之间. 这是迄今为止覆盖中国全境的分辨率最高且质量可靠的长时间序列森林叶面积指数数据. 2000~2010 年的趋势分析表明, 森林叶面积指数在中国西部、浙江、福建局部和广东局部有所减少, 在其他地区总体呈上升趋势. 将全国森林平均叶面积指数在 2001 和 2009 年出现偏低的现象归因为高温干旱、低温阴雨和洪涝等异常气候的影响.

随着中国经济发展, 大气污染总体上呈恶化趋势. 近年来, 作为一种新兴的方法, 对空气质量的遥感观测越来越受到重视[59~64]. 张强等人[65]收集了利用卫星数据反演的中国地区 1996~2010 年氮氧化物浓度数据产品, 并分析其全国范围的变化趋势. 发现

中国的高浓度氮氧化物分布区不仅出现在大城市, 中等城市也呈不断增高的趋势, 而且连片范围越来越大. 新出现的高浓度分布区超出了国家环境保护部规划的重点治理区域范围. 这一发现为环保部十二五期间制定控制氮氧化物排放的政策提供了新信息. 氮氧化物是近地面污染物臭氧的前体物之一. 沈路路和王聿绚[66]收集了利用 Aura 卫星搭载的对流层辐射光谱仪数据反演的月平均臭氧浓度产品, 分析了中国华北和华南对流层 3 个不同高度以及西部 2 个高度的臭氧浓度在2005~2010年的变化. 结果显示臭氧浓度的季节性变化具有地区差异. 臭氧浓度年际变化在华北和西部地区各个高度均呈现增高的趋势, 尤以华北地区增加速度最快. 而华南地区臭氧浓度变化缓慢, 近地面臭氧浓度甚至略有降低. 由卫星遥感得到的这些差异对于我们进一步了解控制我国对流层臭氧分布的自然与人为成因具有科学意义.

虽然所用资料、应用目的有所不同, 本专题中数篇文章的资料和结果之间具有一定相互佐证或可比性. 通过对同期气象站点的气温降雨数据分析发现中国2000~2010年气温总体有所升高, 但是年降雨总量变化升降参半. 但是从刘爽和宫鹏[54]文中图 6, 大致可见中国北方大部分地区趋于变湿润, 全国变干的区域有新疆大部、西藏东南、云南、南方丘陵地区、宁夏、河南和内蒙古东南部. 由于降水还要受到重力驱动的流域内部再分配, 所以降雨趋势不能完全解释植被的生长状况. 尽管如此, 柳艺博等人[58]文中图 4 仅局限于森林区域, 在黑龙江、河北北部、陕西、山西、湖北、重庆、贵州、广西、海南和台湾叶面积指数增加趋势明显. 这与文献[54]中图 2 有较一致的对应关系. 这两项研究用了同期同种卫星遥感数据. 有研究指出江苏森林面积大幅增加[67], 但是在文献[54,58]中都无法探测到. 由于文献[54,58]使用的数据分辨率为 500 m, 而且文献[58]中的森林分布数据来自欧洲根据2000年1 km分辨率卫星遥感数据制图, 而江苏新增造林可能地块小或林龄低, 观测不到是可以理解的. 中国大规模植树造林, 但是国家没有发表较高分辨率的森林分布图, 而国外对中国森林分布的制图误差较大, 所以中国学术研究必须有自己较精细的森林分布图. 与文献[54]的图 6 相比, 卢麾和施建成[53]基于 2003~2010 年微波遥感数据获得的年均地表土壤水分数据总体上一致, 但是趋于干旱的范围更大, 包含了长江中下游及华东、华北地区. 这是中国的主要粮食产区. 2004 年以来在这么大范围的变干趋势下, 中国粮食产量官方数据却报告连续 8 年增产. 在文献[54]的图 2 中, 中国粮食主产区确实相应地变绿. 我们知道, 华北地区农业用水主要靠地下水灌溉, 而且2000~2010年中国粮食主产区除河南以外, 以变湿为主, 为什么在微波数据中没有体现? 有必要单独分析文献[53]中 3 种土壤水分提取的数据的时空分布趋势. 如果文献[58]中的叶面积指数研究能够扩大到农业区或全国全境, 又会是什么结果呢? 这些问题都值得深入研究. 只有进一步提高环境变量遥感反演精度, 深入分析我国气候、水文循环和土壤水分布, 才可能明确全国总体绿度变化的驱动机制. 值得一提的是, 由于遥感信息提取大尺度(>500 m 格网尺度)验证的高度困难性, 除了柳艺博等人[58]仅在 6 个样区验证了森林叶面积指数估算的精度之外, 这里讨论的其他几篇论文以及本专题中 2 篇大气组分浓度的论文均没有在中国境内进行验证. 由于数据产品来自国外, 虽然算法或许在别处做过一定的验证, 对中国的适用性还需进一步研究.

3 环境变化遥感展望

徐冠华等人[68]根据中国全球变化研究的状况提出需要进一步加强全球变化与人类活动的关系、地球系统模式、地球系统观测与全球变化经济学 4 个方面的研究. 一年多之后徐冠华等人[69]呼吁 21 世纪中国地学发展必须立足中国走向世界, 指出中国科学家必须加强宏观视野, 注重多学科交叉和定量化研究, 必须加强数据共享. 这些建议都对中国环境变化遥感研究有指导意义.

首先, 深化中国环境变化遥感研究的方法体系如图3所示, 实验观测的目的, 是为了改进科学认识. 这在环境变化遥感研究中经常用到, 而且也有可能从观测形成新认识新理论[70~72], 或通过观测数据推动新技术的发展[73]. 但是, 目前我们运用模拟与预测技术不够. 诚然, 观测[53,74~76]或模拟结果[77]都有可能出现偏差, 但是, 模型与观测的结合常常更有助于形成新认识[78,79]. 此外, 把环境变化遥感研究的结果与环境政策对接的研究也需要加强. 本专题中多篇论文对环境政策与国土规划有参考价值[49,50,53,65].

其次, 大力拓展中国环境变化遥感应用领域. 对比图 1 和表 1 可以看出在全国层面许多指标还没有开展监测研究. 以表 1 中研究较多的森林为例, 物种丰

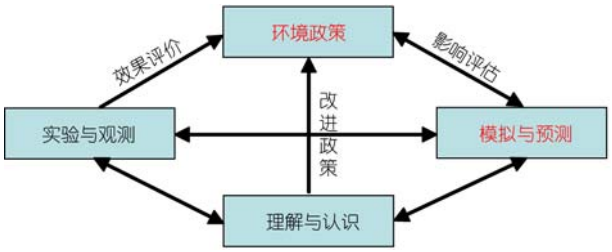


图 3 环境变化遥感的方法体系

富度、树龄、入侵物种、森林湿地、气候适应等都是研究空白. 而对于全国层面的水环境污染的遥感研究也存在不少空白. 对于图 1 中环境变化有可能引起的最重要的影响——公众健康, 除了禽流感、血吸虫病和疟疾等少数病种之外[80~83], 在全国层面的研究很少[84,85]. 大气污染不仅影响城市居民而且严重影响农村居民的健康[86], 而农村地区恰恰是定点监测的薄弱环节, 遥感应该在广大农村地区空气质量监测中发挥不可替代的作用. 在关系到粮食安全的诸多指标中, 我国至今没有拿出一个遥感监测的农地面积数据. 使得许多面向全国的农业政策研究只能依赖争议很大的国家统计数字[87].

第三, 面向新的应用, 加强遥感信息提取算法研究. 遥感技术本身还需要继续完善算法. 环境变化遥感依靠的卫星遥感技术多数来自极轨卫星平台, 一次过境仅能获取带宽 10~2400 km 的条带影像. 对于中国或更大的区域, 常常需要长时间获取的多景影像拼接而成. 加上云雾及地形等对影像辐射测量的影响, 特别是针对中国近期发射的卫星所获得的影像有较高的获取、处理和纠正难度. 在遥感数据处理和纠正的基础上, 还应加强研究多种不同类型的数据集成应用, 减少监测全境各种生态系统类型变化动态的不确定性[88]. 此外, 还应加强与国内外其他学科领域的相关学者合作, 设计新型信息提取和精度验证的方法和技术, 进一步改进参数提取的算法精度.

最后, 环境变化遥感研究必须从注重试验和发展技术再进一步. 力争更多的技术和方法达到实用化程度. 力争像文献[89]那样在国际科学界争论喜马拉雅冰川进退面前及时提供有助于解决这一科学难题的遥感观测证据. 拓展和深化中国环境变化遥感的应用空间, 大有可为.

致谢 南京大学国际地球系统科学研究所居为民、清华大学地球系统科学研究中心王聿绚和张强、中国科学院遥感应用研究所牛振国等提出修改意见.

参考文献

1 Leemans R, Asrar G, Busalacchi A, et al. Developing a common strategy for integrative global environmental change research and outreach: The Earth System Science Partnership (ESSP) Strategy Paper. Curr Opin Env Sust, 2009, 1: 4–13
2 慈龙骏. 极端干旱荒漠的“荒漠化”. 科学通报, 2011, 56: 2616–2626
3 Cracknell A P, Varotsos C A. New aspects of global climate-dynamics research and remote sensing. Int J Remote Sens, 2011, 32: 579–600
4 Li J F, Wang M, Ho Y. Trends in research on global climate change: A science citation index expanded-based analysis. Global Planet Change, 2011, 77: 13–20
5 FAO. Global Forest Land-Use Change from 1990 to 2005. 2011
6 FAO. State of the World’s Forests, 2011. ISBN 978-92-5-106750-5 Rome, Italy. 2011. 179
7 Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. Science, 2003, 300: 1560–1563
8 Behrenfeld M J, O’Malley R T, Siegel D A, et al. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. Nature, 2006, 444: 752–755
9 Rodell M, Velicogna I, Famiglietti J S. Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature, 2009, 460: 999–1002
10 Gong P, Miao X, Ge S K, et al. Water table level in relation to EO-1 ALI and Landsat ETM+ data over a mountainous meadow in California. Can J Remote Sens, 2004, 32: 691–696
11 Turner B L, Lambin E F, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 102: 20666–20671
12 Lu D, Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. Int J Remote Sens, 2007, 28: 823–870
13 Tucker C J, Townshend J R G, Goff T E. African land-cover classification using satellite data. Science, 1985, 227: 369–375

14 Pu R L, Li Z Q, Gong P, et al. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire data across the North America from NOAA/AVHRR data. Remote Sens Environ, 2007, 108: 198–208
15 Clinton N, Gong P, Jin Z Y, et al. Meta-prediction of Bromus tectorum invasion in Central Utah, USA. Photogram Eng Remote Sens, 2009, 75: 689–701
16 Herold M, Mayaux P, Woodcock C E, et al. Some challenges in global land cover mapping: An assessment of agreement and accuracy in existing 1 km datasets. Remote Sens Environ, 2008, 112: 2538–2556
17 Gong, P, Sheng Y W, Biging G. 3D model-based tree measurement from high resolution aerial imagery. Photogram Eng Remote Sens, 2002, 68: 1203–1212
18 Chen Q, Gong P, Baldocchi D, et al. Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. Photogram Eng Remote Sens, 2007, 73: 175–185
19 Sun G Q, Ranson K J, Guo Z, et al. Forest biomass mapping from lidar and radar synergies. Remote Sens Environ, 2011, 115: 2906–2916
20 Lo C P, Welch R. Chinese urban-population estimates. Ann Assoc A, 1977, 67: 246–253
21 Hansen M C, DeFries R, Townshend J. Towards an operational MODIS continuous field of percent tree cover algorithm: Examples using AVHRR and MODIS data. Remote Sens Environ, 2002, 83: 303–319
22 Gong P, Pu R L, Miller J R. Coniferous forest leaf area index estimation along a transect in Oregon using Compact Airborne Spectrographic Imager data. Photogram Eng Remote Sens, 1995, 61: 1107–1117
23 Michishita R, Gong P, Xu B. Spectral mixture analysis for bi-sensor wetland mapping using Landsat TM and Terra MODIS data. Int J Remote Sens, 2012, 33: 3373–3401
24 Li X W, Gao F, Wang J D. A priori knowledge accumulation and its application to linear BRDF model inversion. J Geophys Res, 2001, 106: 11925–11935
25 Liang S L, Strahler A H. An analytic brdf model of canopy radiative-transfer and its inversion. IEEE T Geosci Remote, 1993, 31: 1081–1092
26 Shi J C, Jackson T, Tao J, et al. Microwave vegetation indices for short vegetation covers from satellite passive microwave sensor AMSR-E. Remote Sens Environ, 2008, 112: 4285–4300
27 Liang S L. Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc, 2004. 534
28 Qin J, Liang S L, Liu R G, et al. A weak constraint based data assimilation for estimating surface turbulent fluxes. IEEE Geosci Remote Sens, 2007, 4: 649–653
29 Lu D S, Mausel P, Brondizio E, et al. Change detection techniques. Int J Remote Sens, 2004, 25: 2365–2407
30 Liu D S, Cai S S. A spatial-temporal modeling approach to reconstructing land-cover change trajectories from multi-temporal satellite imagery. Ann Assoc A, 2011, doi: 10.1080/00045608.2011.596357
31 Liu J Y, Liu M L, Tian H Q, et al. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data. Remote Sens Environ, 2005, 98: 442–456
32 刘纪远, 邓祥征. LUCC 时空过程研究的方法进展. 科学通报, 2009, 54: 3251–3258
33 Liu J Y, Zhan J Y, Deng X Z. The Spatio-temporal patterns and driving forces of urban land expansion in China during the economic reform era. AMBIO, 2005, 34: 450–455
34 Piao S L, Fang J Y, Ciais P. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. Nature, 2009, 458: 1009–1013
35 Feng X, Liu G, Chen J M, et al. Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing. J Environ Manage, 2007, 85: 563–573
36 Bai Z G, Dent D. Recent land degradation and improvement in China. AMBIO, 2009, 38: 150–156
37 宫鹏, 牛振国, 程晓, 等. 中国 1990 和 2000 基准年湿地变化遥感. 中国科学: 地球科学, 2010, 40: 768–775
38 Sun J L. Dynamic monitoring and yield estimation of crops by mainly using the remote sensing technique in China. Photogram Eng Remote Sens, 2010, 66: 645–650
39 Xiao X M, Liu J Y, Zhuang D F, et al. Uncertainties in estimates of cropland area in China: A comparison between an AVHRR-derived dataset and a Landsat TM-derived dataset. Global Planet Change, 2003, 37: 297–306
40 Zhuang D F, Liu M L, Deng X Z. Spatialization model of population based on dataset of land use and land cover change in China. Chin Geogr Sci, 2002, 12: 114–119
41 Ma R H, Duan H T, Hu C M, et al. A half-century of changes in China's lakes: Global warming or human influence? Geophys Res Lett, 2010, 37: L24106
42 Shang S L, Lee Z P, Wei G M. Characterization of MODIS-derived euphotic zone depth: Results for the China Sea. Remote Sens Environ, 2011, 115: 180–186
43 Fernandez J E. Resource consumption of new urban construction in China. J Ind Ecol, 2007, 11: 99–115

44 Yang X C, Hou Y L, Chen B D. Observed surface warming induced by urbanization in east China. J Geophys Res, 2011, 116: D14113
45 Zhao Y, McElroy M B, Xing J, et al. Multiple effects and uncertainties of emission control policies in China: Implications for public health, soil acidification, and global temperature. Sci Total Environ, 2011, 409: 5177–5187
46 Zhang F Y, Wang W Y, Lv J M. Time-series studies on air pollution and daily outpatient visits for allergic rhinitis in Beijing, China. Sci Total Environ, 2011, 409: 2486–2492
47 Zhang J, Pu L J, Peng B Z, et al. The impact of urban land expansion on soil quality in rapidly urbanizing regions in China: Kunshan as a case study. Environ Geochem Health, 2011, 33: 125–135
48 Siciliano G. Urbanization strategies, rural development and land use changes in China: A multiple-level integrated assessment. Land Use Policy, 2012, 29: 165–178
49 王雷, 李丛丛, 应清, 等. 中国 1990–2010 城市扩张遥感制图. 科学通报, 2012, 57: 1388–1399
50 牛振国, 张海英, 王显威, 等. 1978–2008 年中国湿地类型变化. 科学通报, 2012, 57: 1400–1411
51 郑姚闽, 张海英, 牛振国, 等. 中国国家级湿地自然保护区保护成效初步评估. 科学通报, 2012, 57: 207–230
52 Yu C Q, Gong P, Yin Y Y. China's water crisis needs more than words. Nature, 2011, 470: 307
53 卢麾, 施建成. 基于遥感观测的 21 世纪初中国区域地表土壤水及其变化趋势分析. 科学通报, 2012, 57: 1412–1422
54 刘爽, 宫鹏. 2000~2010 年中国地表植被绿度变化. 科学通报, 2012, 57: 1423–1434
55 Gong P, Pu R L, Biging G S, et al. Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion hyperspectral data. IEEE T Geosci Remote, 2003, 41: 1355–1362
56 Deng F, Chen J M, Plummer S, et al. Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite imagery. IEEE T Geosci Remote, 2006, 44: 2219–2229
57 Zhu G L, Ju W M, Chen J M, et al. Foliage clumping index over China's landmass retrieved from the MODIS BRDF parameters product. IEEE Trans Geosci Remote, 2011, doi: 10.1109/TGRS.2011.2172213
58 柳艺博, 居为民, 陈镜明. 2000~2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征. 科学通报, 2012, 57: 1435–1445
59 Wang Z F, Chen L F, Tao J, et al. Satellite-based estimation of regional particulate matter (PM) in Beijing using vertical-and-RH correcting method. Remote Sens Environ, 2010, 114: 50–63
60 Cheng T H, Gu X F, Xie D H, et al. Simultaneous retrieval of aerosol optical properties over the Pearl River Delta, China using multi-angular, multi-spectral, and polarized measurements. Remote Sens Environ, 2011, 115: 1643–1652
61 Wang X L, Mannaerts C M, Yang S T, et al. Evaluation of soil nitrogen emissions from riparian zones coupling simple process-oriented models with remote sensing data. Sci Total Environ, 2010, 408: 3310–3318
62 Li Z Q, Chen H, Cribb M, et al. Preface to special section on east Asian studies of tropospheric aerosols: An international regional experiment (EAST-AIRE). J Geophys Res, 2007, 112: D22S00
63 Wang S W, Streets D G, Zhang Q, et al. Satellite detection and model verification of NO(x) emissions from power plants in Northern China. Environ Res Lett, 2010, 5: 044007
64 Wang Y, Zhang Y, Hao J, et al. Seasonal and spatial variability of surface ozone over China: Contributions from background and domestic pollution. Atmos Chem Phys, 2011, 11: 3511–3525
65 张强, 耿冠楠, 王斯文, 等. 卫星遥感观测中国 1996~2010 年氮氧化物排放变化. 科学通报, 2012, 57: 1446–1453
66 沈路路, 王聿绚. 基于 TES 观测的 2005~2010 年间中国 3 个代表性区域对流层臭氧浓度变化分析. 科学通报, 2012, 57: 1454–1461
67 Shi L, Zhao S Q, Tang Z Y, et al. The changes in China's forests: An analysis using the forest identity. PLOS One, 2011, 6: e20778
68 徐冠华, 宫鹏, 邵立勤, 等. 中国全球变化研究急需加强的几个问题. 见: 宫鹏, 编. 全球变化研究评论. 北京: 高等教育出版社, 2010. 1–11
69 徐冠华, 鞠洪波, 何斌, 等. 21 世纪中国地球科学发展: 立足中国, 走向世界. 科技日报, 2010 年 8 月 1 日
70 Behrenfeld M J. Abandoning Sverdrup's critical depth hypothesis on phytoplankton blooms. Ecology, 2010, 91: 977–989
71 Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. Nature, 1997, 386: 698–702
72 Samanta A, Costa M H, Nunes E L, et al. Comment on "drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009". Science, 2011, 333: 1093
73 Liang L, Xu B, Chen Y L, et al. Combining spatial-temporal and phylogenetic analysis approaches for improved understanding on global H5N1 transmission. PLoS ONE, 2010, 5: e13575
74 White M A, de Beurs K M, Didan K, et al. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. Global Change Biol, 2009, 15: 2335–2359
75 Garrity S R, Bohrer G, Maurer K D, et al. A comparison of multiple phenology data sources for estimating seasonal transitions in deciduous forest carbon exchange. Agric Forest Meteorol, 2011, 151: 1741–1752

76 Jones M O, Jones L A, Kimball J S, et al. Satellite passive microwave remote sensing for monitoring global land surface phenology. Remote Sens Environ, 2011, 115: 1102–1114
77 Zhao M S, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. Science, 2010, 329: 940–943
78 Sellers P J, Meeson B W, Hall F G, et al. Remote-sensing of the land-surface for studies of global change—models, algorithms, experiments. Remote Sens Environ, 1995, 51: 3–26
79 Piao S L, Ciais P, Friedlingstein P, et al. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. Nature, 2008, 451: 49–U3
80 Fang L Q, de Vlas S J, Liang S, et al. Environmental factors contributing to the spread of avian influenza in mainland China. PLOS One, 2008, 3: e2268
81 Spear R C, Seto E Y W, Carlton E J, et al. The challenge of effective surveillance in moving from low transmission to elimination of schistosomiasis in China. Int J Parasitol, 2011, 41: 1243–1247
82 Zhou X N, Yang G J, Yang K, et al. Potential impact of climate change on schistosomiasis transmission in China. Am J Trop Med Hyg, 2008, 78: 188–194
83 Yang G J, Gao Q, Zhou S S, et al. Mapping and predicting malaria transmission in the People's Republic of China using integrated biology-driven and statistical models. Geospat Health, 2010, 5: 11–22
84 Zhang J F, Mauzerall D L, Zhu T, et al. Environmental health in China: Progress towards clean air and safe water. Lancet, 2010, 375: 1110–1119
85 Gong P, Liang S, Carlton E, et al. Urbanization and health in China. Lancet, 2012, 379: 843–852
86 Smith K R, McCracken J P, Weber M W, et al. Effect of reduction in household air pollution on childhood pneumonia in Guatemala (RESPIRE): A randomised controlled trial. Lancet, 2011, 378: 1717–1726
87 Fan M S, Shen J B, Yuan L X, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China. J Environ Bot, 2012, 63: 13–24
88 Lv Y H, Fu B J, Wei W. Major ecosystems in China, dynamics and challenges for sustainable management. Environ Manage, 2011, 48: 13–27
89 Scherler D, Bookhagen B, Strecker M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. Nat Geosci, 2011, 4: 156–159