

1990-2015年中国工矿用地扩张及其对粮食安全的潜在影响

刘爱琳^{1,2}, 匡文慧^{1*}, 张弛³

(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重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要:中国城市化和工业化进程所带来的粮食安全问题一直是政府和学术界关注的焦点。中国近25年来快速的城镇化与工业化导致耕地资源减少和环境污染加剧, 对国家粮食安全和农业可持续发展产生一定影响。本文基于中国土地利用/覆盖变化最新解译结果和中国分县粮食产量数据, 重建了中国1 km分辨率的粮食产量空间数据, 分析了中国1990-2015年工矿用地扩张及其对粮食产能的影响。结果表明: 中国工矿用地面积在1990-2015年间增长了326%, 扩张速率从1990-2000年的288 km²/a增加到2000-2010年的1482 km²/a, 近5年(2010-2015年)扩张速率最快, 达2600 km²/a。过去25年间工矿用地扩张导致耕地面积减少1.7×10⁴ km², 直接导致粮食产能损失约6.49 Mt(10⁶ t), 因工矿用地扩张可能会对周边耕地污染等间接影响的粮食产量达83.20 Mt。经评估, 国家工矿用地扩张对粮食产能潜在影响总体上是当前粮食总产能的17%。在空间分布特征方面, 工矿用地扩张对粮食产能的直接影响呈现由东部沿海地区向西北地区逐渐减小趋势; 间接影响在中部和西部地区相对较大。

关键词: 工矿用地扩张; 耕地资源; 粮食安全; 遥感; 中国

1 引言

国家粮食安全事关国民经济可持续发展和社会的和谐稳定。中国作为人口大国, 人均耕地面积不足1.38亩, 仅占世界人均耕地的40%。21世纪以来, 受耕地资源锐减、水资源短缺和气候变化的影响, 国家粮食安全问题正面临着前所未有的挑战。快速的城镇化和工业化会占用耕地资源, 由此会对国家粮食安全产生影响(徐新良等, 2007; 刘纪远等, 2014)。除此之外, 工矿用地扩张会导致土壤重金属污染和土地退化加剧, 从而会影响农作物产量和质量(徐海亚等, 2015), 由此成为国家粮食安全面临的更为重要的问题(Larson, 2013; Liu et al, 2013, Huang等, 2015)。随着人口的不断增长以及人民生

活水平的提高, 对粮食的需求不断增加, 导致国家对粮食的供应和需求矛盾更加突出(Liu et al, 2013)。因此, 城市和工矿用地扩张对国家粮食安全的影响成为国内外学者关注的热点问题(Giese, 1998; Liu et al, 2008; Stephenson, 2008; 孔祥斌等, 2008; 刘玉等, 2010; Lu et al, 2015)。

伴随着快速的城镇化, 城市用地扩张对耕地资源和粮食产能产生重要影响。基于统计数据分析表明, 1986-2003年中国城市用地扩张占用耕地面积达290万hm²(Chen, 2007); 基于遥感模型估测, 1990-2000年中国城市扩张导致的农田生产力减少约占耕地面积减少损失总量的50%(闫慧敏等, 2012); 1990-2010年中国耕地面积减少造成农田光温生产力净减少5713万t(王静等, 2013; 刘洛等,

收稿日期: 2016-09; 修订日期: 2017-03。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB954302) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program), No.2014CB954302]。

作者简介: 刘爱琳(1990-), 女, 河北承德人, 硕士生, 从事土地利用变化对生态环境影响研究, E-mail: liual.14s@igsnnr.ac.cn。

通讯作者: 匡文慧(1978-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 副研究员, 主要研究方向为土地利用/覆盖变化与城市生态环境, E-mail: kuangwh@igsnnr.ac.cn。

引用格式: 刘爱琳, 匡文慧, 张弛. 2017. 1990-2015年中国工矿用地扩张及其对粮食安全的潜在影响[J]. 地理科学进展, 36(5): 618-625. [Liu A L, Kuang W H, Zhang C. 2017. Potential impacts of industrial land expansion on food security in China, 1990-2015[J]. Progress in Geography, 36(5): 618-625.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.05.009

2015)。Pei等(2013)评估,2000–2006年中国由于城市扩张,导致农田生产力每年约减少5.88%,损失速度为 $0.31 \times 10^{-3} \text{ Pg} \cdot \text{C/a}$ 。生态系统净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)作为评价生态系统供给服务的重要指标,能够有效地反映城市化和工业化对农田生态系统生产力的影响。Imhoff等(2004)利用两种遥感数据和陆地生态系统碳循环模型,评估美国城市扩张对NPP的影响,指出城市扩张导致NPP每年减少0.04 Pg。Milesi等(2003)利用遥感数据,研究发现美国南部城市扩张导致其NPP每年平均减少0.4%。当前学者更多集中于城市化对耕地资源和粮食产能影响研究,对于工矿业发展对粮食生产的影响研究相关文献相对较少。

工矿用地扩张除直接导致耕地资源减少外,会以土壤、水体污染等形式对粮食生产产生间接的影响(Liu et al, 2013; Xu et al, 2014)。评估中国工业用地周边有29%的土壤已经受到污染,复垦的废弃工业用地有35%出现了土壤污染(环境保护部等, 2014),而且,工矿用地扩张导致的耕地占用直接影响和由于土壤等污染引起的间接影响比城市对粮食安全产生的影响更加突出(Ma, 2010)。随着中国城市化和工业化加速,21世纪以来,中国经历了更快的工矿用地扩张,其中21世纪初10年扩张速率是上世纪90年代扩张速率的5.78倍(Kuang et al, 2016)。中国近25年来,加速的工业化进程,对国家粮食安全影响程度如何?特别是21世纪以来西部大开发等政策驱动下,影响的时空差异如何? 这些问题是当前需要解决的重要科学命题。

针对上述科学问题,本研究基于遥感解译的中国土地利用/覆盖数据集(National Land Use Datasets of China, NLUD-China),分析了1990–2015年中国工矿用地扩张的时空特征,评估了国家工矿用地扩张对粮食安全带来的直接和间接影响。本研究可以为优化工矿用地布局和保障国家粮食安全提供科学参考。

2 数据源

本文使用的1990、1995、2000、2005、2010和2015年中国1 km分辨率工矿用地成分数据来源于中国土地利用/覆盖变化(NLUD-China)数据集,一级分类综合精度达到94.3%以上,耕地和工矿用地分类精度达97%以上(刘纪远等, 2014; Kuang et al,

2016)。本文中的工矿用地定义指独立于城镇以外的厂矿、大型工业区、油田、盐场、采石场等用地。1990–2014/2015年中国县级粮食产量数据主要从中国经济与社会发展统计数据库(<http://tongji.cnki.net/>)获得,部分县域2015年粮食产量数据缺少,用2014年的粮食产量来代替计算。生态系统净初级生产力(NPP)计算使用的1990–2015年年平均降水量(MAP)数据来自于WorldClim(<http://worldclim.org/version2>)。

3 研究方法

为揭示国家不同时段工矿用地扩张区域差异及对粮食安全的影响。首先,基于各时期的中国耕地空间分布数据,依据县级粮食产量和中国耕地NPP计算出每个1 km网格的粮食产能;然后,计算出因工矿用地占用耕地直接导致的粮食生产的损失(称为直接损失),然后计算因工矿用地以污染等方式对周边耕地粮食产能产生的影响(称为间接损失)。最后,采用国家经济地理区划方案(Kuang et al, 2016),充分考虑国家不同经济发展水平和区域发展政策的影响,将中国分为4个亚区,其中,西部地区面积最大,占中国陆地总面积的71%;沿海地区面积最小,占中国陆地总面积的9.38%。

3.1 构建1 km分辨率的中国粮食产能分布图

为了将收集到的各期县级粮食产量数据分配到耕地1 km分辨率空间网格图上,假设同一个县域内耕地粮食产量的空间格局同由气候决定的潜在耕地生产力呈正相关。在此假设的基础上,可计算出每个1 km网格点(i)的粮食产能 $LSCL_i$:

$$LSCL_i = \frac{Crop}{\sum_{i=1}^n TNPP_i} \times TNPP_i \quad (1)$$

式中: $Crop$ 为某县的粮食总产量, n 代表该县1 km耕地的网格数, $TNPP_i$ 为网格点 i 的潜在生产力。本研究采用Del Grosso等(2008)的NCEAS潜在NPP模型反演得到中国潜在NPP($TNPP$),即输入WorldClim的1990–2015中国1 km年平均降水量(MAP)数据(<http://worldclim.org/version2>),计算出中国粮食生产的潜在NPP:

$$TNPP = 6116 \times [1 - \exp(-6.05 \times 10^{-5} \times MAP)] \quad (2)$$

3.2 工矿用地扩张对粮食安全的影响评估方法

研究表明,工矿用地可能会对周边4~20 km的

土壤造成污染(Ma, 2010; Nanos et al, 2012)。本研究保守估算工矿污染会影响到周边 5 km 范围,即工矿用地周边 5 km 范围内耕地中有 29%的土壤受到污染。废弃工矿用地复垦后有 35%的粮食产量存在污染(环境保护部等, 2014)。在此基础上通过对各时期工矿用地和耕地进行时空动态叠加和缓冲区分析,评估工矿用地扩张对粮食安全的影响(CropLoss):

$$CropLoss = 35\% \times P1 + 29\% \times P2 + P3 \quad (3)$$

式中: $P1$ 为由工矿用地转化为耕地产出的粮食产量的影响, $P2$ 为工矿用地周边 5 km 范围内耕地的间接粮食产量影响, $P3$ 为工矿用地扩张占用耕地导致的粮食产量的直接影响。

4 结果与分析

4.1 工矿用地扩张时空特征

中国近 25 年工矿用地经历了快速的扩张过程,而且区域差异显著。遥感监测表明,2015 年工矿用地面积为 $39.34 \times 10^3 \text{ km}^2$,其中 75%的面积集中分布在沿海和西部地区。1990–2015 年间,工矿用地扩张面积 $30.09 \times 10^3 \text{ km}^2$,是 1990 年工矿用地面积的 326%(表 1)。

从时间差异特征分析,中国工矿用地扩张速度总体上呈现显著的加速态势,21 世纪的最近 5 年(2010–2015 年)扩张速率最快,为 $2600 \text{ km}^2/\text{a}$,其次为 2000–2010 年,扩张速率为 $1482 \text{ km}^2/\text{a}$;1990–2000 年扩张速率最慢,为 $288 \text{ km}^2/\text{a}$ (图 1)。

从空间差异特征分析,沿海地区 1990–2000 年工矿用地扩张速率为 $148.08 \text{ km}^2/\text{a}$,到 2000–2010 年增至 $715.65 \text{ km}^2/\text{a}$,2010–2015 年为 $445.64 \text{ km}^2/\text{a}$ 。近 25 年工矿用地扩张面积以沿海地区最大,其中最大的省份依次为河北省、山东省和福建省,增长面积分别为 2177 km^2 , 1964 km^2 和 1576 km^2 。

西部地区,2000 年工矿用地面积仅占中国工矿

用地总面积的 20%,自 2000 年“西部大开发”战略实施以后,工矿用地扩张速率显著升高,从 2000–2005 年的 $166.93 \text{ km}^2/\text{a}$ 增至 2005–2010 年的 $451.22 \text{ km}^2/\text{a}$;2010–2015 年中国 60%的工矿用地扩张出现在西部地区。2015 年西部地区工矿用地面积达到 $14.79 \times 10^3 \text{ km}^2$,接近于沿海地区工矿用地面积($14.87 \times 10^3 \text{ km}^2$)。西部地区近 25 年工矿用地扩张面积最大的省份依次为内蒙古、新疆和四川省,增长面积分别为 3119 km^2 , 1844 km^2 和 1333 km^2 。

中部地区受 2004 年中国政府提出“中部崛起”战略政策的影响,中部地区工矿用地的扩张速率相对较快。从 2000–2005 年的 $110.90 \text{ km}^2/\text{a}$ 增至 2005–2010 年的 $523.75 \text{ km}^2/\text{a}$;2010–2015 年的扩张速率为 $463.67 \text{ km}^2/\text{a}$ 。东北地区工矿用地扩张速率最慢,2010–2015 年扩张速度在近 25 年来最快,为 $109.11 \text{ km}^2/\text{a}$ 。

4.2 工矿用地扩张占用耕地时空特征

1990–2015 年中国工矿用地扩张以占用耕地为主,导致耕地面积减少 $16.98 \times 10^3 \text{ km}^2$,约为工矿用地扩张总面积的 56%(图 2)。中部地区是中国的粮食主产区,工矿用地扩张更依赖耕地,在 1990–2015 年间耕地被工矿用地占用面积最多,为全国工矿用地扩张占用耕地总面积的 40%。其中,2005–2010 年间区内耕地被工矿用地占用面积为 2361 km^2 。但在 2010–2015 年间,中部地区耕地被工矿用地占用面积急剧减少,可能是受到 2008 年国家实施的主体功能区政策影响,对农产品主产区内耕地资源进行重点保护。

沿海地区在 1990–2015 年间工矿用地扩张占用耕地面积是全国被工矿用地占用耕地总面积的 24.20%,其中 2000–2015 年间工矿用地扩张占用耕地面积约是 1990–2000 年的 10 倍。西部地区 1990–2015 年工矿用地扩张占用耕地总面积为 $1.08 \times 10^3 \text{ km}^2$,占用耕地面积从 1990–1995 年的 11.80 km^2 增至 2010–2015 年的 691.85 km^2 ,其中四川盆地是工

表 1 1990–2015 年工矿用地扩张速度/(km^2/a)
Tab.1 Rate of industrial land expansion, 1990–2015/(km^2/a)

时段	沿海地区	西部地区	中部地区	东北地区	中国
1990–1995 年	117.50	25.38	78.96	19.61	241.45
1995–2000 年	178.66	27.12	36.37	0.29	242.44
2000–2005 年	650.90	166.93	110.90	33.72	962.45
2005–2010 年	780.39	451.22	523.75	82.82	1838.18
2010–2015 年	445.64	1581.52	463.67	109.11	2599.94

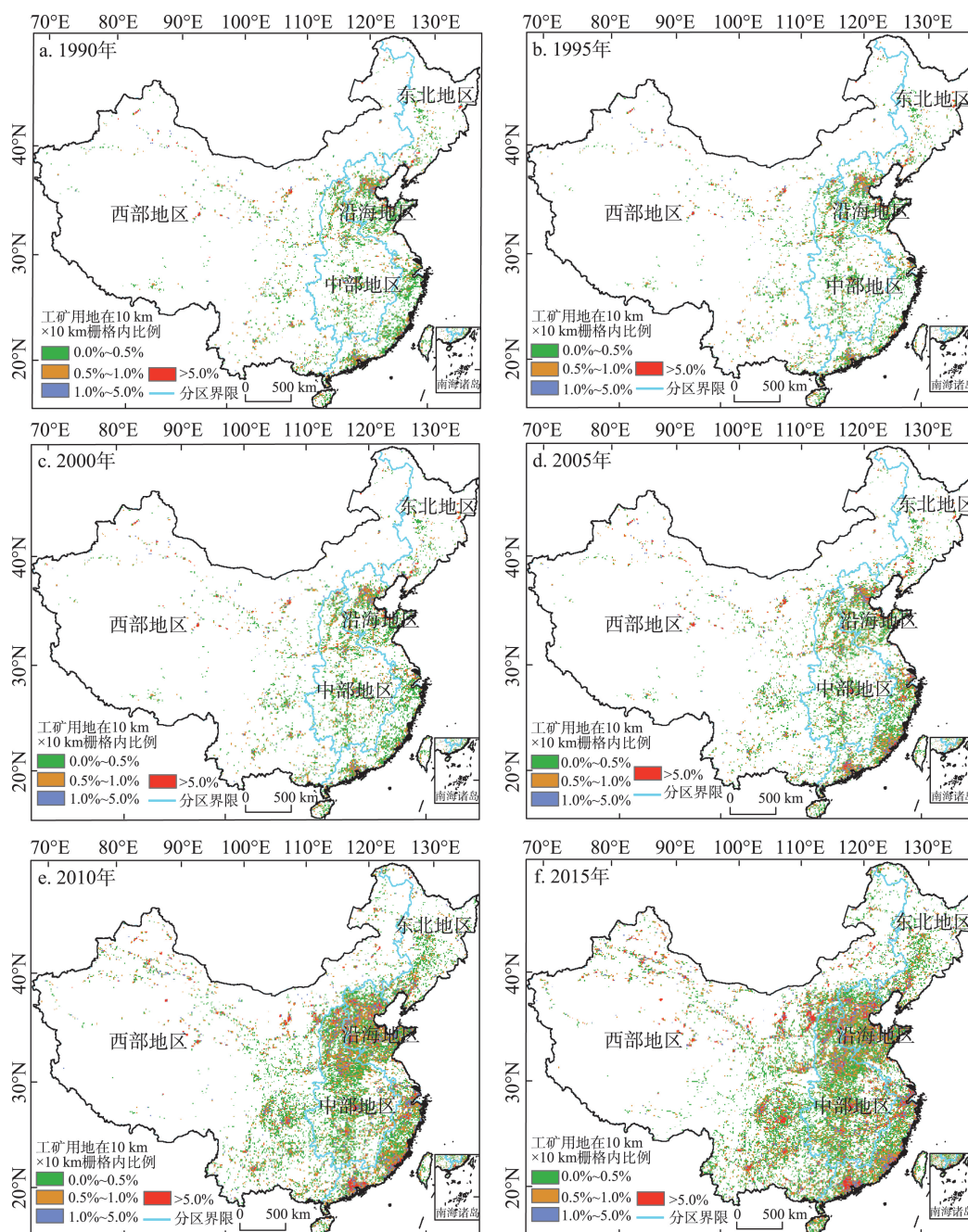


图1 1990-2015年中国工矿用地时空分布

Fig.1 Spatial distribution of industrial land in China, 1990-2015

矿用地增长导致耕地损失的集中分布区域。东北地区在1990-2015年间工矿扩张占用耕地面积为 $4.93 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。沿海地区和中部地区废弃工矿用地存在一定的复垦现象,在1990-2015年间复垦总面积分别为 $1.51 \times 10^3 \text{ km}^2$ 和 $0.69 \times 10^3 \text{ km}^2$ 。

4.3 工矿用地扩张对粮食产能的影响

工矿用地扩张会以占用耕地的方式对粮食产能产生直接影响。1990-2015年期间,工矿用地占

用耕地面积为 $16.98 \times 10^3 \text{ km}^2$,由此带来的当前粮食产能损失为6.49 Mt。由于中国的工矿用地主要集中在粮食产能较高的沿海地区和中部地区,所以在这2个地区损失粮食产能占中国损失粮食总产能的75%,而西部地区 and 东北地区损失的粮食产能相对较小,仅为1.59 Mt。其中,中部地区占用耕地面积最多为 $6.86 \times 10^3 \text{ km}^2$,损失的粮食产能为2.57 Mt,是2015年中国因工矿用地扩张直接损失粮食总产能

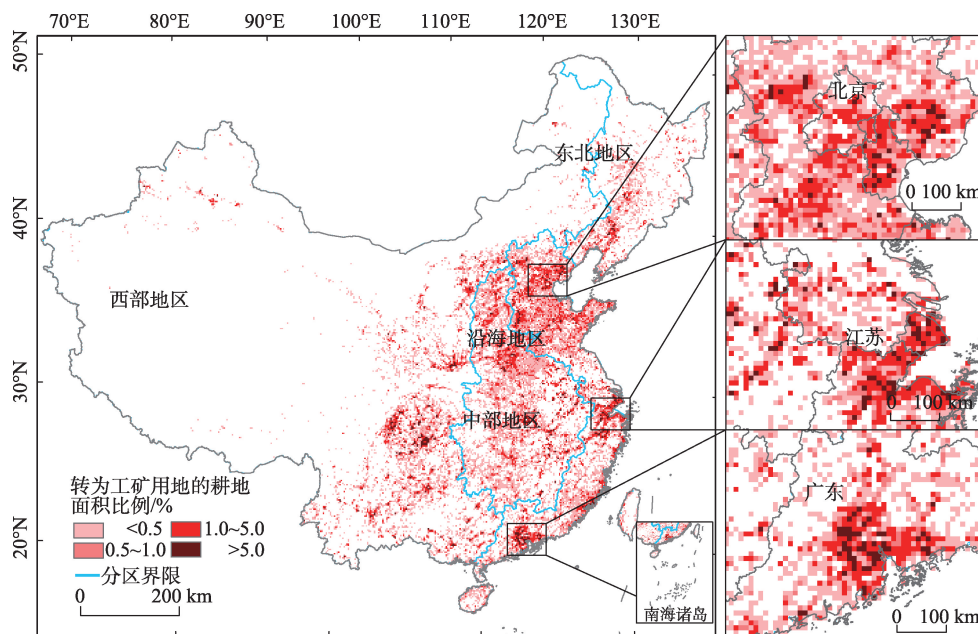


图2 1990–2015年中国被工矿用地占用的耕地分布

Fig.2 Percentage of cropland conversion into industrial land in China, 1990–2015

的39.60%。东北地区占用耕地面积为 $4.93 \times 10^3 \text{ km}^2$,损失的粮食产能为1.10 Mt。沿海地区工矿用地扩张占用耕地面积为 $4.11 \times 10^3 \text{ km}^2$,导致损失的粮食产能为2.33 Mt,占中国因工矿用地扩张直接损失粮食总产能的35.90%,此比例仅低于中部地区。西部地区工矿用地面积占用耕地面积最低,为 $1.08 \times 10^3 \text{ km}^2$,损失的粮食产能最小,为0.49 Mt。

自1990年起,已经有 $2.66 \times 10^3 \text{ km}^2$ 的工矿用地复垦为耕地,因此影响的粮食产能为0.27 Mt。从区域差异分析,沿海地区复垦面积最高,占全国复垦总面积的69%,其中有73%是在近10年进行复垦的。其次是中部地区,复垦面积占全国复垦总面积的32%,在2005–2015年复垦面积为 639.02 km^2 。复垦后的耕地粮食产能呈现增加趋势,2015年这些耕地产出的粮食产能约0.77 Mt。中部地区虽然复垦面积比沿海地区少 $0.82 \times 10^3 \text{ km}^2$,但是粮食产能却比沿海地区多0.04 Mt;而西部地区复垦面积比东北地区多 $0.11 \times 10^3 \text{ km}^2$,但粮食产能却比东北地区少0.09 Mt。

距离工矿用地周边5 km范围内的耕地面积从1995年的 $271 \times 10^3 \text{ km}^2$ 增加到2015年的 $860 \times 10^3 \text{ km}^2$,其中2005–2015年耕地增加面积占1990–2015年增加总面积的80%。2015年,全国有48.46%的耕地是在工矿用地5 km范围内,是1990年的3倍;工矿用地5 km范围内的粮食产能占全国粮食总产能

的54%(图3)。

为综合分析工矿用地扩张对粮食产能的影响,现假设:①距独立工矿用地5 km范围内的粮食产能有29%可能会受工矿污染影响;②废弃工矿用地复垦成为耕地之后,生产的粮食中有35%可能会受到污染(环境保护部和国土资源部, 2014),通过式(3)可以估算出2015年全国有17%的粮食存在安全隐患(表2)。中部地区由于工矿用地占用耕地资源而导致粮食损失比例最高,占2015年粮食总产能的6.32%;沿海地区损失比例为5.82%;西部地区和东北地区损失比例分别为3.21%和1.66%。通过分析

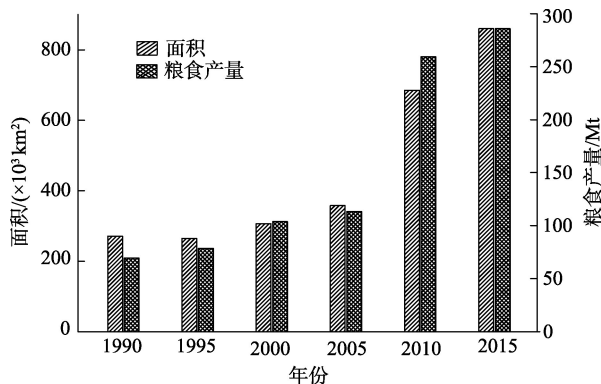


图3 1990–2015年工矿用地5 km范围内的耕地及粮食产量变化

Fig.3 Changes in cropland area and production within 5 km of industrial land, 1990–2015

表2 工矿用地对粮食安全影响
Tab.2 Impacts of industrial land on food security

	分区	耕地转为工矿用地	工矿用地转为耕地	工矿用地 5 km 范围的耕地	总量	百分比/%
面积/($\times 10^3$ km ²)	西部地区	1.08	0.29	242.38	243.75	13.42
	中部地区	6.86	0.69	257.34	264.89	14.59
	东北地区	4.93	0.18	81.79	86.90	4.79
	沿海地区	4.11	1.51	278.87	284.49	15.67
	中国	16.98	2.67	860.38	880.03	48.46
2014/2015年潜在 粮食产量/Mt	西部地区	0.49	0.05	56.55	57.09	10.82
	中部地区	2.57	0.31	105.65	108.53	20.58
	东北地区	1.10	0.14	26.24	27.48	5.21
	沿海地区	2.33	0.27	97.52	100.12	18.98
	中国	6.49	0.77	285.96	293.22	55.59
2014/2015年损失 粮食产量/Mt	西部地区	0.49	0.02	16.40	16.91	3.21
	中部地区	2.57	0.11	30.64	33.32	6.32
	东北地区	1.10	0.05	7.61	8.76	1.66
	沿海地区	2.33	0.09	28.28	30.71	5.82
	中国	6.49	0.27	82.93	89.69	17.01

表2发现,耕地污染导致的间接影响在中部地区比较严重。

5 结论与讨论

本研究应用中国 1990–2015 年土地利用/覆盖变化数据集分析了中国工矿用地扩张的时空特征。利用降水数据模拟得到 1990–2015 年净初级生产力,通过与粮食产量统计数据建立相关性,构建了 1 km 分辨率的粮食产能空间数据。最后将工矿用地数据与粮食产能数据进行空间分析,定量估算了中国工矿用地扩张对粮食安全的潜在影响。主要结论有:

(1) 1990–2015 年中国工矿用地扩张占用大量耕地且具有强烈的空间异质性。2015 年中国工矿用地面积已经达到城市用地面积的 52%。近 25 年间工矿用地面积增长了 3.26 倍,导致耕地面积减少 16.98×10^3 km², 约为中国工矿用地扩张总面积的 56%。2010–2015 年间,中国工矿用地的扩张速率最快,已经接近城市化速率(3000 km²/a)的 86%。

(2) 1990–2015 年中国工矿用地扩张占用耕地直接导致当前粮食产能损失 6.49 Mt。其中,中部地区工矿用地扩张占用耕地面积最多,为中国工矿用地扩张占用耕地总面积的 40%,导致直接损失当前粮食产能 2.57 Mt。其次为沿海地区,由于长三角、珠江三角以及京津冀城市群发展较快,工矿用地扩张迅速,大量耕地资源被占用,因此导致直接损失

粮食产能为 2.33 Mt。西部地区工矿用地扩张占用耕地直接损失当前粮食产能为 0.49 Mt。

(3) 因工矿用地扩张可能会对周边耕地产生污染所影响的间接粮食产能达 83.20 Mt。从直接和间接两方面影响综合评估可以得出,当前中国有 89.69 Mt 的粮食存在安全隐患,即全国有 17% 的粮食产能可能存在安全问题。其中,中部地区粮食安全隐患问题较为严重,这与 Liu 等(2016)发现的砷中毒在中部和西部地区要比东部地区严重的现象基本一致。

随着中国城市化和工业化的发展,人增地减的矛盾将越发尖锐,国家粮食安全备受关注,开展国家尺度工矿用地和耕地资源的遥感监测,分析工矿用地扩张对国家粮食安全的潜在影响,对于国家工矿业可持续发展和粮食安全策略的制定具有重要的科学意义。由于工矿用地本身存在一定的污染源,对耕地产粮造成的污染是不可逆转的(Lu et al, 2015),优质耕地损失对粮食生产的影响更需引起足够的重视。工矿用地在快速扩张过程中占用大量耕地,不仅对粮食生产造成威胁(Larson, 2013),甚至严重地威胁到人类的健康(Li et al, 2014; Edwards et al, 2015; Lu et al, 2015; Zhao et al, 2015)。工矿企业易引发的大气、地表水体和土壤环境污染问题,已延伸到农村,主要分布于我国传统的农区,极易造成农田环境污染(Ma, 2010)。为此呼吁政府应尽快制定相应的政策措施,适当控制超大城市的数量和规模,严格控制工矿用地急剧蔓延式扩张;

更好地规划和布局工矿用地,使其远离农田,并提高工矿用地的集中度、减少边界长度,以减轻工矿用地扩张对农田和自然生态系统的影响。

参考文献(References)

- 环境保护部,国土资源部. 2014. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中国环境保护部: 10-11. [Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. 2014. *Quan guo tu rang wu ran zhuang kuang diao cha gong bao*[R]. Beijing, China: China Ministry of Environmental Protection: 10-11.]
- 孔祥斌, 张凤荣. 2008. 中国农户土地利用阶段差异及其对粮食生产和生态的影响[J]. 地理科学进展, 27(2): 112-120. [Kong X B, Zhang F R. 2008. The effects of the household land use objects change on the grain and ecology in China[J]. *Progress in Geography*, 27(2): 112-120.]
- 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 2014. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局[J]. 地理学报, 69(1): 3-14. [Liu J Y, Kuang W H, Zhang Z X, et al. 2014. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Acta Geographica Sinica*, 24(2): 195-210.]
- 刘洛, 徐新良, 刘纪远, 等. 2014. 1990-2010年中国耕地变化对粮食生产潜力的影响[J]. 地理学报, 69(12): 1767-1778. [Liu L, Xu X L, Liu J Y, et al. 2015. Impact of farmland changes on production potential in China during 1990-2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 25(1): 19.]
- 刘玉, 刘彦随, 郭丽英. 2010. 环渤海地区粮食生产地域功能综合评价与优化调控[J]. 地理科学进展, 29(8): 920-926. [Liu Y, Liu Y S, Guo L Y. 2010. Comprehensive evaluation and optimization strategy of the territorial function for grain production: A case of the area along Bohai Rim in China[J]. *Progress in Geography*, 29(8): 920-926.]
- 王静, 杨小唤, 蔡红艳, 等. 2013. 20a来中国占补耕地光温生产潜力时空特征[J]. 自然资源学报, 28(1): 126-136. [Wang J, Yang X H, Cai H Y, et al. 2013. Spatial-temporal characteristics of light-temperature potential productivity on cropland occupation and supplement in China in the last 20 years[J]. *Journal of Natural Resources*, 28(1): 126-136.]
- 徐海亚, 朱会义. 2015. 基于自然地理分区的1990-2010年中国粮食生产格局变化[J]. 地理学报, 70(4): 582-590. [Xu H Y, Zhu H Y. 2015. Spatial change of China's grain production based on geographical division of natural factors during 1990-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 70(4): 582-590.]
- 徐新良, 刘纪远, 曹明奎, 等. 2007. 近期气候波动与LUCC过程对东北农田生产潜力的影响[J]. 地理科学, 27(3): 318-324. [Xu X L, Liu J Y, Cao M K, et al. 2007. Impact of recent climate fluctuation and LUCC process on potential productivity for crops in northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 27(3): 318-324.]
- 闫慧敏, 刘纪远, 黄河清, 等. 2012. 城市化和退耕还林草对中国耕地生产力的影响[J]. 地理学报, 67(5): 579-588. [Yan H M, Liu J Y, Huang H Q, et al. 2012. Impacts of cropland transformation on agricultural production under urbanization and grain for green project in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(5): 579-588.]
- Buyantuyev A, Wu J. 2009. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA[J]. *Journal of Arid Environments*, 73(4-5): 512-520.
- Chen J. 2007. Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security[J]. *Catena*, 69(1): 1-15.
- Del Grosso S, Parton W, Stohlgren T, et al. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature[J]. *Ecology*, 89(8): 2117-2126.
- Edwards D P, Laurance W F. 2015. Preventing tropical mining disasters[J]. *Science*, 350: 1482.
- Giese J. 1998. China food industry and its market[J]. *Food Technology*, 52(12): 60-61.
- Huang J, Yang J, Deng X, et al. 2015. Urbanization, Food Production and Food Security in China[C]. Allied Social Science Association. Agricultural and Applied Economics Association.
- Imhoff M L, Bounoua L, DeFries R, et al. 2004. The consequences of urban land transformation on net primary productivity in the United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 89(4): 434-443.
- Kuang W H, Liu J Y, Dong J W, et al. 2016. The rapid and massive urban and industrial land expansions in China between 1990 and 2010: A CLUD-based analysis of their trajectories, patterns, and drivers[J]. *Landscape and Urban Planning*, 145: 21-23.
- Larson C. 2013. Losing arable land, china faces stark choice: Adapt or go hungry[J]. *Science*, 339: 644-645.
- Li Z Y, Ma Z W, van der Kuip T J, et al. 2014. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 468-469: 843-853.
- Liu J, Savenije H H G. 2008. Food consumption patterns and their effect on water requirement in China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3): 887-898.
- Liu X J, Tian G J, Jiang D, et al. 2016. Cadmium (Cd) distribution and contamination in Chinese paddy soils on national

- scale[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (18): 17941-17952.
- Liu Y L, Wen C, Liu X J. 2013. China's food security soiled by contamination[J]. *Science*, 339: 1382-1383.
- Lu Y L, Song S A, Wang R S, et al. 2015. Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China[J]. *Environment International*, 77: 5-15.
- Ma C B. 2010. Who bears the environmental burden in China: An analysis of the distribution of industrial pollution sources[J]. *Ecological Economics*, 69(9): 1869-1876.
- Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, et al. 2003. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States[J]. *Remote Sensing of Environment*, 86(3): 401-410.
- Nanos N, Martín J A R. 2012. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: Spatial variability in the Duero river basin (Spain)[J]. *Geoderma*, 189-190: 554-562.
- Pei F S, Li X, Liu X P, et al. 2013. Assessing the differences in net primary productivity between pre- and post-urban land development in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171-172: 174-186.
- Stephenson J. 2008. Food safety in China[J]. *Journal of American Medical Association*, 300(19): 2239.
- Xu X H, Zhao Y C, Zhao X Y, et al. 2014. Sources of heavy metal pollution in agricultural soils of a rapidly industrializing area in the Yangtze Delta of China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 108: 161-167.
- Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. 2015. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 49(2): 750-759.

Potential impacts of industrial land expansion on food security in China, 1990–2015

LIU Ailin^{1,2}, KUANG Wenhui^{1*}, ZHANG Chi³

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China)

Abstract: Food security is a key governmental and academic concern in China. In the past 25 years, due to the rapid industrialization and urbanization, competition for land resources and environmental pollution threatened the sustainability of China's grain production. Studies to date have focused on the urbanized areas, and rural industrial land expansion and impact on food security in China remain largely unknown. This study constructed an 1 km resolution grain output dataset using the latest remote sensing data-derived land use dataset (NLUD-China) and county-level grain production data of China to evaluate the impacts of industrial land expansion and pollution on food security of the country. The results show that the industrial land area increased by 326% between 1990 and 2015, with an increasing expansion rate of 288 km²/a in the 1990s to 2600 km²/a in 2010–2015, close to the current urban expansion rate (3000 km²/a). During 1990–2015, industrial land expansion led to 1.7×10^4 km² reduction of crop land, resulting in a direct production loss of 6.49 Mt (10⁶ tons). Indirect losses caused by industrial pollution was conservatively estimated at 83.20 Mt. Overall estimated losses due to industrial land influence can be up to 17% of China's cropland production. Spatially, direct loss of crop production in China decreased from the central and coastal region to the northwest region. In the central and western regions losses caused by soil pollution is relatively serious. With the increasing population and other socioeconomic and environmental changes, the balance between the supply and demand of food becomes more delicate. Therefore, remote sensing monitoring of crop land and industrial land for national macroeconomic development and environmental protection is of great significance.

Key words: industrial land expansion; cropland resource; food security; remote sensing; China