

土地利用变化对区域水—能源—粮食系统 耦合协调度的影响 ——以京津冀城市群为研究对象

王 勇, 孙瑞欣

(东北财经大学统计学院, 大连 116025)

摘要: 将土地因素引入水—能源—粮食系统, 运用耦合协调模型对京津冀城市群 2005—2018 年水—能源—粮食—土地系统的时空变化特征进行研究。结果表明: (1) 从空间尺度上来看, 京津冀城市群建设用地由中心向四周扩散; 从京津冀城市群土地利用格局来看, 耕地和建设用地面积分别呈现较为明显的下降和增长趋势。 (2) 将土地纳入水—能源—粮食系统降低了京津冀城市群大多数城市水—能源—粮食系统间的耦合度和耦合协调度。 (3) 土地与水—能源—粮食子系统组成的两要素系统的协调水平会进行叠加或抵消进而影响水—能源—粮食—土地系统耦合协调度。本文的研究启示在于: 京津冀城市群在考虑水、能源、粮食协调发展的同时, 应考虑土地对水—能源—粮食系统整体及内部子系统的影响, 根据城市自身资源优势合理配置资源、优化产业布局以实现可持续发展。

关键词: 土地利用; 耦合协调; 水—能源—粮食; 京津冀城市群

水资源、能源和粮食是人类生存发展的基础性战略资源, 水—能源—粮食之间存在错综复杂的互动关系, 基于单一资源很难实现水—能源—粮食资源系统的协同优化管理、实现资源的合理配置, 应从多要素、多系统和多区域集成的视角对水—能源—粮食资源进行系统管理, 有助于实现区域可持续发展^[1]。2011 年, 在德国召开的“波恩会议”首次提出“水—能源—粮食”纽带概念, 指出水资源、能源、粮食之间存在复杂的关系, 单一资源无法满足社会可持续发展的需求, 需要将水资源、能源、粮食联系起来并考虑与气候变化、社会和环境之间的关系^[2]。学者们对水—能源—粮食的研究从三要素到多要素关联关系, 分析资源的利用、空间分布、经济社会发展等对关联关系的影响。

土地是承载水、能源、粮食等资源及其活动顺利进行的重要基础, 对水、能源和粮食有着不可忽视的重要影响, 因此有必要将土地因素纳入水—能源—粮食分析框架。能源的开采、加工和粮食的生产需要消耗大量的水资源和土地; 水和粮食的加工、处理、运输等过程需要消耗大量的能源; 能源和粮食生产过程中产生的有害物质导致地下水资源被污染; 土地为水资源、能源的存储和粮食的种植提供土地条件和场所^[3]。水资源匮乏将导致能源开采量减少、粮食产量下降, 导致处理水可利用的能源减少, 粮食中的虚拟水总量减少。随着城镇化水平不断提高, 对城镇建设用地的需求增加, 建设用地与耕地

收稿日期: 2021-04-20; 修订日期: 2021-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (72104046); 辽宁省“兴辽英才计划”项目 (XLYC1907012); 辽宁省文化名家暨“四个一批”人才培养项目 (LNSGYP20071); 全国统计科学研究项目 (2021LZ24)

作者简介: 王勇 (1988-), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为人口统计、城市经济。

E-mail: ywang@dufe.edu.cn

的矛盾日益突出^[4]；土地利用方式不断变化，人口增加需要更多的耕地和能源来满足日益增长的对粮食和能源的需求。当对粮食的需求量增加时，人们会增加粮食作物的种植，对水资源和土地的需求增加，减少种植能源作物^[5]。当建设用地的需求增加时，增加了对能源的消耗，同时占用更多的耕地面积导致粮食种植面积减少，耕地资源的分布也制约着水资源的开发利用方式^[6]。对土地需求的不断增大，导致水域面积缩减，形成水资源日趋紧张的局面；能源和粮食生产加工过程中导致的污染和农药、化肥等化学物质残留经过降水、灌溉、水循环等环节流入深层土壤，造成土壤污染、盐碱化，降低土地利用效率。土地利用变化对水、能源、粮食作用机制如图1所示。

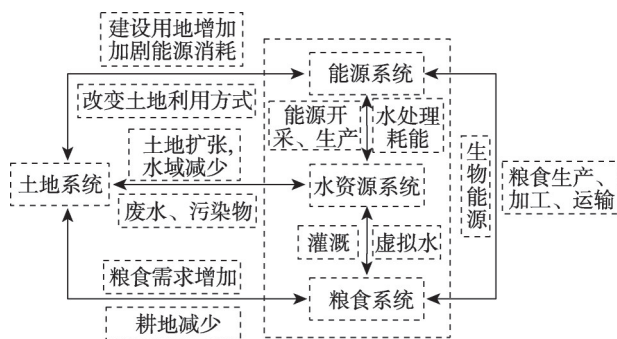


图1 土地利用变化对水、能源、粮食作用机制

Fig. 1 Effect of land use change on water, energy and food

目前学术界对水—能源—粮食

的研究主要集中在以下两个方面：一方面揭示水—能源—粮食系统间的关系。米红等^[7]运用系统动力学方法仿真模拟了未来水—能源—粮食的需求规模，并运用灵敏度分析研究了保证水—能源—粮食安全的有效方案，进而提出了相关建议措施。李桂君等^[8]利用“资源整合观”构建水—能源—粮食关联关系基本框架，优化水、能源、粮食资源合理配置。白景锋等^[9]通过构建水—能源—粮食系统压力指数并引入空间回归分析模型，对水—能源—粮食系统压力的时空演化特征及影响因素进行探索性分析。李良等^[10]通过构建耦合模型量化了水—能源—粮食系统的压力与污染，并建立了风险传导与调节反馈机制，为基于水—能源—粮食关联的区域环境风险管控提供了科学依据。赵良仕等^[11]采用Logistic曲线、耦合协调度模型和探索性空间数据分析等方法，对中国水资源—能源—粮食耦合系统进行安全评价及空间关联分析。彭少明等^[12]引入协同学原理构建水—能源—粮食整体分析框架，提出黄河流域水、能源、粮食优化布局方案。张洪芬等^[13]通过构建水—能源—粮食系统的综合评价指标体系和耦合协调度模型，研究了京津冀地区水—能源—粮食系统耦合协调度及其时空演化特征，发现京津冀地区水—能源—粮食系统的耦合协调度均呈现明显的上升趋势。李成宇等^[14]采用耦合协调度模型、探索性空间数据分析方法和空间计量模型探讨水—能源—粮食耦合协调度的空间相关性及其影响因素。Lee等^[15]以大气环流模式作为气候变化情景，评估气候变化和灌溉管理对以粮食为中心的水—能源—粮食相互联系的整体影响。White等^[16]利用跨国区域间投入产出方法评估水、能源、粮食等资源和环境产出的竞争需求。Govindan等^[17]基于马尔科夫决策过程讨论提高高风险条件下水—能源—粮食关系的弹性，将水—能源—粮食系统外部环境的不确定性及关联的风险考虑在内。

另一方面是考虑经济、社会、环境等外部因素对水—能源—粮食系统的影响以及对系统内部子系统间的影响。李桂君等^[18]利用系统动力学模型评估外部因素对水—能源—粮食的影响，并预测水—能源—粮食未来的发展趋势，发现能源系统是现阶段提升综合可持续发展能力的突破口。Slorach等^[19]将健康、土地、生态系统、畜禽粪便等作为要素

纳入子系统,通过生命周期评估估算环境影响,将生命周期的影响分配到水—能源—粮食—健康关系中,进而评估对四要素的总体影响。Shi等^[20]通过贝叶斯网络减少水—能源—粮食—生态关系间的不确定性并有效地测量系统间的因果关系。Heuvel等^[21]从生态系统服务概念的角度分析了瑞典的水—能源—粮食—土地—气候间的联系,以深入了解各联系之间的相互作用。Li等^[22]研究了不确定条件下土地和畜禽粪便与水—能源—粮食共同作用下农业系统可持续生物能源生产的优化评估方法,以实现能源的可持续发展。Chai等^[23]通过构建贝叶斯网络模型,定量分析水—能源—粮食—经济—社会—环境的因果关系并对水—能源—粮食的需求进行预测,要素更加全面,将更多的因素考虑在内。

通过梳理文献可见,国内外关于水—能源—粮食的研究多以定量研究为主,主要集中在研究三者相互关系,但问题是,土地对水—能源—粮食系统的影响有待进一步明确。基于此,本文从两个方面展开分析:一是探讨土地纳入水—能源—粮食系统后对新的系统耦合度及耦合协调度是否存在显著影响;二是探讨土地—水、土地—能源、土地—粮食等三个两要素系统对水—能源—粮食—土地系统的协调发展水平产生怎样的影响。具体地,本文以京津冀城市群为研究对象,分析京津冀城市群2005—2018年土地利用变化对水—能源—粮食系统及内部子系统的影响,以期京津冀城市群合理规划土地利用布局,协调水、能源、粮食、土地等资源配置,实现可持续发展提供参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀城市群的整体定位是“以首都为核心的世界级城市群、区域整体协同发展改革指导区、全国创新驱动经济增长新引擎、生态修复环境改善示范区”。2019年京津冀城市群城区面积为25359 km²,常住人口为11308万人,地区生产总值为84580.08亿元,占全国GDP的比例为8.54%。2019年京津冀城市群用水总量为252.4亿m³,水资源总量为146.2亿m³,占全国用水总量和水资源总量的比例分别为4.19%和0.5%。能源消耗总量为50043.06万tce,一次能源生产量为12703.66万tce,占全国能源消耗总量和能源生产总量的比例分别为10.28%和3.2%。粮食生产总量为3991.25万t,占全国粮食生产总量的比例为6.01%。京津冀城市群的快速发展导致水、能源、粮食资源的供需不平衡以及资源的不合理配置,降低资源对社会发展的促进作用。评估土地对水—能源—粮食系统整体及其内部子系统的关系,对京津冀城市群优化资源配置、提高资源利用效率具有重要意义。

1.2 土地利用类型变化测度

基于现有土地利用变化相关研究成果^[24],本文利用单一土地利用动态度变化、土地利用程度等分析京津冀城市群的土地资源数量、空间变化以及土地利用类型组合的变化。

单一土地利用动态度是指研究区在一定时期内某一土地利用类型的变化情况,用来表示不同土地利用类型在一定时期内的变化速度和变化幅度^[25],其表达式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 表示与 T 时间段对应的某类土地利用类型变化速率; U_a 、 U_b 分别为初期、末期某类土地利用类型总面积(km²); T 为计算时间段。 K 取正值代表土地面积增加,负值反之。动态度的绝对值代表土地利用变化的程度,值越大变化程度越大。

土地利用程度不仅反映土地利用本身的自然属性,也反映了土地系统中人类因素的影响。参考庄大方等^[26]、何改丽等^[27]提出的土地利用程度分级原则和表达式,土地利用程度综合指数表达式为:

$$UINDEX = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i \times C_i \quad (2)$$

式中: $UINDEX$ 为土地利用程度综合指数,用以反映土地利用程度的高低; A_i 为第 i 级土地利用程度分级指数; C_i 为第 i 级土地利用程度分级面积百分比(%); n 为土地利用分级数。具体分级赋值为:未利用地分级指数为1,林地、草地、水域的分级指数为2,耕地的分级指数为3,建设用地的分级指数为4。

1.3 耦合协调度模型

以京津冀城市群为研究对象,遵循指标选取的系统性、典型性、科学性和可操作性原则,参考已有研究成果^[11,13,14,28],根据不同子系统特点,从不同角度选取合适且能充分衡量各子系统的指标。从总量、结构、效益等角度选择水资源、能源子系统的指标,从生产、流通、消费等角度选取粮食子系统指标。参考张明斗等^[29]、田俊峰等^[30]的研究,从经济、社会、生态效益角度选取衡量土地系统的指标,构建京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统的评价指标体系如表1所示。由于指标体系中各指标的量纲、数量级及正负取向均存在着较大差异,为保证评价结果的科学性与严谨性,需要对所收集的原始数据进行标准化处理。因为京津冀城市群发展存在差异,所以不同地区同一指标具有不同的权重。为消除主观赋权等因素的偏差,采用熵权法测度各指标权重。根据相关研究成果^[13,14,28],计算水、能源、粮食、土地子系统的综合评价指数,具体表达式为:

$$W(x) = \sum_{\alpha=1}^8 w_{\alpha} X_{\alpha t} \quad (3)$$

$$E(y) = \sum_{\beta=1}^5 w_{\beta} Y_{\beta t} \quad (4)$$

$$F(z) = \sum_{\gamma=1}^9 w_{\gamma} Z_{\gamma t} \quad (5)$$

$$L(p) = \sum_{\eta=1}^6 w_{\eta} P_{\eta t} \quad (6)$$

式中: $W(x)$ 、 $E(y)$ 、 $F(z)$ 、 $L(p)$ 分别为 t 年水、能源、粮食、土地子系统的综合评价指数; w_{α} 、 w_{β} 、 w_{γ} 、 w_{η} 分别为水、能源、粮食、土地子系统内各指标的权重; $X_{\alpha t}$ 、 $Y_{\beta t}$ 、 $Z_{\gamma t}$ 、 $P_{\eta t}$ 分别为各指标标准化后的数值。

采用耦合协调度模型来研究系统间的互动程度和发展水平。耦合度是描述系统或要素相互影响的程度,耦合度只能说明系统间相互作用、相互影响的程度,无法真实反映出系统或要素间的协调发展水平,在多个区域对比研究的情况下,很难反映出区域的整体“功效”与“协同”效应^[31]。耦合协调度是度量系统之间或系统内部要素之间协调状况好坏的定量指标。因此本文用耦合度判别水、能源、粮食、土地子系统之间相互作用、相互影响的程度,用耦合协调度来评价京津冀城市群不同区域水—能源—粮食系统、水—能源—粮食—土地系统间的协调发展水平^[32-34]。具体表达式如下:

$$C = \frac{n \sqrt[n]{u_1 \times u_2 \times \cdots \times u_n}}{u_1 + u_2 + \cdots + u_n} \quad (7)$$

表1 京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统耦合协调度评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of coupling coordination degree of water-energy-food-land system in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

目标层	指标层	单位	指标性质
水子系统	降水总量	mm	正
	人均水资源总量	m ³ /人	正
	生活用水占比	%	正
	农业用水占比	%	正
	人均用水量	m ³	负
	生态用水占比	%	正
	产水模数	万 m ³ /km ²	正
	万元GDP用水量	m ³ /万元	负
能源子系统	能源消费总量	万 tce	负
	人均能源消费量	t/人	负
	能源工业投资	亿元	正
	能源消耗强度	t/万元	负
	二氧化硫排放量	t	负
粮食子系统	人均粮食产量	kg	正
	粮食单产	kg/hm ²	正
	人口自然增长率	‰	负
	化肥负荷	t/hm ²	负
	机械动力	kW/hm ²	正
	农用柴油使用量	t	负
	受灾面积	hm ²	负
	粮食消费价格指数		负
	粮食流动成本		负
土地子系统	人口密度	人/km ²	负
	人均建设用地面积	m ² /人	正
	地均GDP	万元/km ²	正
	地均工业废水排放量	t/km ²	负
	人均绿地面积	m ² /人	正
	建成区绿化覆盖率	%	正

$$T = a_1 u_1 + a_2 u_2 + \cdots + a_n u_n \quad (8)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (9)$$

式中： u_n 为第 n 个子系统的综合评价指数； C 为耦合度，表示子系统间通过相互作用而彼此影响的程度。 C 取值为 $[0, 1]$ 之间， C 越接近1，说明子系统间的耦合度越强，反之，则越弱。当 $0 \leq C \leq 0.3$ 时，处于低耦合水平；当 $0.3 < C \leq 0.5$ 时，处于拮抗阶段；当 $0.5 < C \leq 0.8$ 时，处于磨合阶段；当 $0.8 < C \leq 1$ 时，处于高耦合水平。 D 为耦合协调度，表示系统之间协调状况的好坏程度，参考廖重斌^[35]研究，对 D 进行分类，具体为：当 $0 \leq D \leq 0.1$ 时，处于极度失调状态；当 $0.1 < D \leq 0.2$ 时，处于严重失调状态；当 $0.2 < D \leq 0.3$ 时，处于中度失调状态；当 $0.3 < D \leq 0.4$ 时，处于轻度失调状态；当 $0.4 < D \leq 0.5$ 时，处于濒临失调状态；当 $0.5 < D \leq 0.6$ 时，处于勉强协调状态；当 $0.6 < D \leq 0.7$ 时，处于初级协调状态；当

0.7< D ≤0.8时,处于中级协调状态;当0.8< D ≤0.9时,处于良好协调状态;当0.9< D ≤1时,处于优质协调状态。 T 表示系统的综合评价指数。 a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 分别表示为水、能源、粮食、土地子系统的权重,考虑到各子系统对耦合度的影响程度不同,根据相关研究成果^[11,13],本文认为水、能源、粮食子系统具有同等重要性,土地为经济社会发展和人类活动提供空间和相应的重要资源,是一切活动进行的基础,分析水—能源—粮食系统、水—能源—粮食—土地系统时,取 $a_1=a_2=a_3=0.3$, $a_4=0.1$ 。

1.4 数据来源

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心土地利用现状数据库(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为30 m,以Landsat TM/ETM、Landsat 8遥感影像数据为主要数据源,通过人工目视解译获取,选取基于Landsat TM/ETM+获取的2005年和2010年以及基于Landsat 8获取的2015年、2018年的土地利用数据。根据中国科学院资源环境数据中心的全国1:10万土地利用分类体系,土地利用分类为六个一级地类,分别为:耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,数据精度能达到90%以上^[36,37]。本文利用ArcGIS 10.2软件从四期土地利用数据汇总提取6种土地利用类型数据作为分析用地“竞争”的基础。国民经济发展数据主要来自历年《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国统计年鉴》,河北省的各市数据主要来源于《河北经济年鉴》《河北农村统计年鉴》《河北省水资源公报》,部分年份缺失数据利用年平均增长率进行插补。

2 结果分析

2.1 京津冀城市群土地利用变化

利用ArcGIS 10.2软件对京津冀城市群不同时期的土地利用类型数据进行栅格计算,获取到不同时期的土地利用类型数据。从图2、表2可以看出2005—2018年京津冀城市群建设用地增长迅速,造成耕地大量减少,尤其在北京、天津、石家庄等大中型城市最为明显。建设用地、林地面积增加;耕地、草地、水域、未利用地面积呈现一定幅度的减少,主要是因为经济快速发展导致京津冀城市群对建设用地的需求增加以及“退耕还林”等相关政策的实施。由表2可知,2005—2018年京津冀城市群土地利用格局发生明显变化,具体表现为:

(1) 2005—2018年京津冀城市群土地利用结构以耕地、林地、草地、建设用地为主,水域和未利用地面积占比较小。耕地面积占比从2005年的50.23%下降到2018年的45.38%,可以看出耕地面积呈现较为明显的下降趋势;建设用地面积占比从2005年的8.97%上升为2018年的14.49%,可以看出建设用地面积呈现较为明显的扩张趋势;林地和草地面积占比分别从2005年的20.72%和16.28%变化为2018年的21.18%和15.63%,可以看出林地、草地面积变化较为平稳;水域、未利用地面积占比从2005年的2.87%、0.94%下降到2018年的2.59%、0.73%,可以看出水域和未利用地面积变化较为平稳,均有一定程度的下降。

(2) 从土地利用动态度看,不同时间段内各种土地利用类型的变化速度呈现不一致性。① 耕地面积呈下降趋势。2005—2010年、2010—2015年、2015—2018年耕地面积减少速度分别为0.79%、0.29%、1.53%,速度呈现先减后增趋势。② 林地变化面积

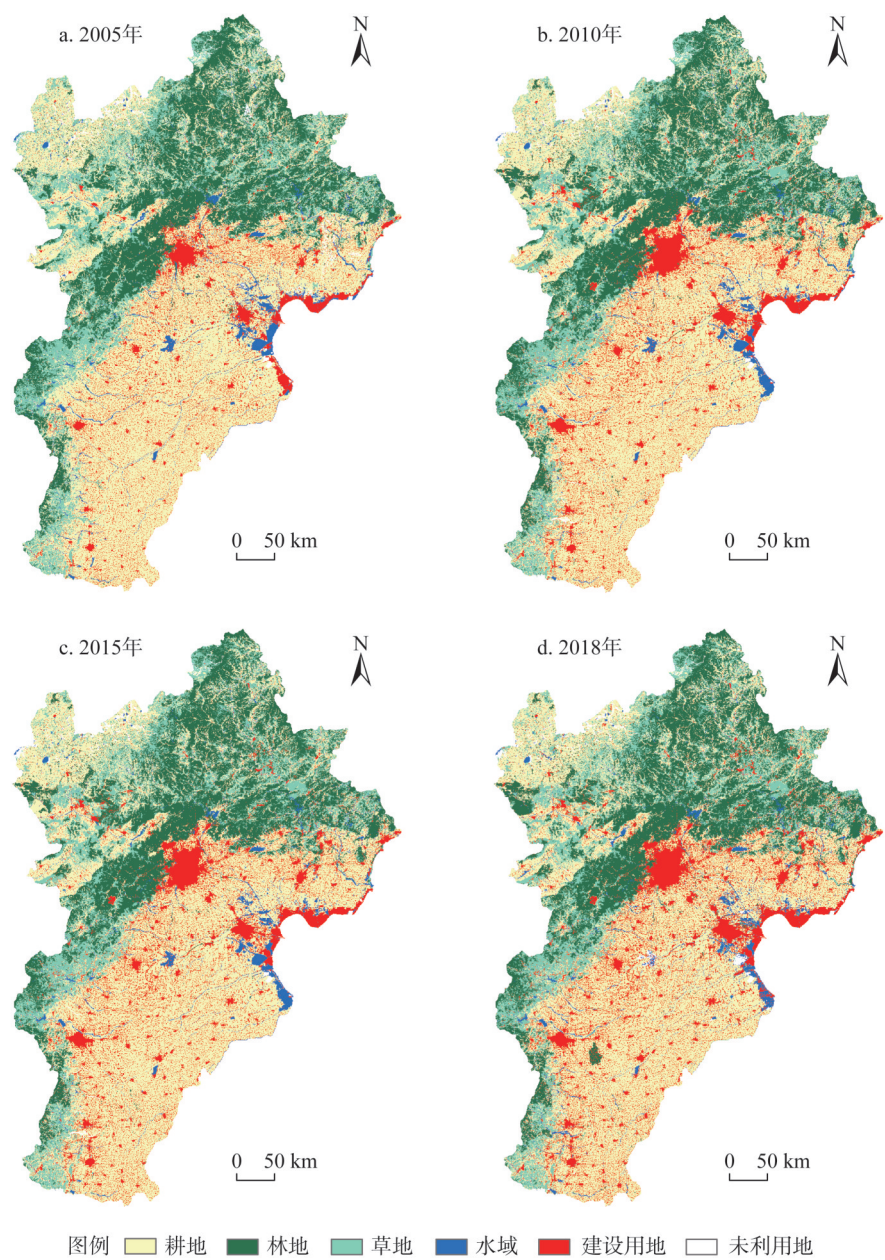


图2 京津冀城市群2005年、2010年、2015年、2018年土地利用

Fig. 2 Land use map of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2005, 2010, 2015 and 2018

表现为“增加—减少—增加”的特征。林地面积增长最快的时段为2015—2018年，面积变化为990.56 km²。③ 草地面积呈下降趋势。2005—2010年、2010—2015年、2015—2018年草地面积的减少速度分别为0.6%、0.13%、0.12%，可以看出速度不断减小。④ 水域面积表现为“减少—增加—增加”的特征。2010—2015年、2015—2018年水域的增长速度分别为0.09%、0.51%，可以看出水域面积的增长速度不断提升。⑤ 建设用地面积呈增长趋势。增长速度从2005—2010年间的6.67%下降为2010—2015年间

表2 2005—2018年京津冀城市群各土地利用类型变化情况
Table 2 Changes of land use types in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2005 to 2018

土地利用类型变化	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2005 面积/km ²	108266.43	44661.40	35092.32	6176.49	19324.16	2024.46
2010 面积/km ²	104009.47	44988.36	34031.82	5465.68	25766.92	1283.28
2015 面积/km ²	102507.66	44856.23	33803.31	5489.71	27597.75	1281.34
2018 面积/km ²	97808.22	45651.96	33683.30	5573.80	31240.30	1578.16
2005 年面积占比/%	50.23	20.72	16.28	2.87	8.97	0.94
2018 年面积占比/%	45.38	21.18	15.63	2.59	14.49	0.73
2005—2018 年变化量/km ²	-10458.22	990.56	-1409.03	-602.68	11916.14	-446.30
2005—2010 年动态度/%	-0.79	0.15	-0.60	-2.30	6.67	-7.32
2010—2015 年动态度/%	-0.29	-0.06	-0.13	0.09	1.42	-0.03
2015—2018 年动态度/%	-1.53	0.59	-0.12	0.51	4.40	7.72

的1.42%，再增长至2015—2018年间的4.40%，可以看出建设用地面积的增长速度表现为“先减后增”的趋势。⑥ 未利用地面积表现为“减少—减少—增加”的特征。2005—2010年、2010—2015年未利用地减少速度分别为7.32%、0.03%，可以看出未利用地面积的减少速度呈现降低趋势，2015—2018年未利用地增加速度为7.72%，可以看出未利用地面积呈增加趋势。

2.2 京津冀城市群水—能源—粮食系统及水—能源—粮食—土地系统的耦合协调分析

2.2.1 京津冀城市群水—能源—粮食系统耦合协调分析

根据式（3）~式（9），计算京津冀城市群整体2005—2018年水—能源—粮食系统的耦合度和耦合协调度，并通过图3和表3分析耦合度和耦合协调度的发展趋势及空间变化特征。

从时间角度看，2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食系统的耦合度值在0.4~0.6之间呈现反复波动趋势。2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食系统的耦合协调度从2005年的0.165增长至2018年的0.195，增长率为18.14%，年均增长率为1.6%，耦合协调度呈现先增后减趋势。其中2016—2017年呈现较大幅度的下降趋势，耦合协调度从2016年的0.236下降到2017年的0.192，下降比率为18.64%。主要原因是京津冀城市群整体水资源子系统中降水总量、人均水资源总量呈现较大幅度的下降，水资源子系统的综合评价指数从2016年的0.219下降至2017年的0.093，最终导致京津冀城市群水—能源—粮食系统的耦合协调度在2016—2017年呈现下降趋势。

从空间角度看，京津冀城市群2005—2018年的耦合度均值较大的城市依次为天津、承德，分别为0.882、0.833，处于高耦合水平；北京、石家庄2005—2018年的耦合度均值均介于0.5~0.8之间，处于磨合阶段；邢台、廊坊、衡水2005—2018年耦合度均值均小于0.3，处于低耦合水平；其

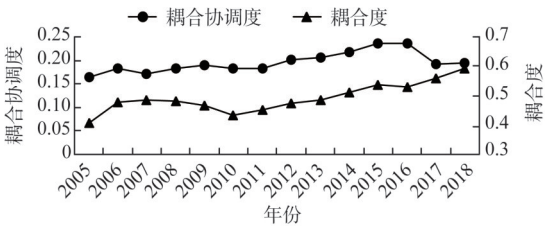


图3 2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食系统耦合度和耦合协调度发展趋势
Fig. 3 Development trend of coupling degree and coupling coordination degree of water-energy-food system in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2005 to 2018

表3 京津冀城市群水—能源—粮食系统不同时间段耦合度及耦合协调度均值

Table 3 Average coupling degree and coupling coordination degree of water-energy-food system in different time periods of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

时间段/年	耦合度				耦合协调度			
	2005—2009	2010—2014	2015—2018	2005—2018	2005—2009	2010—2014	2015—2018	2005—2018
北京	0.594	0.480	0.421	0.504	0.129	0.157	0.140	0.142
天津	0.942	0.828	0.875	0.882	0.113	0.126	0.151	0.128
石家庄	0.855	0.731	0.785	0.791	0.285	0.324	0.410	0.335
唐山	0.417	0.372	0.418	0.401	0.218	0.195	0.234	0.214
秦皇岛	0.450	0.479	0.505	0.476	0.205	0.234	0.291	0.240
邯郸	0.387	0.449	0.552	0.456	0.191	0.161	0.198	0.182
邢台	0.220	0.197	0.366	0.254	0.153	0.154	0.157	0.155
保定	0.310	0.406	0.480	0.393	0.157	0.179	0.210	0.180
张家口	0.344	0.441	0.409	0.397	0.169	0.223	0.227	0.205
承德	0.788	0.970	0.718	0.833	0.276	0.352	0.288	0.307
沧州	0.286	0.375	0.720	0.442	0.149	0.158	0.160	0.156
廊坊	0.195	0.184	0.510	0.281	0.178	0.195	0.178	0.184
衡水	0.249	0.222	0.451	0.297	0.104	0.118	0.148	0.121

他城市 2005—2018 年的耦合度均值介于 0.3~0.5 之间，处于拮抗阶段。2005—2018 年京津冀城市群耦合协调度分为三类：（1）处于严重失调状态，具体城市为北京、天津、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水；（2）处于中度失调状态，具体城市为唐山、秦皇岛、张家口；（3）处于轻度失调状态，具体城市为石家庄、承德。

京津冀城市群 2005—2009 年的耦合度均值较大的城市依次为天津、石家庄，值分别为 0.942、0.855，处于高耦合水平；北京、承德 2005—2009 年的耦合度均值均处于 0.5~0.8 之间，处于磨合阶段；邢台、沧州、廊坊、衡水等四个城市 2005—2009 年的耦合度均值均小于 0.3，处于低耦合水平；其他城市 2005—2009 年的耦合度均值均介于 0.3~0.5 之间，处于拮抗阶段。2005—2009 年京津冀城市群耦合协调度分为两类：（1）处于严重失调状态，具体城市为北京、天津、邯郸、邢台、保定、张家口、沧州、廊坊、衡水；（2）处于中度失调状态，具体城市为石家庄、唐山、秦皇岛、承德。

京津冀城市群 2010—2014 年的耦合度均值较大的城市依次为承德、天津，分别为 0.97、0.828，处于高耦合水平；石家庄 2010—2014 年的耦合度均值介于 0.5~0.8 之间，处于磨合阶段；邢台、廊坊、衡水 2010—2014 年的耦合度均值均小于 0.3，处于低耦合水平；其他城市 2010—2014 年的耦合度均值均介于 0.3~0.5 之间，处于拮抗阶段。2010—2014 年京津冀城市群耦合协调度分为三类：（1）处于严重失调状态，具体城市为北京、天津、唐山、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊、衡水；（2）处于中度失调状态，具体城市为秦皇岛、张家口；（3）处于轻度失调状态，具体城市为石家庄、承德。

京津冀城市群 2015—2018 年的耦合度均值较大的城市为天津（0.875），处于高耦合水平；石家庄、秦皇岛、邯郸、承德、沧州、廊坊等 6 个城市 2015—2018 年的耦合度均值均介于 0.5~0.8 之间，处于磨合阶段；其他城市 2015—2018 年的耦合度均值均介于 0.3~0.5 之间，处于拮抗阶段。2015—2018 年京津冀城市群耦合协调度分类三类：（1）处于严

重失调状态，具体城市为北京、天津、邯郸、邢台、沧州、廊坊、衡水；（2）处于中度失调状态，具体城市为唐山、秦皇岛、保定、张家口、承德；（3）处于濒临失调状态，具体城市为石家庄。

2.2.2 京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统耦合协调分析

根据式（3）~式（9），计算京津冀城市群整体2005—2018年水—能源—粮食—土地系统的耦合度和耦合协调度，并通过图4和表4分析耦合度和耦合协调度的发展趋势及空间变化特征。

从时间角度看，2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食—土地系统的耦合度值在0.25~0.55之间，呈现“增加—减少—增加”趋势。其中，2005—2008年、2010—2018年耦合度呈增长趋势，2008—2010年呈现下降趋势。2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食—土地系统的耦合协调度呈反复波动趋势，从2005年的0.137增长至2018年的0.175，增长率为28.16%，年均增长率为2.17%。其中，2005—2006年、2007—2009年、2010—2016年、2017—2018年耦合协调度呈增长趋势，2006—2007年、2009—2010年、2016—2017年呈下降趋势。主要原因是：2006—2007年京津冀城市群人口自然增长率增加导致粮食子系统的综合评价指数呈现较大幅度下降，从0.066降低至0.03，减少幅度为54.55%；2009—2010年京津冀城市群工业废水排放量从137806万t增长到139063万t，导致土地子系统的综合评价指数从2009年的0.031下降至2010年的0.013，进而导致水—能源—粮食—土地系统的耦合协调

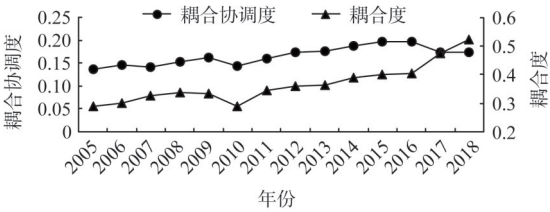


图4 2005—2018年京津冀城市群整体的水—能源—粮食—土地系统耦合度和耦合协调度发展趋势
Fig. 4 Development trend of coupling degree and coupling coordination degree of water-energy-food-land system in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2005 to 2018

表4 京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统不同时间段耦合度及耦合协调度均值

时间段/年	耦合度				耦合协调度			
	2005—2009	2010—2014	2015—2018	2005—2018	2005—2009	2010—2014	2015—2018	2005—2018
北京	0.604	0.495	0.489	0.532	0.125	0.153	0.146	0.141
天津	0.324	0.394	0.498	0.399	0.119	0.132	0.156	0.134
石家庄	0.571	0.465	0.498	0.512	0.222	0.245	0.311	0.255
唐山	0.300	0.318	0.360	0.324	0.175	0.172	0.206	0.183
秦皇岛	0.387	0.418	0.383	0.397	0.180	0.209	0.240	0.208
邯郸	0.254	0.345	0.408	0.330	0.147	0.133	0.162	0.146
邢台	0.187	0.189	0.378	0.243	0.135	0.144	0.151	0.143
保定	0.241	0.317	0.400	0.313	0.131	0.151	0.182	0.153
张家口	0.181	0.220	0.211	0.203	0.116	0.149	0.155	0.139
承德	0.437	0.534	0.464	0.480	0.196	0.248	0.221	0.222
沧州	0.223	0.404	0.755	0.440	0.124	0.157	0.165	0.147
廊坊	0.157	0.152	0.477	0.247	0.150	0.168	0.163	0.160
衡水	0.265	0.289	0.542	0.353	0.102	0.131	0.160	0.129

度值下降;2016—2017年京津冀城市群水资源总量从262.31亿 m^3 下降至181.14亿 m^3 ,导致水资源子系统的综合评价指数从0.219下降至0.093,进而导致水—能源—粮食—土地系统的耦合协调度值下降。

从空间角度看,京津冀城市群2005—2018年的耦合度均值较大的城市依次为北京、石家庄,分别为0.532、0.512,处于磨合阶段;邢台、张家口、廊坊2005—2018年的耦合度均值均小于0.3,处于低耦合水平;其他城市2005—2018年的耦合度均值均介于0.3~0.5之间,处于拮抗阶段。2005—2018年京津冀城市群耦合协调度分为两类:(1)处于严重失调状态,具体城市为北京、天津、唐山、邯郸、邢台、保定、张家口、沧州、廊坊、衡水;(2)处于中度失调状态,具体城市为石家庄、秦皇岛、承德。不同时间段的耦合度均值和耦合协调度均值的空间分布具体情况如下:

京津冀城市群2005—2009年的耦合度均值较大的城市依次为北京、石家庄,分别为0.604、0.571,均处于磨合阶段;天津、秦皇岛、承德2005—2009年的耦合度均值均介于0.3~0.5之间,均处于拮抗阶段;其他城市2005—2009年的耦合度均值均小于0.3,处于低耦合水平。2005—2009年京津冀城市群耦合协调度分为两类:(1)处于严重失调状态,具体城市为北京、天津、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水;(2)处于中度失调状态,具体城市为石家庄。

京津冀城市群2010—2014年的耦合度均值较大的城市为承德(0.534),处于磨合阶段;邢台、张家口、廊坊、衡水2010—2014年的耦合度均值均小于0.3,处于低耦合水平;其他城市2010—2014年的耦合度均值均介于0.3~0.5之间,处于拮抗阶段。2010—2014年京津冀城市群耦合协调度分为两类:(1)处于严重失调状态,具体城市为北京、天津、唐山、邯郸、邢台、保定、张家口、沧州、廊坊、衡水;(2)处于中度失调状态,具体城市为石家庄、秦皇岛、承德。

京津冀城市群2015—2018年的耦合度均值较大的城市依次为沧州、衡水,分别为0.755、0.542,处于磨合阶段;张家口2015—2018年的耦合度均值为0.211,处于低耦合水平;其他城市2015—2018年的耦合度均值均介于0.3~0.5之间,处于拮抗阶段。2015—2018年京津冀城市群耦合协调度分为三类:(1)处于严重失调状态,具体城市为北京、天津、邯郸、邢台、保定、张家口、沧州、廊坊、衡水;(2)处于中度失调状态,具体城市为唐山、秦皇岛、承德;(3)处于轻度失调状态,具体城市为石家庄。

2.2.3 土地纳入水—能源—粮食系统前后变化分析

土地纳入水—能源—粮食系统导致耦合度和耦合协调度在时间和空间方面均有一定程度的变化。从时间角度看,土地纳入水—能源—粮食系统导致京津冀城市群整体的耦合度和耦合协调度值减小,2005年耦合度和耦合协调度分别从0.41、0.165下降至0.288、0.137,2018年耦合度和耦合协调度分别从0.592、0.195下降至0.522、0.175。从空间看,土地纳入水—能源—粮食系统导致耦合度及耦合协调度不同时间段的均值发生如下变化:

耦合类型变化为:(1)2005—2009年天津、石家庄的耦合度均值分别从0.942、0.855下降至0.324、0.571,分别从高耦合水平、高耦合水平变化为拮抗阶段、磨合阶段;承德的耦合度均值从0.788下降至0.437,从磨合阶段变化为拮抗阶段;邯郸、保定、张家口的耦合度均值分别从0.387、0.31、0.344下降至0.254、0.241、0.181,均从拮

抗阶段变化为低耦合水平。(2) 2010—2014年天津、承德的耦合度均值分别从0.828、0.97下降至0.394、0.534，分别从高耦合水平、高耦合水平变化为拮抗阶段、磨合阶段；石家庄的耦合度均值从0.731下降至0.465，从磨合阶段变化为拮抗阶段；张家口的耦合度均值从0.441下降至0.22，从拮抗阶段变化为低耦合水平。(3) 2015—2018年石家庄、秦皇岛、邯郸、承德、廊坊的耦合度均值分别从0.785、0.505、0.552、0.718、0.51下降至0.498、0.383、0.408、0.464、0.477，均从磨合阶段变化为拮抗阶段；天津的耦合度均值从0.875下降至0.498，从高耦合水平变化为拮抗阶段；衡水的耦合度均值从0.451增长为0.542，从拮抗阶段变化为磨合阶段。(4) 2005—2018年天津、承德的耦合度均值分别从0.882、0.833下降至0.399、0.48，均从高耦合水平变化为拮抗阶段；衡水的耦合度均值从0.297增长到0.353，从低耦合水平变化为拮抗阶段。

耦合协调类型变化为：(1) 2005—2009年唐山、秦皇岛、承德从中度失调变化为严重失调；(2) 2010—2014年石家庄、承德从轻度失调变化为中度失调，张家口从中度失调变化为严重失调；(3) 2015—2018年石家庄从濒临失调变化为轻度失调，保定、张家口从中度失调变化为严重失调；(4) 2005—2018年石家庄、承德均从轻度失调变化为中度失调，唐山、张家口均从中度失调变化为严重失调。

2.3 土地利用变化对水—能源—粮食子系统的影响

利用式(3)~式(9)计算京津冀城市群土地—水、土地—能源、土地—粮食系统2005—2018年的耦合度和耦合协调度均值，认为两要素系统中的要素具有同等重要地位。两要素系统的协调发展状况如表5所示。同时分别从水资源的利用、生物能源、粮食单产等角度来分析土地利用变化对水资源、能源、粮食的影响。

2.3.1 土地利用变化对水资源的影响

为探究土地利用变化对水资源的影响，本文对京津冀城市群进行土地—水资源系统耦合分析，根据耦合协调模型，获取不同城市土地—水系统的耦合度及耦合协调度。

表5 2005—2018年京津冀城市群土地与水、能源和粮食耦合度及耦合协调度均值

Table 5 Mean value of coupling degree and coupling coordination degree of land and water or energy or food in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2005 to 2018

城市	土地—水		土地—能源		土地—粮食	
	耦合度	耦合协调度	耦合度	耦合协调度	耦合度	耦合协调度
北京	0.687	0.177	0.856	0.083	0.839	0.135
天津	0.601	0.306	0.399	0.240	0.400	0.242
石家庄	0.512	0.158	0.534	0.163	0.409	0.183
唐山	0.372	0.191	0.496	0.164	0.970	0.075
秦皇岛	0.595	0.176	0.988	0.098	0.431	0.214
邯郸	0.274	0.147	0.967	0.061	0.472	0.109
邢台	0.317	0.207	0.931	0.068	0.903	0.101
保定	0.277	0.177	0.884	0.086	0.860	0.087
张家口	0.166	0.108	0.778	0.044	0.195	0.106
承德	0.433	0.131	0.397	0.140	0.363	0.141
沧州	0.512	0.197	0.948	0.104	0.874	0.105
廊坊	0.273	0.220	0.974	0.070	0.779	0.109
衡水	0.641	0.229	0.609	0.080	0.833	0.124

从表5可知,北京、天津、石家庄、秦皇岛、沧州、衡水处于磨合阶段,唐山、邢台、承德处于拮抗阶段,邯郸、保定、张家口、廊坊处于低耦合水平。京津冀城市群土地—水系统处于失调状态。其中,北京、石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、保定、张家口、承德、沧州处于严重失调状态,邢台、廊坊、衡水处于中度失调状态,天津处于轻度失调状态。分析可知,京津冀城市群水—土资源发展并不平衡。

土地与水资源均为人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,土地影响水资源的分布和使用效率,水资源是影响土地资源承载力的重要因素,故土地与水资源联系密不可分。城市化发展,一方面加速对水资源的需求量,导致大量的农业用水转化为非农业用水;另一方面导致城市用地规模不断扩张,大量的农田转变为非农业土地利用形态。京津冀城市群城镇化率由2005年的49.31%迅速增长为2018年的67.48%,2005—2018年京津冀城市群建设用地面积增加11916.14 km²,耕地面积减少10458.21 km²。农业用水从2005年的176.5亿m³下降至2018年的135.3亿m³,占用水总量的比例从2005年的68.04%变化为2018年的54.08%。土地利用变化不仅影响着水资源的分布,同时也对水资源的使用情况与结构等产生影响。

2.3.2 土地利用变化对能源的影响

从表5可知,北京、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、沧州、廊坊处于高耦合水平,石家庄、张家口、衡水处于磨合阶段,天津、唐山、承德处于拮抗阶段。京津冀城市群土地—能源系统处于失调状态,其中,北京、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、廊坊、衡水处于极度失调状态,石家庄、唐山、承德、沧州处于严重失调状态,天津处于中度失调状态。

土地利用变化对能源的影响主要体现在:建设用地扩张,加速了对能源的消耗。但近年来节能环保等一系列政策的出台,一定程度上限制了对化石燃料等一系列能源的使用,生物能源成为近年来的热点。本文主要从土地利用变化对生物能源的影响来分析土地与能源的关系。

生物能源发展产生如下影响:一方面,土地利用类型的变化。土地作为生物能源生产的主要资源投入类型,生物能源发展会占用耕地面积,直接导致林地、草地、农用地等土地利用类型间以及不同农作物间“竞争”加剧^[38]。另一方面,农民土地利用决策。政府为保护环境、减少碳排放投入大量资金或通过激励机制发展生物能源,导致生物能源价格上升,相比传统农作物,生物能源给农民带来更高的经济效益^[39]。

目前京津冀城市群用于燃料乙醇生产的主要作物为玉米、甘蔗、甜菜和高粱,用于生物柴油生产的主要作物有大豆、油菜和棉籽。2005年京津冀城市群燃料乙醇主要作物种植面积为2981.29千hm²,生物柴油主要作物种植面积为965.09千hm²,农作物总播种面积为9602.9千hm²,能源作物种植面积合计占农作物总播种面积的41.1%;2018年燃料乙醇主要作物种植面积为3697.45千hm²,生物柴油主要作物种植面积为342.61千hm²,农作物总播种面积为8730.19千hm²,能源作物种植面积合计占农作物总播种面积的46.28%。燃料乙醇主要作物种植面积占农作物总播种面积的比例呈上升趋势,从2005年的31.05%增长为2018年的42.35%;生物柴油主要作物的种植面积占农作物总播种面积的比例呈下降趋势,从2005年的10.05%下降至2018年的3.92%。主要原因是适合生产燃料乙醇的作物中,甜菜和高粱的面积逐年下降,玉米的种植面积逐年增长;适合生产生物柴油的作物中,大豆、油菜籽和棉花的种植面积均呈现逐年下降趋势。

2.3.3 土地利用变化对粮食的影响

从表5可知,北京、唐山、邢台、保定、沧州、衡水处于高耦合水平,廊坊处于磨合阶段,天津、石家庄、秦皇岛、邯郸、承德处于拮抗阶段,张家口处于低耦合水平。京津冀城市群整体土地—粮食系统处于失调状态,其中,唐山、保定处于极度失调状态,北京、石家庄、邯郸、邢台、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水处于严重失调状态,天津、秦皇岛处于中度失调状态。

根据式(2)及土地利用分类数据,计算京津冀城市群2005年、2010年、2015年、2018年土地利用程度综合指数分别为267.22、271.57、272.57、273.64,高于中国总的土地利用程度指数为202的开发利用水平,说明京津冀城市群土地已处于高度开发利用状态。根据土地利用各类型占土地总面积的比例可知,京津冀城市群是以耕地型及其复合型土地覆盖为主,故耕地利用程度的变化对粮食生产起着重要作用。

选取土地利用集约度反映单位土地面积上人类活动的投入,如劳动、技术、资金等,分析土地利用集约度与粮食单产之间的关系。参考邵晓梅^[40]的研究,本文选取粮食单产与六个因子(包括机械总动力、农村用电量、化肥施用量、有效灌溉面积、机耕面积、受灾面积)进行相关分析,有三个因子与粮食单产有较高的相关性,分别为农村用电量、机耕面积、化肥施用量,其中农村用电量与粮食单产的相关系数最高,为0.829,有效灌溉面积、受灾面积与粮食单产的相关系数分别为-0.693、-0.594,均与粮食单产呈负相关,表明土地资源承载能力和土地利用变化均对京津冀城市群粮食单产有重要影响。

总体而言,京津冀城市群土地与水、能源、粮食子系统构成的两要素系统的耦合协调度处于不同程度的失调状态。当多个两要素系统处于严重失调状态时,水—能源—粮食—土地系统有以下两种状态:(1)处于严重失调状态,具体城市为北京、唐山、邯郸、张家口、沧州;(2)处于中度失调状态,具体城市为石家庄、承德。当多个两要素系统处于中度失调状态时,对应的水—能源—粮食—土地系统处于严重失调状态,具体城市为天津。当多个两要素系统处于极度失调状态时,水—能源—粮食—土地系统处于严重失调状态,具体城市为保定。分析可知,土地与水、能源、粮食子系统构成的两要素系统间存在叠加或抵消作用,进而影响水—能源—粮食—土地系统间的协调发展。

京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统处于失调状态,如果不采取积极措施,水、能源、粮食、土地资源间的失调状态会日益加剧,必须积极转变发展方式,推动京津冀城市群水—能源—粮食—土地系统的耦合协调水平进一步提高。水、能源、粮食、土地四者协调与经济高质量发展同时兼顾,建设用地扩张的同时,确保水资源和粮食安全,提高水资源和能源使用效率。合理开发水资源与能源,合理分配建设用地、生态用地与农业用地,基于人地关系协调的视角实现京津冀城市群资源可持续和高质量协调发展。

3 结论

通过ArcGIS 10.2软件分析土地利用类型变化,构建水—能源—粮食—土地系统耦合指标体系,计算出2005—2018年京津冀城市群耦合协调类型,分析京津冀城市群水、能源、粮食与土地间的联系及四要素系统间的相互作用。结果表明:(1)从空间尺度上看,京津冀城市群建设用地由中心向四周扩散,主要是由北京市向四周辐射扩散。从京

京津冀城市群土地利用格局来看,耕地和建设用地面积分别呈现较为明显的减少和增长趋势。(2)从时间角度看,将土地纳入水—能源—粮食系统导致京津冀城市群整体的耦合度和耦合协调度值减小;从空间角度看,京津冀城市群大多数城市2005—2018年的耦合度及耦合协调度均值均减小。(3)京津冀城市群土地与水、能源、粮食子系统构成的两要素系统的耦合协调度均处于失调状态。当多个两要素系统处于严重失调状态时,水—能源—粮食—土地系统处于严重失调或中度失调状态;当多个两要素系统处于中度失调状态时,水—能源—粮食—土地系统会处于严重失调状态;当多个两要素系统处于极度失调状态时,水—能源—粮食—土地系统处于严重失调状态。

基于上述结论,本文提出如下政策建议:

(1)合理规划土地利用方式,在增加城市建设用地的同时保护耕地,提高土地利用效率。将京津冀城市群的发展重心从北京、天津、保定、廊坊等核心功能区转移到其他城市,有效缓解建设用地与耕地的“竞争”局势。

(2)促进土地与水—能源—粮食系统的协调发展,充分发挥京津冀城市群资源优势。京津冀城市群应根据自身地理位置和资源优势合理分配产业布局,加强水、能源、粮食、土地等资源的综合治理,以提高水—能源—粮食—土地的协调发展能力。

(3)促进土地与水—能源—粮食系统整体及子系统的协调发展,提高土地资源利用效率和质量。对于土地资源紧缺城市,鼓励发展第三产业、使用清洁能源,对高耗水、高耗能产业进行技术革新,引进耐旱、高产作物,减少对水、能源、土地等资源的消耗。对于土地资源丰富、人口稀疏的城市,应充分发挥地区资源优势,加快产业结构升级、引进外来人才和先进技术,提升经济发展的总体竞争力。同时要加大环境保护与污染治理的力度,提倡节能减排、节水,同时兼顾“经济发展”与“环保”。

参考文献(References):

- [1] 张力小,张鹏鹏,郝岩,等.城市食物—能源—水关联关系:概念框架与研究展望.生态学报,2019,39(4): 1144-1153. [ZHANG L X, ZHANG P P, HAO Y, et al. Urban food-energy-water nexus: Conceptual frameworks and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1144-1153.]
- [2] HOFF H. Understanding the nexus. Background paper for the Boon 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Boon: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [3] 赵荣钦,李志萍,韩宇平,等.区域“水—土—能—碳”耦合作用机制分析.地理学报,2016,71(9): 1613-1628. [ZHAO R Q, LI Z P, HAN Y P, et al. The coupling interaction mechanism of regional water-land-energy-carbon system. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(9): 1613-1628.]
- [4] 王婧,方创琳,李裕瑞.中国城乡人口与建设用地的时空变化及其耦合特征研究.自然资源学报,2014,29(8): 1271-1281. [WANG J, FANG C L, LI Y R. Spatio-temporal changes and coupling characteristics of urban and rural population and construction land in China. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1271-1281.]
- [5] 金涛.中国粮食作物种植结构调整及其水土资源利用效应.自然资源学报,2019,34(1): 14-25. [JIN T. Adjustment of grain crop planting structure and its effect on utilization of water and soil resources in China. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 14-25.]
- [6] 璩路路,王永生,刘彦随,等.乡村振兴导向的水土资源承载力评价及其优化.自然资源学报,2021,36(2): 300-314. [QU L L, WANG Y S, LIU Y S, et al. Evaluation and optimization of water and soil resources carrying capacity guided by rural revitalization. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(2): 300-314.]
- [7] 米红,周伟.未来30年我国粮食、淡水、能源需求的系统仿真.人口与经济,2010,(1): 1-7. [MI H, ZHOU W. The system simulation of China's grain, fresh water and energy demand in the next 30 years. *Population & Economics*, 2010, (1): 1-7.]

- [8] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 水—能源—粮食关联关系: 区域可持续发展研究的新视角. 中央财经大学学报, 2016, (12): 76-90. [LI G J, HUANG D H, LI Y L. Water-energy-food nexus: New perspective on regional sustainable development. Journal of Central University of Finance & Economics, 2016, (12): 76-90.]
- [9] 白景锋, 张海军. 中国水—能源—粮食压力时空变动及驱动力分析. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660. [BAI J F, ZHANG H J. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660.]
- [10] 李良, 毕军, 周元春, 等. 基于粮食—能源—水关联关系的风险管控研究进展. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(7): 85-92. [LI L, BI J, ZHOU Y C, et al. Research progress of regional environmental risk management: from the perspectives of food-energy-water nexus. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 85-92.]
- [11] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水—能源—粮食安全系统的耦合协调发展研究. 水资源保护, 2021, 37(1): 69-78. [ZHAO L S, LIU S J, SUN C Z. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 69-78.]
- [12] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源—能源—粮食的协同优化. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690. [PENG S M, ZHENG X K, WANG Y, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 681-690.]
- [13] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究: 以京津冀地区为例. 中国农村水利水电, 2019, (5): 17-21, 28. [ZHANG H F, ZENG J J, QU J S, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in high-intensity flow areas: A case study of Beijing, Tianjin and Hebei province. China Rural Water and Hydropower, 2019, (5): 17-21, 28.]
- [14] 李成宇, 张士强. 中国省际水—能源—粮食耦合协调度及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120-128. [LI C Y, ZHANG S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(1): 120-128.]
- [15] LEE S H, CHOI J Y, HUR S O, et al. Food-centric interlinkages in agricultural food-energy-water nexus under climate change and irrigation management. Resources Conservation and Recycling, 2020, 163: 105099, Doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105099.
- [16] WHITE D J, HUBACEK K, FENG K S, et al. The water-energy-food nexus in East Asia: A tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis. Applied Energy, 2018, 210: 550-567.
- [17] GOVINDAN R, AL-ANSARI T. Computational decision framework for enhancing resilience of the energy, water and food nexus in risky environments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 653-668.
- [18] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水—能源—粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真. 管理评论, 2016, 28(10): 11-26. [LI G J, LI Y L, JIA X J, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing. Management Review, 2016, 28(10): 11-26.]
- [19] SLORACH P C, JESWANI H K, CUÉLLAR-FRANCE R, et al. Environmental sustainability in the food-energy-water-health nexus: A new methodology and an application to food waste in a circular economy. Waste Management, 2020, 113: 359-368.
- [20] SHI H Y, LUO G P, ZHENG H W, et al. Coupling the water-energy-food-ecology nexus into a bayesian network for water resources analysis and management in the Syr Darya River Basin. Journal of Hydrology, 2020, 581: 124387, Doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.124387.
- [21] HEUVEL L V D, Blicharska M, Masia S, et al. Ecosystem services in the Swedish water-energy-food-land-climate nexus: Anthropogenic pressures and physical interactions. Ecosystem Services, 2020, 44: 101141, Doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101141.
- [22] LI M, FU Q, SINGH V P, et al. Optimization of sustainable bioenergy production considering energy-food-water-land nexus and livestock manure under uncertainty. Agricultural Systems, 2020, 184: 102900, Doi: 10.1016/j.ag-sy.2020.102900.
- [23] CHAI J, SHI H T, LU Q Y, et al. Quantifying and predicting the water-energy-food-economy-society-environment nexus based on bayesian networks: A case study of China. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120266, Doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120266.

- [24] 罗娅, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 黄河河口镇—潼关区间1998—2010年土地利用变化特征. 地理学报, 2014, 69(1): 42-53. [LUO Y, YANG S T, LIU X Y, et al. Land use change in the reach from Hekouzhen to Tongguan of the Yellow River during 1998-2010. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 42-53.]
- [25] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87. [WANG X L, BAO Y H. Study on the methods of land use dynamics change research. *Progress in Geography*, 1999, 18(1): 81-87.]
- [26] 庄大方, 刘纪远. 中国土地利用程度的区域分异模型研究. 自然资源学报, 1997, 12(2): 105-111. [ZHUANG D F, LIU J Y. Study on the model of regional differentiation of land use degree in China. *Journal of Natural Resources*, 1997, 12(2): 105-111.]
- [27] 何改丽, 李加林, 刘永超, 等. 1985—2015年美国坦帕湾流域土地开发利用强度时空变化分析. 自然资源学报, 2019, 34(1): 66-79. [HE G L, LI J L, LIU Y C, et al. Spatio-temporal analysis of land development and utilization intensity in Tampa Bay watershed from 1985 to 2015. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(1): 66-79.]
- [28] 毕博, 陈丹, 邓鹏, 等. 区域水资源—能源—粮食系统耦合协调演化特征研究. 中国农村水利水电, 2018, (2): 72-77. [BI B, CHEN D, DENG P, et al. The evolutionary characteristics analysis of coupling and coordination of regional water-energy-food. *China Rural Water and Hydropower*, 2018, (2): 72-77.]
- [29] 张明斗, 莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析: 以东北三省34个地级市为例. 资源科学, 2014, 36(1): 8-16. [ZHANG M D, MO D Y. Coupling coordination degree of urban land use benefit and urbanization: A case study of 34 prefecture-level cities in Northeast China. *Resources Science*, 2014, 36(1): 8-16.]
- [30] 田俊峰, 王彬燕, 王士君. 东北三省城市土地利用效益评价及耦合协调关系研究. 地理科学, 2019, 39(2): 305-315. [TIAN J F, WANG B Y, WANG S J. Urban land use efficiency and its coupling relationship in the three provinces of Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(2): 305-315.]
- [31] 刘耀彬, 李仁东, 宋学峰. 中国城市化与生态环境耦合度分析. 自然资源学报, 2005, 20(1): 105-112. [LIU Y B, LI R D, SONG X F. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(1): 105-112.]
- [32] 李裕瑞, 王婧, 刘彦随, 等. 中国“四化”协调发展的区域格局及其影响因素. 地理学报, 2014, 69(2): 199-212. [LI Y R, WANG J, LIU Y S, et al. Spatial pattern and influencing factors of the coordination development of industrialization, informatization, urbanization and agricultural modernization in China: A prefecture level exploratory spatial data analysis. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(2): 199-212.]
- [33] 张引, 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析. 地理学报, 2016, 71(5): 817-828. [ZHANG Y, YANG Q Y, MIN J. An analysis of coupling between the bearing capacity of the ecological environment and the quality of new urbanization in Chongqing. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5): 817-828.]
- [34] 葛世帅, 曾刚, 杨阳, 等. 黄河经济带生态文明建设与城市化耦合关系及空间特征研究. 自然资源学报, 2021, 36(1): 87-102. [GE S S, ZENG G, YANG Y, et al. The coupling relationship and spatial characteristics analysis between ecological civilization construction and urbanization in the Yellow River Economic Belt. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1): 87-102.]
- [35] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系: 以珠江三角洲城市群为例. 热带地理, 1999, 19(2): 171-177. [LIAO C B. Quantitative judgement and classification system for coordination development of environment and economy: A case study of the city group in the Pearl River Delta. *Tropical Geography*, 1999, 19(2): 171-177.]
- [36] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 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. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14. [LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatio-temporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [37] 李孝永, 匡文慧. 京津冀1980—2015年城市土地利用变化时空轨迹及未来情景模拟. 经济地理, 2019, 39(3): 187-194, 200. [LI X Y, KUANG W H. Spatio-temporal trajectories of urban land use change during 1980-2015 and future scenario simulation in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Economic Geography*, 2019, 39(3): 187-194, 200.]
- [38] 陈瑜琦, 王静, 李秀彬. 从土地资源利用的角度看待生物能源发展. 中国土地科学, 2011, 25(4): 20-25. [CHEN Y Q, WANG J, LI X B. Development of biological energy regarding land resource use. *China Land Science*, 2011, 25(4): 20-25.]
- [39] 陈瑜琦, 李秀彬, 盛燕, 等. 发展生物能源引发的土地利用问题. 自然资源学报, 2010, 25(9): 1496-1505. [CHEN Y Q,

LI X B, SHENG Y, et al. Land use changes caused by biofuel production. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(9): 1496-1505.]

- [40] 邵晓梅. 区域土地利用变化及其对粮食生产影响分析: 以山东省为例. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 30-37. [SHAO X M. An analysis on the effect of regional land use change on grain production: A case study in Shandong province. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 30-37.]

Impact of land use change on coupling coordination degree of regional water-energy-food system: A case study of Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration

WANG Yong, SUN Rui-xin

(School of Statistics, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, Liaoning, China)

Abstract: In this paper, the land factor is introduced into the water-energy-food system, and the coupling coordination model is used to study the spatio-temporal change characteristics of the water-energy-food-land system in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2004 to 2017. The results show that: (1) On the spatial scale, the construction land of the study area diffuses from the center to the periphery. In terms of land use pattern of the urban agglomeration, the area of cultivated land and construction land showed a relatively obvious decline and growth trend, respectively. (2) The integration of land into the water-energy-food system reduces the coupling degree and co-scheduling of water-energy-food systems in most cities of this urban agglomeration. (3) The coordination level of land and water-energy-food subsystem will be superimposed or offset, which will affect the coupling coordination of water-energy-food-land system. The research enlightenment of this paper is that considering the coordinated development of water, energy and grain, the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration should understand the impact of land on the whole and internal subsystems of the water-energy-food system, allocate resources reasonably and optimize the industrial layout according to the city's own resource advantages, so as to achieve sustainable development.

Keywords: land use; coupling coordination; water-energy-food system; Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration