

京津冀能源消费碳排放与水资源消耗双重分析

檀菲菲, 江象君

(南京财经大学 江苏产业发展研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: [目的] 探究京津冀区域能源消费碳排放和水资源消耗的影响因素和未来变化, 为该区制定针对性政策提供科学支撑。[方法] 基于京津冀 2002—2012 年能源消耗碳排放的估算, 构建了基于六大行业的能源碳排放和基于三次产业的水资源消耗因素分解模型, 并设定情景分析模型对该区域 2015 和 2020 年的 CO₂ 排放和水资源消耗进行模拟和预测。[结果] (1) 2002—2012 年京津冀能源碳排放呈年均 8.51% 的增速, 累积增长了 226.26%, 以工业能源碳排放为主, 其次是交通运输业和生活消费, 而水资源消耗变化趋势都较稳定; (2) 因素分解结果显示人均财富的变动是京津冀区域 CO₂ 排放量和水资源消耗量增加的最大正向因素, 能耗强度和水耗强度则为最大负向因素; (3) 在设定的所有情景中, 2015 和 2020 年京津冀区域的 CO₂ 排放量分别相比 2005 年至少会增加 553.6 和 819.2 Mt, 水资源消耗量分别相比 2012 年至少增加 $3.36 \times 10^9 \text{ m}^3$ 和 $9.97 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。[结论] 京津冀区域的 3 大产业的水资源消耗量在研究时期内的变化趋势都较稳定, 表明产业结构的调整和产业用水效率的提高将是京津冀区域水资源管理决策的重中之重。

关键词: 京津冀; 能源消费碳排放; 水资源消耗; 因素分解

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0231-09

中图分类号: X24, U261.15

文献参数: 檀菲菲, 江象君. 京津冀能源消费碳排放与水资源消耗双重分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 231-219. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.039

Dual-Analysis on Carbon Emissions of Energy Consumption and Water Resource Consumption of Jing-Jin-Ji Region

TAN Feifei, JIANG Xiangjun

(1. Jiangsu Industry Development Research Institute,

Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing, Jiangsu 210003, China)

Abstract: [Objective] The impacting factors of energy consumption's carbon emissions and water resource consumption were explored, and the change in the future of Jing-Jin-Ji region was analyzed to provide scientific support for making targeted policies. [Methods] Based on the estimation of carbon emissions from energy consumption in the Jing-Jin-Ji region from 2002 to 2012, this study established the factor decomposition models of carbon emissions from energy consumption and water resource consumption. It also set the scenarios analysis model to forecast carbon emissions from energy consumption and water resource consumption in 2020. [Results] (1) Carbon emissions from energy consumption of Jing-Jin-Ji region increased with an average annual rate of 8.5%, the accumulation rate was 226.26%. The main emissions was from industry sector, and the followings were transportation and residential life sectors. Water resource consumption was relatively steady in all three industries. (2) Change of per capita wealth was the most positive factor for both CO₂ emissions and water resource consumption of Jing-Jin-Ji region. While energy intensity and water intensity were two of the most negative factors, and the followings were industrial structure, per capita water resource consumption, population and carbon emission coefficient. (3) Under all scenarios, CO₂ emissions in

收稿日期: 2015-12-31

修回日期: 2016-03-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于空间关联和产业代谢的长江经济带可持续发展评价与调控对策”(71603111); 江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB610007); 江苏高校优势学科建设工程项目

第一作者: 檀菲菲(1988—), 女(汉族), 安徽省安庆市人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事环境经济学与区域可持续发展方面的研究。E-mail: tanfeifei29x@163.com。

2015 and 2020 will increase 553.6 Mt and 819.2 Mt in comparison with the one in 2005, respectively. Water resource consumption will increase 3.36 and 9.97 billion m³ in comparison with the one in 2012. [Conclusion] Water resources consumptions of three major industries in Jing-Jin-Ji region during the study period were relatively stable, which implied that the adjustment of industrial structure and improvement of industrial water use efficiency are the priority for regional water resources management of this region.

Keywords: Jing-Jin-Ji region; carbon emissions from energy consumption; water resource consumption; factor decomposition

过去几十年, 尽管中国经济获得了快速的发展, 却付出了巨大的资源和环境代价, 同时严重的能源资源短缺和环境污染也成为了其实现可持续发展的瓶颈^[1]。目前中国作为最主要的温室气体排放的国家, CO₂排放量将在较长时期内持续增长, 节能减排形势严峻^[2], 而能源消耗被认为是未来 50 a 里大量 CO₂ 排放的主要贡献因子之一^[3]。在此背景下, 中国政府开启了控制温室气体最重要的目标战略, 决定将 2020 年 CO₂/GDP 的值减小到 2005 年的 40%~45%, 同时在“十二五”规划中也要求能源强度 (EC/GDP) 和碳排放强度 (CO₂/GDP) 分别降低 16% 和 17%, 各个省区的“十二五”规划中也分别制定了相应的减排目标。而随着水资源需求的加大, 中国的水资源也逐渐同煤炭等不可再生资源一样, 受制于水资源短缺和水污染引起的压力, 从而日益成为制约经济社会发展的要素^[4]。京津冀区域处于环渤海地区和东北亚的核心区域, 是中国北方经济最发达的地区, 也是中国重要的经济增长极^[5]。随着京津冀区域经济的快速发展和人民生活水平的提高, 水资源不足已经成为该区域的突出矛盾, 也是制约其资源环境承载力的短板因素。因此, 对京津冀区域的能源碳排放和水资源消耗的双重分析研究对处理该区域的碳排放和水资源问题, 制定区域能源和水资源政策以及区域可持续发展的实现具有重要意义。

近年来, 大量的文献研究了关于 CO₂ 排放的问题^[6-7], 一方面主要关注各个尺度上的 CO₂ 排放变化, 并通过结构分解的方法将这种排放变化分解为经济发展、能源消费结构和广义技术水平等变化^[8], 或者通过随机回归模型 (STIRPAT) 分解成人口、富裕度和技术水平的变化^[9], 等。另一方面的研究主要关注 CO₂ 排放、能源消费和经济产出或城市化之间关系^[10-11], 一般通过格林因果和协整检验模型来进行实证研究。国内外众多学者对水资源利用状况也已有多方面多层次的研究, 其中 Zhang 等^[12] 利用结构分解方法对北京 1997—2007 年的水足迹进行分解,

Zhao 等^[13] 采用了迪氏对数平均指数分解法 (LMDI) 解释了 1990—2009 年的中国农业水足迹, 刘耀彬等^[14] 指出水资源对城市化进程约束作用较大, 张陈俊等^[15] 基于改进的 LMDI 方法研究 1997—2011 年中国水资源消耗强度变化的影响因素。然而, 在行业或产业层面上同时对能源消耗碳排放和水资源消耗的特征和驱动因子分析, 并与情景分析结合的研究目前较罕见, 尤其对于京津冀区域而言。故本研究在既有的研究成果的基础上, 结合作者自己的思考, 构建基于行业的能源消费碳排放和水资源消耗的估算和分解模型, 并设定相关的情景分析, 由于 Minx 等^[16] 认为中国 CO₂ 排放的快速增加主要发生在 2002 年之后, 因此本研究从区域和省域的视角对京津冀区域 2002—2012 年的能源消费碳排放和水资源消耗进行实证分析, 探究其根本影响因素和未来变化, 为制定有针对性的政策提供科学支撑。

1 研究方法

1.1 碳排放估算和分解模型

由于具体的区域 CO₂ 排放量是需要估算的, 根据一般能源消费 CO₂ 排放量估算方法来估算, 该方法参考《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》^[9,17], 计算公式为:

$$\text{CO}_2 = (k_1 a \sum_{j=1}^2 \text{EC}_{1,j} + k_2 b \sum_{j=3}^7 \text{EC}_{2,j} + k_3 c \text{EC}_{3,8} + k_4 d \text{EC}_{4,9}) \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中: k_1, k_2, k_3 和 k_4 ——煤类、油类、天然气和电力的碳排放系数; a, b, c, d ——4 种能源项目的折算标准煤系数, 依次为 0.714 3, 1.428 6, 1.33, 0.122 9 t/(kW·h); j ——所有的基本能源项目, 从 1~9 依次表示煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、汽油、燃料油、天然气和电力等 9 项; $\text{EC}_1, \text{EC}_2, \text{EC}_3$ 和 EC_4 ——煤类、油类、天然气和电力等能源的消费量; 转化系数 44/12——CO₂ 和 C 的分子量的比例。而其中各类能

源的碳排放系数参考中国发展改革委员会能源研究所的推荐值^[17],其中煤类、油类、天然气和电力的值分别取 0.747 6,0.582 5,0.443 5 和 0。

同时,本文的行业或部门按照表 1 的分类执行,其中将“交通运输业”单列出来,将批发和零售业、酒店和餐饮服务业以及金融业等合并为“商业”,这种改进的划分方式在研究 CO₂ 排放问题的时候有助于提高数据的可利用性,也能使得碳排放数据、能源消费数据和经济产出数据都具有一致性。

表 1 行业的具体分类说明

部门分类	行业	序号	定义
生产部门	农林牧渔	1	农业、林业、牧业和渔业
	工业	2	除了建筑业以外的工业
	建筑业	3	建筑业
	交通运输业	4	交通运输业、物流业、仓储和通信业
	商业	5	批发和零售业、住宿和餐饮业、金融业以及其他行业
生活部门	居民生活部门	6	人类所有生活消费

此外,应用 LMDI 方法对京津冀区域能源消费碳排放进行因素分解,将生产部门的 CO₂ 排放分解为人口(P)、人均财富(a)、产业结构(s)、能源强度(e)、和碳排放系数(k) 5 个因素的效应,将生活部门的 CO₂ 排放分解为人口(P)、人均生活能源消费(u)、碳排放系数(k) 等 3 个因素效应:

$$CO_2 = CO_2^P + CO_2^L \quad (2)$$

$$CO_2^P = \sum_{m=1}^5 \frac{CO_2^m}{EC^m} \cdot \frac{EC^m}{GDP^m} \cdot \frac{GDP^m}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P \quad (3)$$

$$= \sum_{m=1}^5 k_m \cdot e_m \cdot s_m \cdot a \cdot P$$

$$CO_2^L = \left(\frac{CO_2^m}{EC^m} \cdot \frac{EC^m}{P} \right) \Big|_{m=6} \cdot P \quad (4)$$

$$= k_m \Big|_{m=6} \cdot u \cdot P$$

式中:CO₂——CO₂ 排放总量,它由生产部门(CO₂^P)和生活部门(CO₂^L)的 CO₂ 排放量组成; m ——指部门序号(表 1),根据上述各式可计算 3 个省区及整个京津冀区域的各指标值。

能源消费效应的分解方法一般包括指数分解法和结构分解法,其中广泛适用的方法包括 Laspeyres 和 Divisia,Ang 等^[18-19] 的研究表明 LMDI 可以对所有因素进行无残差分解,甚至可运用到部分残缺数据集的分解上。本文定义能源消费碳排放变化效应为 ΔCO_2 ,根据 LMDI 分解模型 ΔCO_2^P 等于所有生产行

业的 $\Delta k, \Delta e, \Delta s, \Delta a$ 和 ΔP 引起的 CO₂ 变化之和, ΔCO_2^L 等于生活部门的 $\Delta c, \Delta u$ 和 ΔP 之和。测度因素(X)的分解公式为:

$$\Delta X_m = f(CO_{2m}^0, CO_{2m}^T) \cdot \ln \frac{X_m^T}{X_m^0} \quad (5)$$

式中: X —— k, e, s, a, P, u 等, $f(CO_2^0, CO_2^T) = \frac{CO_2^T - CO_2^0}{\ln(CO_2^T / CO_2^0)}$,基于行业 m 的 f 函数即代入 m 即可;0 和 T 的设定是为了研究起始年份到某目标年份的变化或累积变化。

1.2 水资源消耗分解模型

区域水资源消耗的相关数据是可获得的,故水资源消耗量不需要进行估算。然而可以借助碳排放分解模型的思想来构建水资源消耗分解模型。由于统计年鉴中的水资源利用量一般分为农业用水、工业用水、生活用水和环境用水,因此本文认为水资源消耗是相对于 3 个产业而言,即定义农业用水为第一产业,工业用水为第二产业,而生活和环境用水则属第三产业。即水资源消耗总量分解的加法形式如下式所示:

$$W = \sum_{n=1}^3 \frac{W_n}{GDP_n} \cdot \frac{GDP_n}{GDP} \cdot \frac{GDP}{P} \cdot P = \sum_{n=1}^3 \omega_n \cdot s_n \cdot a \cdot P \quad (6)$$

式中: W ——总水资源消耗量; W_n ($n=1, 2, 3$)——第一、二和第三产业的水资源消耗量; GDP_n ——第 n 产业的 GDP; ω, s, a, P ——水耗强度、产业结构、人均财富和人口等 4 个因素。

$$\Delta \omega_n = f(\omega_n^0, \omega_n^T) \cdot \ln \frac{\omega_n^T}{\omega_n^0} \quad (7)$$

式中: $f(\omega_n^0, \omega_n^T) = \frac{\omega_n^T - \omega_n^0}{\ln(\omega_n^T / \omega_n^0)}$,而其中 s, a, P 等 3 个因素引起的水资源消耗量的计算类似于公式(5),并使 n 代替 m 即可。

1.3 情景分析模型设定

若由 CO₂ 排放反映环境影响(I),人均 GDP(g),衡量富裕度(A),则 CO₂ 排放强度(c ,区别于碳排放强度 k)可描述技术水平(T),一般可根据 IPAT 等式来表征它们之间的关系^[20-21],计算公式为:

$$CO_2 = I = P \cdot A \cdot T = P \cdot g \cdot c \quad (8)$$

$$CO_2^t = P^t \cdot g^t \cdot c^t = P^t \cdot \frac{G^t}{P^t} \cdot \frac{CO_2^t}{G^t} \quad (9)$$

式中: P^t, G^t 和 CO_2^t ——第 t 年的人数、GDP 和 CO₂ 排放量; g^t, c^t ——第 t 年的人均 GDP 和 CO₂ 排放强度。从而可得:

$$c^t = \frac{\text{CO}_2^t}{G^t} = \frac{\sum_{i=1}^4 (\text{EC}_i^t \cdot k_i) \times \frac{44}{12}}{G^t} = \quad (10)$$

$$\frac{\text{EC}^t}{G^t} \sum_{i=1}^4 k_i \theta_i \frac{44}{12} = e^t \cdot \sum_{i=1}^4 k_i \times \frac{44}{12}$$

式中: EC_i^t ——第 t 年第 i 种能源项目的能源消费总量; EC^t ——第 t 年的能源消费总量; θ_i ——第 i 种能源占总能源的份额。再结合公式(9)–(10),可得:

$$\text{CO}_2^t = P^t \cdot \frac{G^t}{P^t} \cdot e^t \cdot \sum_{i=1}^4 k_i \theta_i \times \frac{44}{12} \quad (11)$$

$$\text{CO}_2^{t-1} = P^{t-1} \cdot \frac{G^{t-1}}{P^{t-1}} \cdot e^{t-1} \cdot \sum_{i=1}^4 k_i \theta_i \times \frac{44}{12} \quad (12)$$

所消费的能源种类及其碳排放系数相对较稳定,

因此认为 t 和 $(t-1)$ 的综合碳排放系数 $\sum_{i=1}^4 k_i \theta_i$ 不变,则:

$$\frac{\text{CO}_2^t}{\text{CO}_2^{t-1}} = \frac{P^{t-1}(1+B) \times \frac{G^{t-1}(1+C)}{P^{t-1}(1+B)} \times e^t(1+D)}{P^{t-1} \cdot \frac{G^{t-1}}{P^{t-1}} \cdot e^{t-1}} = (1+C) \times (1+D) \quad (13)$$

因此:

$$\text{CO}_2^t = \text{CO}_2^{t-h} \cdot [(1+C) \times (1+D)]^h \quad (14)$$

式中: B, C, D ——表示人口、GDP 和能耗强度的年均增加率; h ——相差的年份。

由公式(13)–(14)可知,GDP 的增长率和能耗强度的变化是造成第 $t-h$ 年到第 t 年的 CO_2 排放的变化,因此,可以基于 GDP 和能耗强度的变化设定不同的情景来预测 CO_2 排放量。

同样,对水资源消耗量也可得到:

$$\frac{W^t}{W^{t-h}} = [(1+C) \times (1+E)]^h \quad (15)$$

由于北京、天津市和河北省的“十二五”规划 GDP 的年均增长率分别设定为 8%,12% 和 8.5%,综合考虑以上增长率,从而京津冀区域 2012—2020 年 GDP 的 3 个情景值(C_1, C_2, C_3)从低到高分别被设定为 8%,9% 和 10%。“十二五”节能减排规划中强调北京、天津市和河北省的 GDP 能耗(即“能耗强度”)相对“十一五”末要分别降低 17%,18% 和 17%,经过换算,则北京、天津和河北的能耗强度分别要保持 -3.66%, -3.89% 和 -3.66% 的年均增长率,从而能耗强度的 3 个情景值(D_1, D_2, D_3)分别被设定为 -3.5%, -3.75% 和 -4.0%。而仅有北京“十二五”规划中明确设定万元地区生产总值水耗至少降低 15%,即“十二五”期间年均增长率至少为 -3.2%,由于北京的技术水平和潜力相对天津和河北更高,因此

综合考虑 3 个省区的实际情况,水耗强度的 3 情景值(E_1, E_2, E_3)分别被设定为 -2.5%, -3.0% 和 -3.5%。全部情景因子的设定值详见表 2。

表 2 京津冀区域 GDP、能耗强度和水耗强度的情景因子值设定

序号	年均增长率/%		
	GDP(C)	能耗强度(D)	水耗强度(E)
1	8.0	-3.50	-2.5
2	8.5	-3.75	-3.0
3	9.0	-4.00	-3.5

因而对 GDP、能耗强度和水耗强度的 3 种情况进行排列组合,即可得到京津冀区域 2012—2020 年能源碳排放和水资源消耗的 9 种情景(表 3)。

表 3 京津冀区域能源碳排放和水资源情景设计

情景	能源 CO_2 排放	情景	水资源消耗
S_1	$C_1 + D_1$	S_1	$C_1 + E_1$
S_2	$C_1 + D_2$	S_2	$C_1 + E_2$
S_3	$C_1 + D_3$	S_3	$C_1 + E_3$
S_4	$C_2 + D_1$	S_4	$C_2 + E_1$
S_5	$C_2 + D_2$	S_5	$C_2 + E_2$
S_6	$C_2 + D_3$	S_6	$C_2 + E_3$
S_7	$C_3 + D_1$	S_7	$C_3 + E_1$
S_8	$C_3 + D_2$	S_8	$C_3 + E_2$
S_9	$C_3 + D_3$	S_9	$C_3 + E_3$

1.4 数据来源

能源和经济数据主要来源于《中国能源统计年鉴(2003—2012年)》《中国统计年鉴(2003—2013年)》《北京统计年鉴(2003—2013年)》《天津统计年鉴(2003—2013年)》《河北经济年鉴(2003—2013年)》,并由相应年份的各类公报补充,水资源数据根据历年的《中国统计年鉴》和《中国水资源公报》整理计算所得。

2 结果分析

2.1 能源碳排放量和水资源消耗量

2.1.1 能源碳排放量分析 能源碳排放的估算结果显示,2002—2012 年天津和河北的 CO_2 排放总量呈明显的增长趋势(图 1),北京呈相对缓慢的增长,3 个省区的绝对排放总量大小依次为:河北 > 天津 > 北京。其中“十二五”之后(2011 和 2012 年)京津冀区域和 3 个省区的增长开始减缓,尤其北京最为显著。2002—2012 年以来,整个京津冀区域 CO_2 排放总量以年均 8.51% 的增速逐年递增,而所划分的 6 大行业 CO_2 排放量的变化各不相同。研究时期内,北京地

区 CO₂ 排放的年均增长率是 3.01%，从 2002—2012 年累积增长了 134.51%，天津和河北地区的年均增长率分别为 7.80% 和 9.90%，累积增长分别达到 211.85% 和 257.02%，而整个京津冀区域累积增长了 226.26%，排放量增至 1 203.397 7 Mt。然而，CO₂ 排放量的人均值大小依次为：天津 > 河北 > 北京。

对于京津冀区域而言，图 1 也显示研究时期内工业的能源碳排放是能源碳排放的主体，每年工业的碳排放量都占总量的 60% 以上。从 2002—2012 年，北京地区的工业碳排放量占碳排放总量的比例由 47.78% 降至 33.37%，天津地区由 74.57% 降至

62.14%，河北地区由 65.14% 增至 75.33%（2007 年）再降至 65.49%。其次是交通运输业和生活消费的能源碳排放量，两者都占据京津冀区域能源碳排放总量的 10% 以上。而在其余 3 行业中，商业部门的能源碳排放的绝对值及其占全区域总排放量的比例增长最明显，以北京的商业部门排放量的增长最为显著，其次是天津地区，而河北地区的商业碳排放的绝对值虽然增加了，其占总量比例的变化较缓。这些结果说明研究时期京津冀区域正处于工业化阶段，而北京地区大力度的产业结构调整对能源消耗的影响已初见起色，天津和河北地区的高能耗业仍具更大的减排空间。

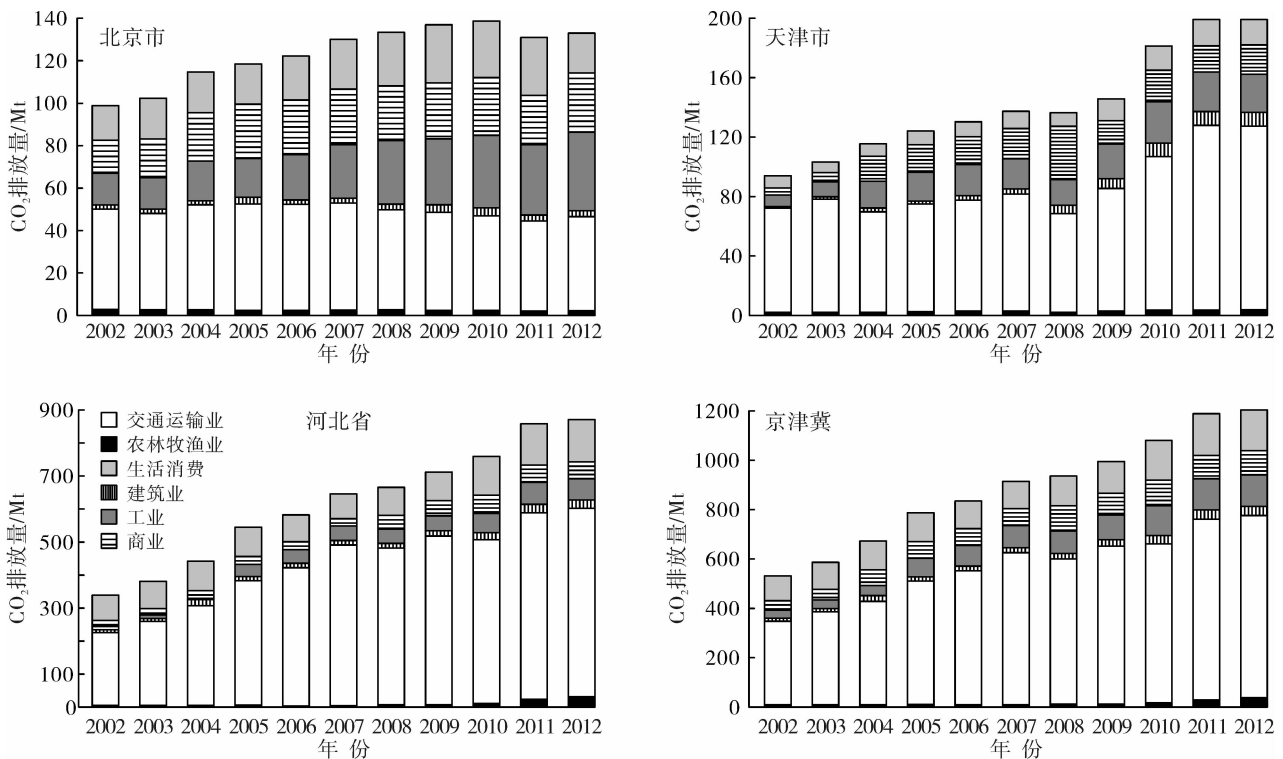


图 1 京津冀区域及各省区 2002—2012 年能源消费碳排放量

2.1.2 水资源消耗量分析 水资源消耗方面，2002—2012 年，北京、天津和河北地区的年均消耗量为 $3.50 \times 10^9 \text{ m}^3$ ， $2.24 \times 10^9 \text{ m}^3$ ， $1.98 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其水资源消耗总量的年均增长率分别是 0.36%，1.48% 和 -0.23%。由于难以获得 3 个省区的第一、二和三产业具体的水资源消耗数据，相关研究见参考文献 [22]，本研究采取替代法，将农业用水代替第一产业用水，工业用水代替第二产业用水，生活用水和环境用水的总和代替第三产业用水。图 2 揭示了 2002—2012 年整个京津冀区域及北京、天津和河北地区各产业用水量的变化情况。从第一产业占总用水量的比例来看，北京、天津和河北地区第一产业的平均用

水量占比分别是 33.95%，54.72% 和 74.17%，而且 2002—2012 年仅北京的地区第一产业占总用水量的比例从 44.63% 降至 25.95%，天津和河北地区第一产业占比的变化缓慢，因此可看出第一产业是这 2 个省区节水的重点产业，河北第一产业的节水尤其应当是重中之重。2002—2012 年，北京、天津和河北地区的第二产业平均用水量占平均总用水量的比例分别是 17.37%，20.56% 和 12.74%，2 市 1 省的二产用水量的差额相对较小，其中仅北京市的第二产业占总用水量的比例下降最大，表明其二产的用水效率显现成效。然而，北京地区的第三产业平均用水量占平均总用水量的比例达到了 48.67%，远超天津

(24.73%)和河北(13.09%)地区,表明北京地区用水较集中于第三产业,这与北京产业结构也是相辅相成的。此外,从万元 GDP 用水量及各产业万元产值用水量等方面来看,研究时期内河北地区万元 GDP 用水量的平均值 $166.81 \text{ m}^3/\text{万元}$,远高于京津地区,

分别是北京和天津地区的 3.37,3.36 倍。因河北地区的人口、经济和能源等各方面占整个京津冀区域的比例较大的影响,研究时期整个京津冀区域的能源碳排放和水资源消耗变化趋势都与河北地区的变化趋势较一致。

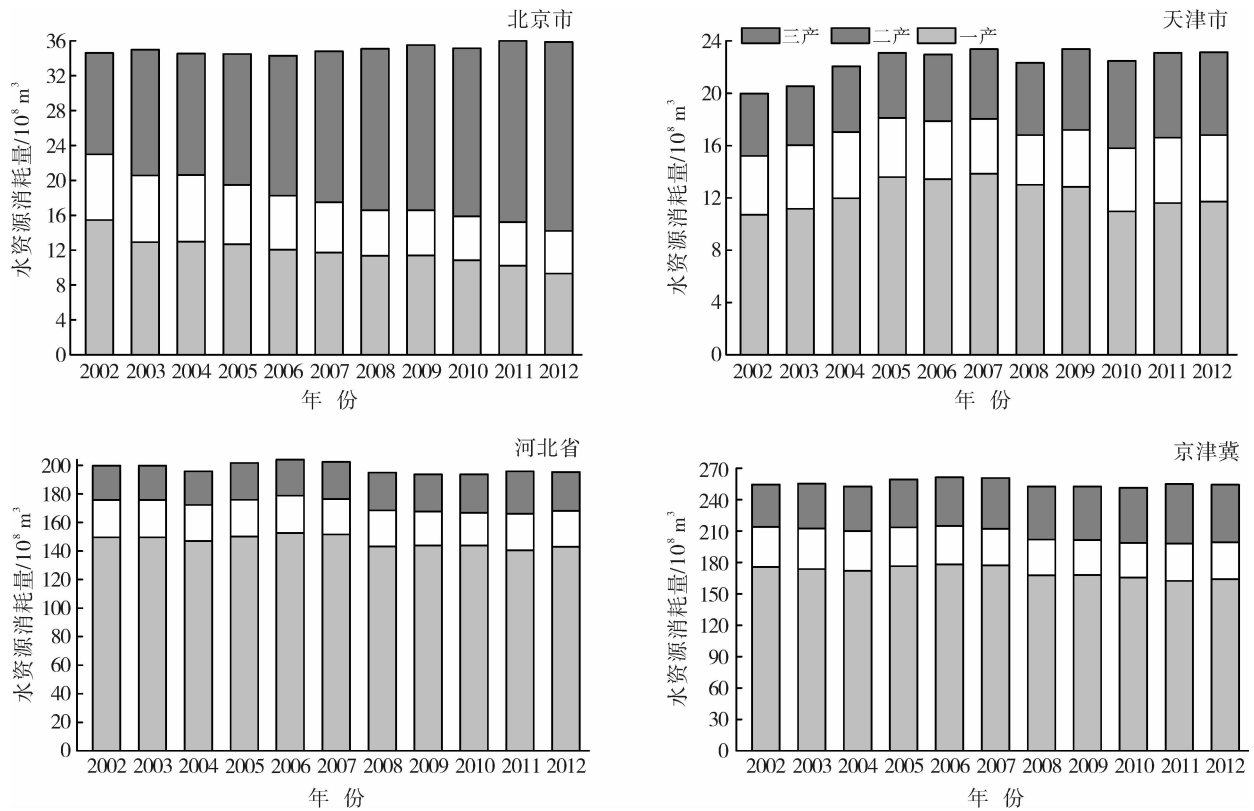
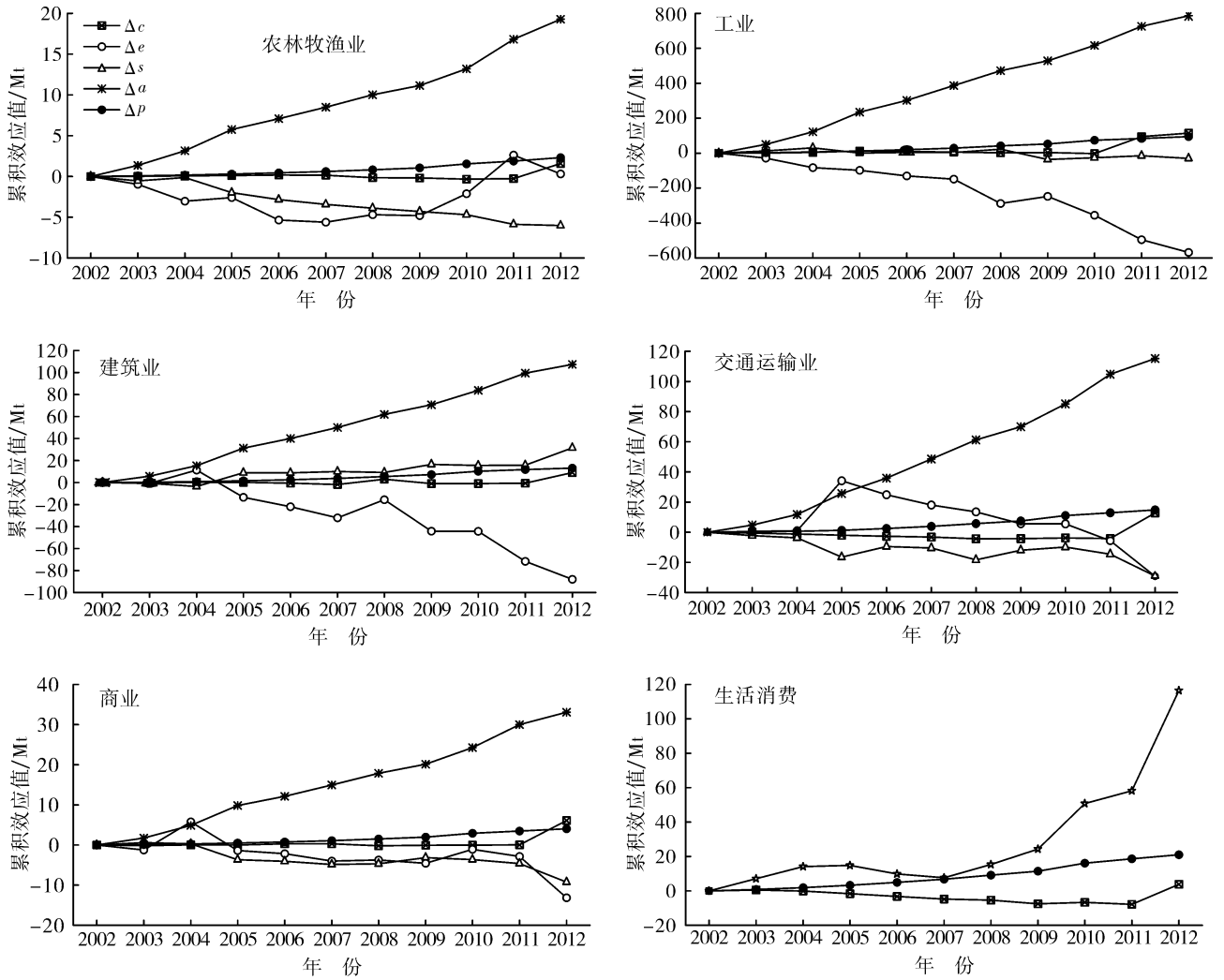


图 2 京津冀区域及各省区 2002—2012 年水资源消耗量

2.2 因素分解

2.2.1 CO_2 排放变化的因素分解 运用上述基于 LMDI 构建的分解模型对京津冀区域 2002—2012 年生产部门的 5 个行业的能源消费 CO_2 排放进行因素分解,可得到研究时期内人口(ΔP)、人均财富(Δa)、产业结构(Δs)、能源强度(Δe)和碳排放系数(Δk)等 5 个因素的累积效应,对生活部门可分解为人口(ΔP)、人均生活能源消费(Δa)和碳排放系数(Δk)等 3 个因素的累积效应(图 3)。图 3 表明,按照累积效应,无论于生产部门的哪个行业人均财富的增长都对碳排放量的增加具有明显的正向影响,而除了农林牧渔业(由于区域内河北为农业大省,由于“十二五”之后农业机械化程度的大幅度提高,农林牧渔业的能源消耗量的增加程度超过了该行业产值的增长程度,导致了其 2011 年后能耗强度的下降),其他行业能源强度的变动都对碳排放量的增加具有一定的负向影响。此

外,京津冀区域人口总数的增长对所有行业或部门碳排放量的增加都产生正向效应,对农林牧渔业、工业、建筑业、交通运输业、商业和生活消费的 2002—2012 年的累积效应 2.3,94.8,4.0,14.8,13.2 和 21.0 Mt。除商业部门外(本质上是由于 2002—2012 年商业产值占地区生产总值的比例越来越高,从基期的 35.67%到“十一五”末的 40.24%,再到“十二五”末的 43.26%,直到 2012 年达到 44.29%),其他行业产业结构的变动都对碳排放量的增加产生负向效应,实际上,由于商业的能耗强度相对其他行业而言是下降的最快的($0.440 \text{ t}/\text{万元}$ 到 $0.162 \text{ t}/\text{万元}$),对碳减排而言这种产业结构的变化是一种优化趋势。对生活消费的碳排放来说,人均生活消费能源的增加是该部门碳排放增加的主导因子。其次,研究时期碳排放系数的变动相对而言所产生的效应是较微弱的,这也为本研究后续情景分析模型的设定奠定了基础。



注: ΔP 为人口, Δa 为人均财富, Δs 为产业结构, Δe 为能源强度, Δk 为碳排放系数, Δu 为人均生活能源消费。下同。

图 3 不同影响因素对京津冀区域 2002—2012 年不同行业 CO₂ 排放变化的累积效应

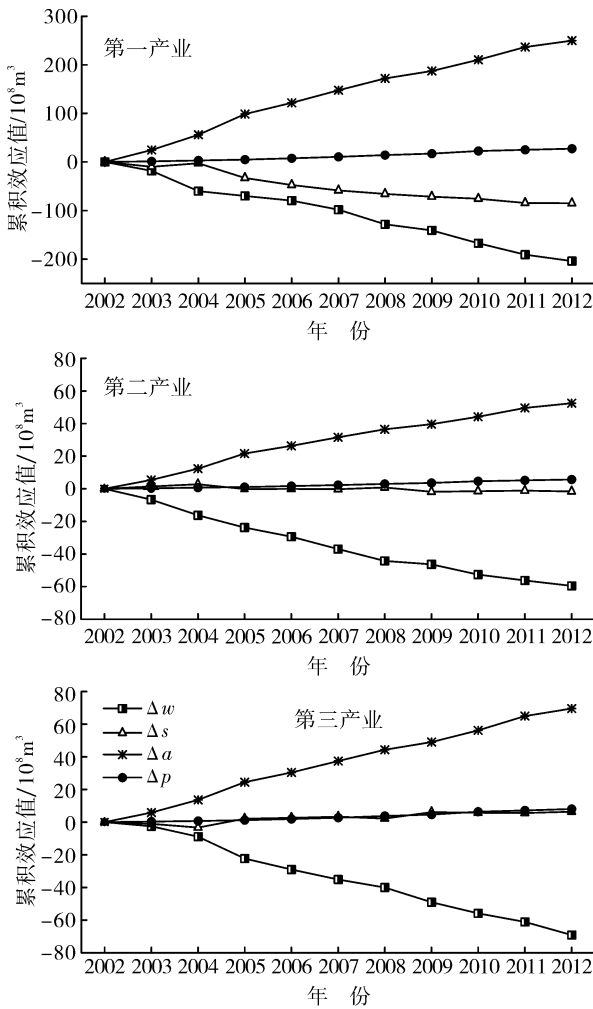
2.2.2 水资源消耗变化的因素分解 2002—2012 年京津冀区域一产和二产的用水消耗量呈现轻微的降低趋势(图 2), 而第三产业用水消耗量呈增加趋势。总体来看, 图 4 显示京津冀区域 3 次产业的水资源消耗变化因素分解的累积效应有类似之处, 比如三次产业的人均财富的和耗水强度的变动都是影响其水资源消耗量最重要的促进和抑制因素。对于第一产业而言, 人均财富(即第一产业的经济规模)的变动导致第一产业用水量增加了 $2.498 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 对第一产业累积用水增量的贡献率达 90.1%, 其次的正向效应的因素则是人口的变动。而第一产业的产业结构和耗水强度的变动都对其水资源消耗总量产生负向的效应, 表明研究时期京津冀区域第一产业的节水政策已初见功效。对于第二产业来说, 人均财富和人口的变动对第二产业累积用水增量的贡献率分别是 90.2% 和 9.8%, 同样其产业结构和耗水强度的变动产生负向效应。而从第三产业来看, 仅有耗水强度是

负向因素, 其他 3 个因素都产生正向的影响, 也便导致了第三产业累积水资源消耗量的增加, 然而, 即使如此, 第一产业仍然是该区域的水资源消耗的重中之重, 表明继续加大京津冀区域农业节水的力度对该区域的可持续发展来说仍然是可行之道。

2.3 情景分析

2.3.1 CO₂ 排放量和水资源消耗量预测 基于公式(14)估算 9 种不同情景的 CO₂ 排放, 可获得京津冀区域 2015, 2020 年的 CO₂ 排放量和水资源消耗量(图 5)。通过比较全部情景的 CO₂ 排放量的预测值, S₃ 和 S₇ 分别是最低和最高预测值, 表明 2015 年京津冀区域的 CO₂ 排放量相比 2005 年至少会增加 553.6 Mt, 至多会增加 846.9 Mt, 2020 年京津冀区域的 CO₂ 排放量相比 2005 年至少会增加 819.2 Mt, 至多会增加 984.0 Mt。结合表 2—3 情景因子的设定, 我们可发现京津冀区域 CO₂ 排放量的最低预测值出现在 GDP 年均增长率最低和能耗强度降低最多 2 个方面同时

实现之时,而最高预测值实现的条件则恰恰相反,再次表明了经济增长率是 CO₂ 排放增长的主要原因,能源消费结构的优化和能源效率的提高是 CO₂ 减排的主要原因。基于公式(15)也估算了 9 种不同情景下京津冀区域 2015 和 2020 年的水资源消耗量,图 5 显示其最低和最高预测值同样出现在 S₃ 和 S₇ 下。其中,2015 年京津冀区域的水资源消耗量相比 2012 年至少会增加 3.36×10⁹ m³,至多会增加 5.09×10⁹ m³,2020 年相比 2012 年至少增加 9.97×10⁹ m³,至多会增加 1.595×10¹⁰ m³。与 CO₂ 排放的结果类似,经济增长率和水资源利用效率则是 2 个重要的调节因子。



注: Δw 为水资源消耗强度。

图 4 不同影响因素对京津冀区域 2002—2012 年 3 次产业水资源消耗量变化的累积效应

2.3.2 CO₂ 排放强度 由于 CO₂ 排放强度指标在控制温室气体的战略目标和国家减排规划中都占据重要的地位,通过以上的预测和分析,可计算出京津冀区域 2015 和 2020 年每种情景下的 CO₂ 排放强度及其减排程度。然而, S₁, S₅ 和 S₆ 的 CO₂ 排放强度依次等于 S₁, S₂ 和 S₃ 的 CO₂ 排放强度, S₇, S₈ 和 S₉ 同样等

于这 3 种情景下的值,因而图 6 中仅显示了这 3 种情景下的 CO₂ 排放强度,究其原因,是由于经济增长率对 CO₂ 排放强度的影响是间接的,会由其他因素反映出来,因此 CO₂ 排放强度的计算无需考虑经济增长率^[22]。S₁, S₂ 和 S₃ 情景下京津冀区域“十二五”末的 CO₂ 排放强度分别是 1.885 7, 1.871 1 和 1.856 5 t/万元,相对“十一五”末分别下降 23.64%, 26.23% 和 29.21%,而 2020 年 CO₂ 排放强度分别是 1.578 0, 1.545 6 和 1.513 8 t/万元,相对 2005 年分别下降 58.57%, 59.42% 和 60.25%。因此,这 3 种情景理论上都可实现 2020 年的 40%~45% 和该地区的“十二五”减排目标,而结合图 5 可知其中 S₃ 情景下的碳排放量增量最少。

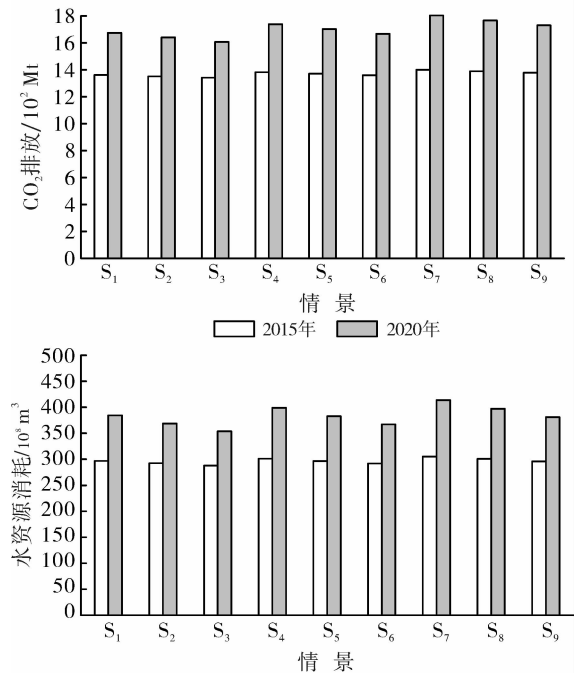


图 5 京津冀区域 2015 和 2020 年 CO₂ 排放和水资源消耗的情景预测值

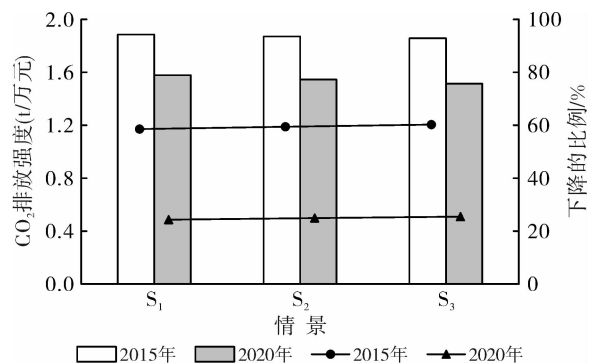


图 6 京津冀区域 2015 和 2020 年 CO₂ 排放强度及其分别相对于 2005 和 2010 年下降的比例

3 结论

(1) 2002—2012年京津冀区域的能源碳排放以年均8.51%的增速增加,而所划分的6大行业的排放变化各不相同,以工业的能源碳排放为主,其次是交通运输业和生活消费的排放,而且其3个省区的绝对排放总量和累积排放总量按大小依次是河北、天津和北京。水资源消耗的变化趋势说明京津冀区域的3大产业的水资源消耗量在研究时期内的变化趋势都较稳定,其中仅有北京呈现第一、二产业用水明显减少和第三产业用水明显增多,而天津和河北各产业的用水量都变化平缓,表明产业结构的调整和产业用水效率的提高将是京津冀区域水资源管理决策的重中之重。

(2) 因素分解结果显示人均财富效应是京津冀区域CO₂排放量和水资源消耗量增加的最大正向因素,这与北京、天津和河北3个省区近10a的GDP一直保持在10%以上的增速密切相关,因而有必要放缓GDP的增速,保证GDP增长的稳定性以及经济环境的协调性。能耗强度和水耗强度则是其CO₂排放量和水资源消耗量增加的最大负向因素,这与北京、天津和河北“十一五”以来都将单位GDP能耗列入政府、企业等部门的考核并加以严格监督管理息息相关,因而今后务须继续推行目标责任制,采取各种措施(如推广节能和清洁能源技术、实施激励政策等)加强节能减排,提高能源利用率,同时单位GDP水耗也开始得以重视。产业结构的变动对CO₂排放量和水资源消耗量增加的影响取决于该行业本身产值比例的增加与否,从而引领新兴低碳产业(如服务业等)发展的方向。人口对排放和碳排放系数具有相对较微弱的正向效应。

(3) 2015和2020年京津冀区域CO₂排放量和水资源消耗量的最低预测值和最高预测值都分别出现在S₃和S₇情景中。2015和2020年京津冀区域的CO₂排放量相比2005年至少会增加553.6和819.2 Mt。同时,2015和2020年京津冀区域的水资源消耗量相比2012年至少会增加 $3.36 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 和 $9.97 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。此外,本文在设定的所有情景下京津冀区域理论上都可实现2020年的40%~45%和各省区的“十二五”减排目标,而S₃情景下的碳排放量和水资源消耗增量都最少。

[参 考 文 献]

[1] Song Malin, Wang Shuhong, Yu Huayin, et al. To reduce energy consumption and to maintain rapid economic

- growth: Analysis of the condition in China based on expanded IPAT model[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2011,15(9):5129-5134.
- [2] 宋佩珊,计军平,马晓明. 广东省能源消费碳排放增长的结构分解分析[J]. *资源科学*, 2012,34(3):551-558.
- [3] Davis S J, Caldeira K, Matthews H D. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure[J]. *Science*, 2010,329(5997):1330-1333.
- [4] Peters G P, Weber C L, Guan D, et al. China's growing CO₂ emissions: A race between increasing consumption and efficiency gains[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007,41(17):5939-5944.
- [5] Jiang Yong. China's water scarcity[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009,90(11):3185-3196.
- [6] 檀菲菲,张萌,李浩然,等. 基于集对分析的京津冀区域可持续发展协调能力评价[J]. *生态学报*, 2014,34(11):3090-3098.
- [7] Tan Zongfu, Li Li, Wang Jianjun, et al. Examining the driving forces for improving China's CO₂ emission intensity using the decomposing method[J]. *Applied Energy*, 2011,88(12):4496-4504.
- [8] 张旺,周跃云. 基于结构分解法的北京市能源碳排放增量分析[J]. *资源科学*, 2013,35(2):275-283.
- [9] Acaravci A, Ozturk I. On the relationship between energy consumption, CO₂ emissions and economic growth in Europe[J]. *Energy*, 2010,35(12):5412-5420.
- [10] Wang Ping, Wu Wanshui, Zhu Bangzhu, et al. Examining the impact factors of energy-related CO₂ emissions using the STIRPAT model in Guangdong Province, China[J]. *Applied Energy*, 2013,106(11):65-71.
- [11] Ozturk I, Acaravci A. CO₂ emissions, energy consumption and economic growth in Turkey[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010,14(9):3220-3225.
- [12] Wang Shaojian, Fang Chuanglin, Guan Xinliang, et al. Urbanisation, energy consumption, and carbon dioxide emissions in China: A panel data analysis of China's provinces[J]. *Applied Energy*, 2014,136(S):738-749.
- [13] Zhang Zhuoying, Shi Minjun, Yang Hong. Understanding Beijing's water challenge: A decomposition analysis of changes in Beijing's water footprint between 1997 and 2007[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(22):12373-12380.
- [14] Zhao Chunfu, Chen Bin. Driving force analysis of the agricultural water footprint in China based on the LMDI method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(21):12723-12731.

干旱区县域土地覆被变化特征及其生态环境效应

——以内蒙古自治区翁牛特旗为例

肖涛¹, 韩广¹, 韩华瑞²

(1. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430000)

摘要: [目的] 研究翁牛特旗的土地利用变化特征及其生态环境效应, 为该地区生态环境重建提供支持。[方法] 选取2006及2015年8月Landsat卫星影像, 通过ENVI 5.1提取出翁牛特旗土地利用数据, 进而利用土地利用动态度、土地利用类型的空间转移矩阵, 以及生物丰度指数、生态系统服务价值和敏感性指数, 分别对翁牛特旗土地利用结构的时空演化特征和生态环境效应进行分析。[结果] (1) 翁牛特旗主要土地利用类型为耕地、林地、草地和沙地, 近10 a来该旗的土地利用变化呈现为耕地、草地、建设用地增加, 林地、沙地和水体面积减少的态势。(2) 10 a间生物丰度指数从2006年的43.47下降为2015年的42.69, 降低1.79%, 表明区域的生物量减少, 不利于生物多样性发展; 生态系统服务总价值从2006年的102.31亿元下降至2015年的98.47亿元, 减少了3.84亿元, 下降了3.75%, 生态环境基本维持着平衡, 总体上呈现出微弱的退化。(3) 各种土地利用类型的敏感性指数(CS)均小于1, 表明研究区生态系统服务价值对于生态服务价值系数不敏感、缺乏弹性。[结论] 研究区林地、水体面积的减少, 建设用地面积的增加是生态系统服务总价值减少的主要原因。研究区土地利用变化引起的生态系统服务价值和生物丰度的减少, 加剧了当地生态环境的脆弱性。

关键词: 翁牛特旗; 土地利用变化; 生态服务价值; 敏感性指数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0240-07

中图分类号: F301.2, X171.1

文献参数: 肖涛, 韩广, 韩华瑞. 干旱区县域土地覆被变化特征及其生态环境效应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 240-246. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.040

County-scaled Change of Land Cover in Arid Region and Its Ecological Environmental Effects

—A Case Study in Wengniute Banner, Inner Mongolia

XIAO Tao¹, HAN Guang¹, HAN Huarui²

(1. College of Resources and Environment, Hunan Normal University, Changsha,

Hu'nan 410081, China; 2. College of Resources and Environment, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430000, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of land use change and the comprehensive effects on eco-environment were assessed to provide a support for ecological reconstruction of the study area. [Methods] Based on the Landsat images of August 2006 and 2015, land use data of Wengniute Banner was extracted with ENVI 5.1. Indicators as land use dynamic degree, and land use type of spatial transfer matrix, and biological richness index, ecosystem service value and sensitivity index, spatial-temporal evolution characteristics and ecological environment effects of Wengniute Banner, Inner Mongolia were used. [Results] (1) The main land use types of Wengniute Banner were farmland, woodland, grassland and sandy land. In recent 10 years, farmland, grassland, construction land increased remarkably; while woodland, sandy land and water area manifested a decreasing trend. (2) Biological abundance index decreased from 43.47 in 2006 to 42.69 in 2015, reduced 1.97%. This is not beneficial to the development of bio-diversity; The total value of ecosystem services declined from 1.0231×10^{10} yuan to 9.8470×10^9 yuan during 2006 to 2015, decreased amount

收稿日期: 2016-04-15

修回日期: 2016-05-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“西辽河平原河岸沙丘带形成演化模式的研究”(41271025); 湖南省重点学科(地理学)建设项目(2012001)

第一作者: 肖涛(1990—), 男(汉族), 湖北省十堰市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感应用。E-mail: 13787027306@163.com。

通讯作者: 韩广(1964—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 博士, 教授, 主要从事风沙地貌、植物生态学研究。E-mail: hanguang@hnu.edu.cn。

and rate were 3.84×10^8 yuan and 3.75%, respectively. Generally, the ecological environment maintains largely a balance, but with a slight degradation; (3) The sensitivity coefficients of various land use types were less than 1, indicating that the ecosystem service value is not sensitive to the coefficient, lacking flexibility. [Conclusion] In the study area, the sharp decrease of ecosystem service value can be attributed to the decrease of woodland and water area, and the increase of construction land. The decreased ecosystem service value and biological abundance resulted from land use change will exacerbate the vulnerability of local ecological environment.

Keywords: Wengniute Banner; land use change; ecological service value; coefficient of sensitivity

地利用/土地覆被变化(LUCC)是全球变化在地球上留下的最直接、最重要遗迹的主要表现形式^[1-2]。随着研究工作的深入,研究的重点已逐渐转向对其生态环境效应的影响,以及根据土地利用变化特征评价区域生态系统服务价值变化的研究方面,在生态系统服务价值评估模型的构建、土地系统和生态系统耦合关系等方面取得了明显进展^[3-6]。

翁牛特旗位于内蒙古自治区东部的赤峰市,是中国典型的农牧交错带,近年来实施了一系列的生态工程,土地利用类型及结构随之发生了较大的变化,并对该旗的生态环境产生了较为明显的影响。2000年科尔沁地区实施退耕还草工程以来,已有学者^[7-8]以退耕还草为背景,对科尔沁沙地个别旗县的土地利用变化生态效应、生态环境质量变化等进行了定性、定量研究。综合当前对科尔沁地区在该领域的研究成果,旗县尺度的研究多集中于奈曼旗、左翼后旗、左翼中旗等旗县,翁牛特旗是当前科尔沁区域流动性沙丘面积分布最大的旗,而对翁牛特旗的相关研究较少。本研究在退牧还草的大背景下,选取2006和2015年的遥感影像,以及生态意义明确的生态特征指数,研究翁牛特旗的土地利用变化特征及其生态环境效应,对于该旗的生态环境的治理和恢复,治沙工程的科学管理,促进土地资源的可持续利用等具有重要的现实意义。

1 研究区概况

该旗地处大兴安岭西南段与七老图北端山脉结合地带,科尔沁沙地西缘,介于 $42^{\circ}26'—43^{\circ}25'N$, $117^{\circ}49'—117^{\circ}49'E$ 之间。东西长约250 km,南北宽约84 km,全旗面积约 1.18×10^4 km²。地势西高东低,海拔高度从2 025 m逐渐下降到286 m,地貌自西向东依次为西部中山台地、中部低山丘陵、东部平原沙丘3个类型区,是内蒙古高原向东北平原过渡带,燕山山脉向松辽平原过渡带,浑善达克沙地向科尔沁沙地过渡带^[9]。翁旗属于典型的中温带半干旱大陆性季风气候,风蚀沙化严重(沙地沙化面积占总面积的46%),水土流失严重(水土流失面积占总面

积的48%),影响气候的主要因素为地理环境和大气环流。年均温为 $4.4 \sim 7.7$ °C,年降雨量少(310~470 mm),变率大,十年九旱。 ≥ 10 °C活动积温大多在2 200~3 250 °C之间,西部高寒山区低于1 500 °C。植被主要为灌木和草本植物,旱生和沙生植被分布广泛。土壤类型主要为棕壤、黑钙土和栗钙土,沙土分布面积广。翁牛特旗先后被列为“三北”防护林二、三期工程建设重点旗、国家防沙治沙重点旗。“十五”之后,翁牛特旗实施了京津风沙源治理、退耕还林、生态建设与保护、重点生态公益林等工程与项目,在国家的支持下较早开展了治沙工程。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及处理

采用翁牛特旗2006年8月Landsat 5TM影像及2015年8月Landsat 8 ETM⁺影像,对影像分别进行几何纠正和大气校正,用1:400万翁牛特旗的矢量行政边界进行裁剪。在野外观测与调查的基础上,进行人机交互解译。运用ENVI 5.1软件对Landsat 5影像和Landsat 8影像进行不同波段组合,准确提取各类地物信息。利用监督分类中的最大似然比法进行分类,依据2007年颁布的《土地利用现状分类》国家标准以及翁牛特旗的土地资源特点,将翁旗的土地利用类型分为耕地、林地、草地、建设用地、水体、沙地等6种类型。对数据进行卷积运算以便去除“椒盐斑点”,通过检验样本利用混淆矩阵法进行精度验证,Kappa系数为82.35%,分类结果符合相关要求。获取并统计土地利用现状及变化数据后,运用ArcGIS 10.0地理信息系统软件形成二期土地利用现状图。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度 土地利用动态度包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度。对土地利用动态度的研究,不仅可以定量的描述区域土地利用变化的速度和区域差异,对未来的土地利用变化趋势具有预测作用^[10]。单一土地利用动态度表达的意义是,某研究区一定时间范围内某种土地利用类型的数量变化情况。其表达式为:

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

式中: K ——研究时段内某一土地利用类型动态度; U_a, U_b ——研究初期及研究末期某一土地利用类型的面积; T ——研究时段长, 将 T 的时段设定为年, 即 K 表示研究区土地利用类型的年变化率。下同。

综合土地利用动态度反映区域土地利用整体变化剧烈程度, 便于在不同空间尺度上找出土地利用变化的热点区域。其表达式为:

$$LC = \left[\frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \right] \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (2)$$

式中: LU_i ——研究初期第 i 类土地利用类型面积; ΔLU_{i-j} ——研究时段内第 i 类土地利用类型转为非 i 类土地利用类型面积的绝对值; T ——研究时段长 (a), 即 LC 表示研究区该时间段内土地利用的年综合变化率。

2.2.2 生物丰度指数 生物丰度指数指通过单位面积上不同生态系统类型在生物物种数量上的差异, 间接地反映被评价区域内生物丰度的丰贫程度。

$$\text{生物丰度指数} = (\text{BI} + \text{HQ}) / 2 \quad (3)$$

$$\text{HQ} = A_{\text{bio}} \cdot \left(\begin{array}{l} 0.35a_1 + 0.21a_2 + 0.28a_3 \\ + 0.11a_4 + 0.04a_5 + 0.01a_6 \end{array} \right) / s \quad (4)$$

式中: BI ——生物多样性指数; HQ ——生境质量指

数; A_{bio} ——生境质量指数的归一化系数, a_i ($i=1 \dots, 6$)——对应的土地利用类型, 本文中依次为林地、草地、水域、耕地、建设用地和未利用地。当生物多样性指数没有动态更新数据时, 生物丰度指数变化等于生境质量指数的变化。生境质量指数通过对不同生境类型分别赋予不同权重值, 将生境质量指数的归一化系数 $A_{\text{bio}} = 511.2642131067$ 代入计算得出^[11]。

2.2.3 土地利用生态环境效应模型 目前国内外对土地利用生态效应的研究, 较为普遍的方法是, 采用生态服务价值估算值对生态效益进行评估。谢高地等^[12]在对中国 200 位生态学者的问卷调查的基础上, 制定出中国生态系统服务价值表, 评价区域生态系统服务功能经济价值。该方法比以往方法更全面、更适用于中国实际情况, 在喀斯特地区、沙漠绿洲、黄土高原等地区的研究中取得了不少成果^[13]。本文同时参考相关文献^[14], 制定出翁牛特旗的生态系统类型的生态系统服务价值表(表 1)。生态系统服务价值的数学公式为^[15]:

$$\text{ESV} = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^9 V_{ij} \cdot A_i \quad (5)$$

式中: ESV ——研究区生态系统服务总价值(元); V_{ij} ——单位面积上土地利用类型 i 的第 j 种生态服务价值(元/ $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$); A_i ——研究区内土地利用类型 i 的分布面积(hm^2)。

表 1 中国不同陆地生态系统单位面积生态服务价值

元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)

服务类型	森林	草地	农田	建设用地	水体	荒漠
气体调节	3 097.0	707.9	442.4	0	0.0	0.0
气候调节	2 389.1	796.4	787.5	0	407.0	0.0
水源涵养	2 831.5	707.9	530.9	0	18 033.2	26.5
土壤形成与保护	3 450.9	1 725.5	1 291.9	0	8.8	17.7
废物处理	1 159.2	1 159.2	1 451.2	0	16 086.6	8.8
生物多样性保护	2 884.6	964.5	628.2	0	2 203.3	300.8
食物生产	88.5	265.5	884.9	0	88.5	8.8
原材料	2 300.6	44.2	88.5	0	8.8	0.0
娱乐文化	1 132.6	35.4	8.8	0	3 840.2	8.8
总计	19 334.0	6 406.5	6 114.3	0	40 676.4	371.4

2.2.4 敏感性分析 敏感性指数 (coefficient of sensitivity, CS) 是指生态服务功能价值系数变动 1% 而引起的生态系统服务价值的变化情况。如果 $\text{CS} > 1$, 表明 ESV 相对于 V 是富有弹性的, 如果 $\text{CS} < 1$, ESV 被认为是缺乏弹性的, 比值越大表明生态服务价值功能指数的准确性越是关键^[16-17]。通过敏感性指数的计算, 便于确定生态系统服务价值随时间

的变化对于生态服务功能价值指数的依赖程度。计算公式为:

$$\text{CS} = \left| \frac{(\text{ESV}_j - \text{ESV}_i) / \text{ESV}_i}{(V_{jk} - V_{ik}) / V_{ik}} \right| \quad (6)$$

式中: CS ——敏感性指数; ESV ——总生态服务价值量; V ——价值系数; i, j ——初始生态系统服务价值和生态服务功能价值指数调整后价值; k ——土地利用类型^[18]。

3 土地利用动态分析

3.1 土地利用的时空变化特征

近年来,随着经济社会不断发展,人类活动对自然环境的干扰强度日益增加,该旗土地利用方式出现明显的变化。由2006—2015年翁牛特旗土地利用变化情况看,草地、耕地和建设用地的面积呈增加趋势,而沙地、林地和水面则呈现减少趋势(表2)。2006年研究区域内土地利用类型中的耕地面积最大,为3 865.56 km²,接近翁牛特旗总面积的1/3。到2015年时,这一比例达到36.2%,面积比2006年增加了470.58 km²,变化率为12.17%,单一土地动态度为1.35(表2)。在空间上,耕地的变化主要位于该旗南部的东庄头营子乡、梧桐花乡、山咀子乡、头牌子乡,东部的大兴乡、白音套海苏木和新苏莫苏木。经济落后、生产力水平低的地区,普遍存在耕地面积扩张的现象^[19],翁牛特旗的耕地扩张正是这种现象。且该区域的人口外迁率较低,农业仍是人民赖以生存的基础产业。从表2可以看出,近10 a来草地面积增加326.12 km²,增加比率为15.16%,单一动态度为1.68,是土地利用变化类型中增加幅度最大的地类。草地变化主要在格日僧苏木、阿什罕苏木、海拉苏镇、高日苏苏木和布力彦苏木的沙地边缘地带,该区域的草地面积显著增加。随着社会经济的发展、产业转型、人口的增加,旗政府对城镇基础设施建设的投入逐步增加,研究区建设用地也呈现扩张趋势,面积从

2006年的75.41 km²增加到2015年的85.35 km²,变化率为13.18%。建设用地主要分布于乌丹镇、其他镇、乡或苏木的核心区域。林地是该旗第2大土地利用类型,2006年林地面积是翁牛特旗总面积的25.98%,到2015年,林地所占比例下降到22.52%,面积减少了411.05 km²,变化率为-13.33%,单一土地动态度为-1.48。林地的变化主要发生在翁牛特旗西部的毛山东乡、头分地乡和广德公乡,南部的解放营子乡和桥头镇。沙地主要分布在该旗中部和东部的布力彦苏木、朝格温都苏木、巴嘎塔拉苏木、高日苏苏木、阿什罕苏木、海拉苏镇、格日僧苏木、高日罕苏木,新苏莫苏木和白音套海苏木的南部,面积广阔。2006年时沙地面积为2 577.14 km²,约占该旗总面积的1/5,到2015年,面积减少363.20 km²,近10 a内的变化率为-14.09%,该区域沙漠化治理取得了明显成果,土地沙化出现好转。由于翁牛特旗位于我国干旱半干旱区,水资源匮乏,同时随着经济发展、人口增加,用水量需求增加,且东部沙地区域植树造林涵养大量地下水,河流与湖泊的补给削弱,水域面积从2006年的120.47 km²减少到2015年的88.08 km²,减少26.89%,在土地利用类型中减幅最大。2006—2015年,翁牛特旗的土地利用总体动态度为0.02,在研究时段翁牛特旗的土地利用类型整体变化幅度不大。只有水域面积变化达到了-26.89%,其他5种土地利用类型的面积变化幅度在12.17%~15.16%之间。

表2 翁牛特旗2006—2015年土地利用变化

项目		沙地	草地	耕地	林地	建设用地	水体
2006年	面积/km ²	2 577.14	2 150.55	3 865.56	3 084.46	75.41	120.47
	比例/%	21.70	18.11	32.56	25.98	0.64	1.01
2015年	面积/km ²	2 213.94	2 476.67	4 336.14	2 673.41	85.35	88.08
	比例/%	18.65	20.86	36.52	22.52	0.79	0.74
面积变化/km ²		-363.20	326.12	470.58	-411.05	9.94	-32.39
变化率/%		-14.09	15.16	12.17	-13.33	13.18	-26.89
单一土地动态度/%		-1.57	1.68	1.35	-1.48	1.46	-2.29
总体动态度		0.02					

3.2 土地利用结构变化特征

翁牛特旗的耕地、林地和建设用地主要分布于该旗的中西部地区,沙地和草地主要位于该旗的东部地区(图1)。从翁牛特旗2006—2015年土地利用类型转移矩阵(表3)可以看出,研究区的6种土地利用类型发生了结构性的转移。翁牛特旗的土地利用类型主要为耕地、林地、草地和沙地,四种土地利用类型的

总面积占翁旗总面积约98%,因此土地利用结构的变化主要发生在这四种类型之间,而建设用地(包括居民点、道路)和水面同期也发生了变化。

面积变化最大的地类是耕地,近10 a来耕地主要转出方向是林地和草地,其次是沙地,分别占耕地转出总面积的42.98%,34.30%和4.55%;而耕地面积的增加主要来源于林地、草地和沙地,分别占转入

耕地总面积的 61.34%, 32.06% 和 4.00%。林地的主要转出方向为耕地、草地和沙地, 转出面积为 741.33, 199.15 和 63.22 km², 而林地面积的增加主要来源于草地、耕地和沙地的转入。

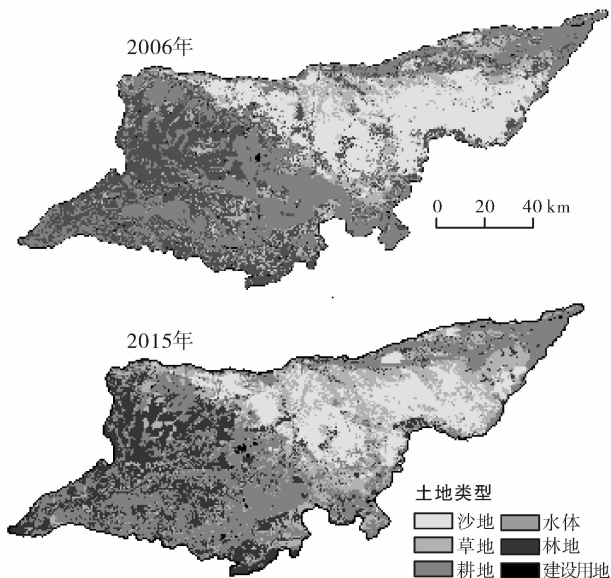


图 1 翁牛特旗 2006 和 2015 年土地利用类型分布图

草地主要转出方向是耕地、林地和沙地, 分别是 387.49, 228.11 和 184.96 km², 转入草地的利用类型中沙地最多, 为 567.84 km², 表明当地的沙漠化趋势有所遏制。然则, 有 184.96 km² 的草地、63.22 km² 的林地和 33.61 km² 的耕地转为沙地, 沙漠化趋势的减弱只是区域性的。

土地利用结构的变化的驱动力主要是社会经济和国家政策因子。近年来, 该旗调整三大产业的比例, 第二、三产业逐步发展, 第二产业比重超过第一产业。相继实施了退耕退牧还草还林政策, 且大力支持农业的发展。一系列的社会因子驱动土地利用结构的剧烈变化。

4 土地利用变化的生态效应

土地利用方式与生态环境之间是相互影响的关系, 土地利用类型的时空变化、结构变化, 必然会驱动区域的生态环境质量的变化。单一的使用一个评价指标, 难以全面客观的反映出土地利用变化的生态效应, 需要利用多个指标进行综合分析。

4.1 生物丰度指数变化

由公式(3)–(4)计算得出, 2006 年研究区生物丰度指数为 43.47, 2015 年为 42.69。10 a 来翁旗生物丰度指数减少了 0.78, 下降了 1.79%, 全旗的生物量呈现减少趋势, 生态环境在整体上呈现一定程度的退化态势。生物丰度指数与植被覆盖度指数具有极大的相似性, 计算二者的相关性系数可知, 其相关性可达 0.963 12^[20], 因此生物丰度指数的下降也可表明植被覆盖度指数的下降, 植被覆盖度降低, 植被数量呈减少趋势。主要原因在于, 一方面, 气候变暖, 降水量减少, 干旱加剧^[21], 致使生态环境退化; 另一方面, 中西部的林地面积减少 13.33%, 水域面积大幅减少 26.89%, 从影响生物丰度指数的权重值中可以看出林地和水体对生物丰度指数的权重值最大。

表 3 翁牛特旗 2006—2015 年土地利用类型转移矩阵

km²

土地类别	沙地	草地	林地	耕地	建设用地	水体	总计
沙地	1 923.90	567.84	34.06	48.42	0.29	2.63	2 577.14
草地	184.96	1 343.15	228.11	387.49	1.32	5.52	2 150.55
林地	63.22	199.15	2 063.42	741.33	11.20	6.14	3 084.46
耕地	33.61	253.16	317.22	3 127.49	23.58	10.03	3 865.56
建设用地	4.12	3.28	10.03	7.42	47.99	2.57	75.41
水体	4.13	9.89	20.57	23.99	0.97	60.92	120.47
总计	2 213.94	2 476.67	2 673.41	4 336.14	85.35	88.08	

4.2 生态系统服务价值的变化

2006 年翁牛特旗的总生态系统服务价值为 102.31 亿元, 林地的生态系统服务价值贡献率最大, 为 59.63 亿元, 占该年份生态系统服务总价值的 58.28%。其次是耕地, 为 23.04 亿元, 所占比例为 22.52%。草地为 13.78 亿元, 占生态系统服务总价值的 13.47%。水体为 4.90 亿元, 占生态系统服务总价值的比例为 4.79%。沙地的生态系统服务价值

最小, 为 0.96 亿元, 占生态系统服务总价值的比例为 0.94%。2015 年的总生态系统服务价值为 98.47 亿元, 总生态系统服务价值构成与 2006 年大体一致, 林地的生态系统服务价值贡献率最大, 其次是耕地、草地、水体和沙地(表 4)。林地的生态系统服务价值量为 51.69 亿元, 比率为 52.49%, 耕地的价值量为 26.51 亿元, 比率为 26.92%。水体和沙地的贡献率都较小, 分别为 3.64% 和 0.84%。

表4 2006—2015年翁牛特旗生态系统服务价值变化

土地类型	2006年		2015年		生态价值变化/ 10^8 元	变化率/%	年变化率/%
	生态价值/ (10^8 元· a^{-1})	比例/%	生态价值/ (10^8 元· a^{-1})	比例/%			
耕地	23.04	22.52	26.51	26.92	3.47	15.06	1.67
林地	59.63	58.28	51.69	52.49	-7.94	-13.31	-1.48
草地	13.78	13.47	15.87	16.11	2.09	15.17	1.69
水体	4.90	4.79	3.58	3.64	-1.26	-25.71	-2.85
建设用地	0	0	0	0	0	0	0
沙地	0.96	0.94	0.82	0.84	-0.14	-14.58	-1.62
总计	102.31	—	98.47	—	-3.84	-3.75	-0.42

2006—2015年期间,生态系统服务总价值减少3.84亿元,减少幅度为3.75%,年均减少0.43亿元,减幅为-0.41%。其中,林地的生态系统服务价值数量变化最大,为-7.94亿元,减幅为-13.31%,年变化率为-1.48%。水体的生态系统服务价值减少幅度最大,价值量减少1.26亿元,变化率为-25.71%。沙地的生态系统服务价值贡献率是最小的,从2006年的0.96亿元下降到2015年的0.84亿元,生态系统服务价值量呈现下降趋势。耕地、草地的生态系统服务价值呈增加趋势,价值变化率分别是15.06%和15.17%。宏观上看,翁旗属于科尔沁沙地一部分,而科尔沁沙地生态脆弱,沙漠化治理难度大,植被恢复周期长,林地、水体对生态系统的贡献尤为重要。翁旗林地和水域面积的减少,直接驱动生态系统服务价值的明显变化。近几十年来,该区域的气候较为稳定,生态环境的变化受自然因子影响较小,而受人文社会因素影响明显,因此生态修复和环境改善需要科学政策的引导。利用区域生态系统服务价值评价生态效应的方法,将不同的土地利用类型的生态效应进行量化,可以直观的反映出生态环境对土地利用变化的响应,进而从生态学角度评价土地利用变化的质量,在近年来得以广泛应用。由于中国疆域广阔,所跨经纬度大,全国地理和人文环境差异明显,对于谢高地等人制定出的全国生态系统服务价值当量表,不能直接应用于全国所有区域。如水体在我国西北、北方地区的生态价值应高于其他地区,在中部、东部地区几乎没有沙地,就不需要用到沙地的生态系统服务价值等。对于谢高地等人制定的全国生态系统服务价值当量表,应因地制宜的选取和修改指标。

4.3 生态服务价值敏感性评价

利用公式(6),把生态系统价值系数分别上下调整50%,计算了研究区域的2006和2015年的生态系统服务价值敏感性指数(表5)。由表5可知,在2006—2015年耕地、草地的敏感性指数呈增长趋势,

林地、沙地和水体的敏感性指数呈减少趋势。表明耕地和草地的生态系统价值系数(V)变化对翁牛特旗生态服务总价值产生放大作用,林地、沙地和水体的生态系统价值系数(V)变化对翁牛特旗的生态服务总价值产生了缩小的作用。沙地的敏感性指数(CS)在0.008~0.009之间,表明沙地的价值系数(V)变化对翁牛特旗的生态服务总价值的变化影响不大。敏感性指数(CS)的最大值是林地,为0.525~0.583之间,说明林地对生态系统总价值的贡献率最大,当林地的生态系统价值系数增加1%时,生态系统服务价值增加0.525%~0.583%。从总体上看,土地利用类型的敏感性指数都小于1,表明研究区的生态系统服务价值对所采用的生态服务价值系数缺乏弹性。

表5 翁牛特旗生态系统服务价值的敏感性指数

年份	耕地	林地	草地	沙地	水体
2006	0.230	0.583	0.135	0.009	0.048
2015	0.269	0.525	0.161	0.008	0.036

5 结论

(1) 2006—2015年翁牛特旗的主要土地利用类型为林地、耕地、沙地和草地,土地利用变化趋势为耕地、草地和建设用地面积增加,水体、沙地和林地的面积减少;耕地的面积变化最大,建设用地的面积变化最小。这些变化主要得益于翁牛特旗所实施的京津风沙源治理、退牧还草、重点生态公益林等工程与项目,在很大程度上遏制了土地沙化趋势,直接影响了草地、沙地等土地利用类型的变化。

(2) 2006—2015年期间翁牛特旗生态系统服务价值主要是由林地、耕地和草地贡献,3种土地利用类型的生态系统服务价值占总价值的94.27%以上,但趋势上生态价值总量是在减少,主要原因是林地和水体面积的大量减少;敏感性指数变化表明,研究区域的生态系统服务价值对于生态价值系数是缺乏弹

性的,生态系统服务价值对生态服务价值系数的敏感程度均小于 1。

(3) 土地利用类型总体较为稳定,然而内部变化较大,驱动生态系统服务功能发生改变,生态系统服务价值受到影响,打破了生态系统原有的平衡。因此,对于翁牛特旗而言,在有步骤地实施土地沙漠化治理、生态脆弱区退耕退牧还草还林工程,维护生态系统服务功能的完整性的基础上,更应该注意到土地利用结构的合理化,各土地利用类型之间的比例的协调性,土地资源利用和生态发展的可持续性。

[参 考 文 献]

- [1] 林海. 中国全球变化研究的战略思考[J]. 地学前沿, 1997,4(1):9-15.
- [2] Salao C, ARM E O. Global biodiversity scenarios for the year 2100 [J]. Science, 2000, 287 (5459): 1770-1774.
- [3] 后立胜,蔡运龙. 土地利用覆被变化研究的实质性分析与进展评述[J]. 地理科学进展,2004,23(6):96-104.
- [4] 俞建华,高中贵,张露,等. 昆山市土地利用变化的生态环境效应研究[J]. 长江流域资源与环境,2005,14(2): 213-217.
- [5] 闵婕,高魏,李晓云,等. 武汉市土地利用时空变化及其生态系统服务价值变化研究[J]. 水土保持学报,2006, 20(4):170-174.
- [6] Turner II B L, David S, Steven S. Land use and land cover change: Science/research planning [C]. Stockholm: IGBP Report, 1995.
- [7] 于艳华. 基于退耕还林还草的科尔沁沙地土地利用变化生态效应研究[D]. 内蒙古 呼和浩特:内蒙古师范大学,2006.
- [8] 李莉,张华. 基于退耕还林还草背景的奈曼旗生态环境质量评价[J]. 国土与自然资源研究,2010(1):48-49.
- [9] 谢花林,李秀彬,陈瑜琦,等. 土地利用规划环境影响的生态安全评价方法初探:以内蒙古翁牛特旗为例[J]. 资源科学,2010,32(1):57-63.
- [10] 张海燕,樊文江,邵全琴. 2000-2010 年中国退牧还草工程区土地利用/覆被变化[J]. 地理科学进展,2015,34 (7):840-853.
- [11] 环境监测总站. HJ/T192-2006 生态环境质量评价技术规范(试行)[S]. 北京:中国环境科学出版社,2006.
- [12] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [13] 马宗文,许学工. 土地变化的生态效应研究方法[J]. 地理与地理信息科学,2011,27(2):80-86
- [14] 吴海珍,阿如早. 基于 RS 和 GIS 的内蒙古多伦县土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 地理科学,2011, 31(1):111-116.
- [15] Costanza R, d'Arge R, Groot R D. The value of the world's ecosystem services and natural Capital [J]. Nature, 1997,387(15):253-260.
- [16] 岳书平,张树文,闫叶超. 东北样带土地利用变化对生态服务价值的影响[J]. 地理学报,2007,62(8):879-886.
- [17] William R G, Dana H, Lynne K, et al. Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA [J]. Ecological Economics, 2011,70(10):1715-1725.
- [18] 李平,李秀彬,刘学军,等. 我国现阶段土地利用变化驱动力的宏观分析[J]. 地理研究,2001,20(2):129-138.
- [19] 姚尧,王世新,周亿,等. 生态环境状况指数模型在全国生态环境质量评价中的应用[J]. 遥感信息,2012,27 (3):93-98.
- [20] 张美杰,春喜,梁阿如娜,等. 近 60 a 科尔沁沙地的气候变化[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(6):8-16.
- [15] 张陈俊,章恒全,龚雅云. 中国结构升级,技术进步与水资源消耗:基于改进的 LMDI 方法[J]. 资源科学, 2014,36(10):1993-2002.
- [16] Minx J C, Baiocchi G, Peters G P, et al. A“carbonizing dragon”: China's fast growing CO₂ emissions revisited [J]. Environmental Science & Technology, 2011,45(21):9144-9153.
- [17] 宋杰鲲. 基于 LMDI 的山东省能源消费碳排放因素分解[J]. 资源科学,2012,34(1):35-41.
- [18] Ang B W. The LMDI approach to decomposition analysis: A practical guide[J]. Energy Policy, 2005, 33 (7):867-871.
- [19] Ang B W. Decomposition analysis for policymaking in energy: Which is the preferred method[J]. Energy Policy, 2004,32(9):1131-1139.
- [20] Li Li, Chen Chenhong, Xie Shichen, et al. Energy demand and carbon emissions under different development scenarios for Shanghai, China[J]. Energy Policy, 2010,38(9):4797-807.
- [21] Yue Ting, Long Ruyin, Chen Hong, et al. The optimal CO₂ emissions reduction path in Jiangsu Province: An expanded IPAT approach [J]. Applied Energy, 2013,112(4):1510-1517.
- [22] 岳书敬,许耀,胡姚雨. 长三角地区行业间水资源消耗差异性分析[J]. 资源科学,2014,36(10):2003-2011.

(上接第 239 页)