

中国水资源行为二氧化碳排放与经济增长 二维脱钩分析

左其亭^{1,2,3}, 刘佳政¹, 蒋国栋¹, 马军霞^{1,2}, 赵晨光¹

(1. 郑州大学水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水循环模拟与水环境保护国际联合实验室, 河南 郑州 450001; 3. 郑州大学黄河生态保护与区域协调发展研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:采用二氧化碳排放当量分析方法计算了我国除港澳台外31个省份2001—2020年12种水资源行为的二氧化碳排放量,并运用二维脱钩模型探究了其与发展水平间的动态关系。结果表明:研究期内,我国水资源行为二氧化碳排放量先增后减,在2010年达到峰值10.4亿t,随后逐年下降,到2020年下降至8.5亿t;我国多数省份逐步实现了水资源行为二氧化碳排放与经济增长间的协同发展,尤其是在2011年之后,大部分省份表现为高经济水平-强脱钩状态,但仍有部分省份出现向高经济水平-弱脱钩状态的转变,暴露出环境保护方面的问题;各省份在不同阶段的二维脱钩状态具有显著差异,应根据地区自身条件制定差异化发展的策略。

关键词:水资源行为;碳排放;经济增长;二氧化碳排放当量分析方法;二维脱钩模型;中国

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)06-0001-09

Two-dimensional decoupling analysis of water resource behavior carbon dioxide emission and economic growth in China//ZUO Qiting^{1,2,3}, LIU Jiazheng¹, JIANG Guodong¹, MA Junxia^{1,2}, ZHAO Chenguang¹ (1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan International Joint Laboratory of Water Cycle Simulation and Environmental Protection, Zhengzhou 450001, China; 3. Yellow River Institute for Ecological Protection & Regional Coordinated Development, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Using the carbon dioxide emission equivalent analysis (CEEA) method, the carbon dioxide emission of 12 water resource behaviors in 31 provinces in China, excluding Hong Kong, Macao, and Taiwan, from 2001 to 2020 were calculated, and dynamic relationship with the level of economic development was explored using a two-dimensional decoupling model. The results show that during the research period, the carbon dioxide emission from water resource behavior in China first increased and then decreased, reaching a peak of 1.04 billion t in 2010, and then decreasing year by year, reaching 850 million t in 2020. Most provinces in China have gradually achieved coordinated development between water resource behavior, carbon dioxide emission, and economic growth. Especially after 2011, most provinces have shown a high economic level-strong decoupling state, but there are still some provinces that have shifted towards a high economic level-weak decoupling state, exposing environmental protection issues. There are significant differences in the two-dimensional decoupling status among provinces at different stages, indicating the importance of formulating differentiated development strategies based on regional conditions.

Key words: water resource behavior; carbon emission; economic growth; CEEA method; two-dimensional decoupling model; China

随着全球气候变暖对生态系统和人类社会构成日益严峻的威胁,国际社会越来越深刻地认识到了减缓温室气体排放的紧迫性。2020年9月,我国提出碳达峰、碳中和的“双碳”目标^[1],标志着我国在应对气候变化方面承担起更大的责任,同时也对国

内外经济社会发展产生了深远影响。清晰地把握经济社会发展与“双碳”目标的有序平衡尤为重要,需要各个领域共同努力,水资源领域的碳减排工作也是其中的关键一环^[2]。因此,明晰水资源行为二氧化碳排放与经济增长间的关系对于平衡经济发展与

基金项目:国家自然科学基金项目(52279027);国家重点研发计划项目(2021YFC3200201)

作者简介:左其亭(1967—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:zuoqt@zsu.edu.cn

通信作者:马军霞(1968—),女,高级实验师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:majx@zsu.edu.cn

环境保护的双重需求具有重要的现实意义和理论价值。

计算水资源行为二氧化碳排放量的主要方法包括投入产出法^[3]、生命周期评价法^[4]、碳排放因子评估法^[5]及二氧化碳排放当量分析(carbon dioxide emission equivalent analysis, CEEA)方法^[6]等。许多学者已经开展了相关研究,如左其亭等^[6]提出 CEEA 方法,并计算了河南省各项水资源行为的二氧化碳排放当量;Wang 等^[7]基于投入产出法分析了我国的水、能、碳之间的相互关系;Xian 等^[8]通过生命周期评价法对深圳市污水处理相关的温室气体减排潜力进行了评估。在分析二氧化碳排放与经济增长间的关系时,研究多围绕 Tapio 脱钩模型进行,如郭炳南等^[9]通过 Tapio 脱钩模型分析了长三角地区二氧化碳排放与经济增长间的脱钩关系。部分学者结合环境库兹涅茨曲线(environmental Kuznets curve, EKC)和 Tapio 脱钩模型,揭示两者动态变化关系,如何洋洋等^[10-12]运用 EKC 和 Tapio 脱钩模型从速度与数量两个维度探究了我国制造业领域二氧化碳排放与经济增长间的动态变化关系;Song 等^[13-14]基于 EKC 和 Tapio 脱钩模型构建二维脱钩模型,解决了传统模型无法识别不同经济发展地区同种脱钩状态的问题。

尽管现有研究广泛探讨了工业和能源领域内二氧化碳排放与经济增长间的二维脱钩关系,但针对水资源领域内二氧化碳排放与经济增长间的关系却鲜有研究。鉴于此,本文采用 CEEA 方法计算 2001—2020 年我国除港澳台外的 31 个省(自治区、直辖市)(以下简称“省份”)的水资源行为二氧化碳排放量,并结合二维脱钩模型,探究不同省份水资源行为二氧化碳排放与经济增长间的二维脱钩关系,以期为我国各省份制定水资源领域的碳减排政策提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

我国是世界第二大经济体,且为目前世界上最大的碳排放国。数据显示,2001—2020 年,我国人均 GDP 由 8 716.68 元增加至 71 828.15 元,同时二氧化碳排放总量由 32.5 亿 t 增加至 98.8 亿 t,在一定程度上影响了经济可持续发展。2000—2020 年,我国总用水量都维持在 5 500 亿~6 000 亿 m³,随着经济发展、技术进步等多方面因素的变化,用水结构及供水结构也发生了变化,而水资源行为产生的二氧化碳排放是影响二氧化碳排放总量的关键因素之一^[2]。

本文对 2001—2020 年 31 个省份水资源行为二

氧化碳排放量进行时序演变规律分析,并研究其与经济发展水平间的二维脱钩关系。研究数据来源于《中国环境统计年鉴》《中国水文年报》《中国水资源公报》《中国海水利用报告》《中国城市建设统计年鉴》《中国水利统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及 31 个省份 2001—2020 年的《水资源公报》等。

2 研究方法

2.1 CEEA 方法及概念说明

CEEA 方法是针对水资源行为的二氧化碳排放当量分析方法^[6,15],具有相对完备的一套函数核算表,该方法已在水资源领域得到较好的应用^[16-17]。水资源行为是包括水资源开发、配置、利用、保护 4 个维度的一系列活动,每个维度都可能产生二氧化碳排放或吸收效应。例如,生活、工业和农业灌溉等终端用水过程往往需消耗一定量的化石能源及电能,用于加热、冷却或提水等,从而导致二氧化碳排放;农田、湿地、水体等自然生态系统在一定程度上具有固碳作用,在用水过程中会吸收二氧化碳^[18-19]。水资源行为二氧化碳排放即具有二氧化碳排放效应的水资源行为所产生的二氧化碳排放^[20]。本文采用 CEEA 方法计算我国各省份的整体水资源行为二氧化碳排放量,涉及 12 种水资源行为,包括地表水提升、地下水抽取、水库蓄水、海水淡化、工业用水、生活用水、城乡自来水分配、农业用水、污水收集、污水处理、跨流域调水、生水处理等行为。

2.2 二维脱钩模型

2.2.1 EKC 假说

EKC 假说用于描述环境污染与人均 GDP 水平之间的倒 U 形曲线关系。该假说认为,在经济发展初期,环境污染会随着人均收入的增加而加剧,但从中长期来看,随着经济活动的结构效应、技术效应以及政府环境规制的共同作用,环境污染会逐渐下降^[21]。本文假设人均水资源行为二氧化碳排放量与人均 GDP 为倒 U 形关系,计算公式为

$$C_t = a_0 + a_1 g_t + a_2 g_t^2 + \varepsilon \quad (1)$$

式中: C_t 为第 t 年的水资源行为二氧化碳排放量; g_t 为第 t 年的人均 GDP,表征经济发展水平; a_0 为截距项,表示人均 GDP 以外的其他解释变量不变时的水资源行为二氧化碳排放量平均值; ε 为随机误差; a_1 、 a_2 为系数,当 $a_1 > 0$ 、 $a_2 < 0$ 时,人均水资源行为二氧化碳排放量与人均 GDP 呈倒 U 形关系。

2.2.2 模型建立

根据 Zuo 等^[18]的研究,我国人均水资源行为二氧化碳排放量与人均 GDP 之间的 Tapio 脱钩弹性系

数计算公式为

$$D = \Delta C / \Delta g = \frac{(C_t - C_0) / C_0}{(g_t - g_0) / g_0} \quad (2)$$

式中: D 为脱钩弹性系数; ΔC 为水资源行为二氧化碳排放量变化量; C_0 为水资源行为二氧化碳排放量初始值; Δg 为人均GDP变化量; g_0 为人均GDP初始值。

联立EKC假说和Tapio模型进行数理推导^[13],提出我国各省份在不同经济发展水平下水资源行为二氧化碳排放与经济增长间的脱钩状态细分方法,找到高低经济分界点 g_c ,计算公式为

$$g_c = -a_1 / (2a_2) \quad (3)$$

将一维Tapio脱钩模型判别标准与式(3)联立^[13],得到16种二维脱钩状态判断标准(表1)。其中,高经济水平-强脱钩代表最理想状态,反映了经济发展达到高经济水平阶段,水资源行为二氧化碳排放量随着经济的下降而下降,且下降速度高于经济增长速度;低经济水平-强负脱钩代表最不理想状态,反映了经济发展处于低经济水平阶段,水资源行为二氧化碳排放量随着经济的下降而增长,且增长速度高于经济下降速度。

3 结果与分析

3.1 水资源行为二氧化碳排放量

3.1.1 我国水资源行为二氧化碳排放量

图1为2001—2020年我国水资源行为二氧化碳排放量。由图1可见,2001—2020年我国水资源行为二氧化碳排放量呈现先增后减的趋势,自2001年9.5亿t逐步增至2010年10.4亿t,然后逐渐下降,到2020年降至8.5亿t。其中,2009年的二氧化碳排放量相较于2008年有所下降,然而2010年的二氧化碳排放量迅速反弹并超过之前的水平,这是由于全球经济波动的影响^[22]。2010—2020年我国水资源行为二氧化碳排放量整体上处于下降状态,这一趋势与我国政府实施的一系列节水减排政策有关。通过对2001—2020年我国水资源行为二氧化碳排放量变化趋势的分析,可以明显发现,我国在水资源管理和环境保护方面取得了长足进展,反映出国家在节水减排及可持续发展方面

表1 二维脱钩状态判断标准

Table 1 Two dimensional decoupling state judgment criteria

D	$\Delta g > 0$		$\Delta g < 0$	
	$g_t < g_c$	$g_t > g_c$	$g_t < g_c$	$g_t > g_c$
< 0	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	低经济水平-强负脱钩	高经济水平-强负脱钩
$0 \sim < 0.8$	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱负脱钩	高经济水平-弱负脱钩
$0.8 \sim < 1.2$	低经济水平-扩张连接	高经济水平-扩张连接	低经济水平-衰退连接	高经济水平-衰退连接
≥ 1.2	低经济水平-扩张负脱钩	高经济水平-扩张负脱钩	低经济水平-衰退脱钩	高经济水平-衰退脱钩

的决心和努力。就具体的水资源行为而言,2001—2020年,地表水提升、地下水抽取、生活用水和工业用水行为持续占据水资源行为二氧化碳排放量的主导地位。地表水提升行为二氧化碳排放量由2001年的6530.96万t降至2020年的5610.34万t,占比由6.87%降至6.58%;地下水抽取行为二氧化碳排放量从3884.99万t降至3029.25万t,占比由4.09%降至3.56%;生活用水的二氧化碳排放量相对平稳,由26311.72万t增长至27923.22万t,占比则由27.68%提高至32.78%;工业用水二氧化碳排放量其排放量由43614.01万t大幅降至31002.42万t,占比由45.89%下降至36.40%。综合而言,上述4类主要水资源行为二氧化碳排放量变化反映了不同用水环节在二氧化碳排放中的相对重要性及其动态演变,突出了持续优化用水管理、提高能源利用效率的必要性,从而在实现可持续发展目标的同时,促进水资源利用的低碳转型。

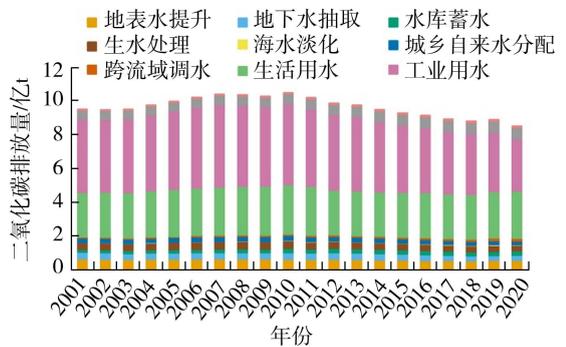


图1 2001—2020年我国水资源行为二氧化碳排放量
Fig. 1 Carbon dioxide emission from water resource behaviors in China from 2001 to 2020

3.1.2 分地区水资源行为二氧化碳排放量

为了便于对比分析,参考文献[20],将我国各省份划分为8个地区:北部沿海、东北地区、黄河中游、东部沿海、长江中游、南部沿海、西南地区、西北地区。各地区及其包含省份的水资源行为二氧化碳排放量计算结果如图2所示。

由图2(a)可见,8个地区水资源行为二氧化碳排放量的多年平均值排名从大到小依次为:东部沿海、长江中游、南部沿海、北部沿海、黄河中游、西南地区、东北地区、西北地区,这一空间分布格局与不

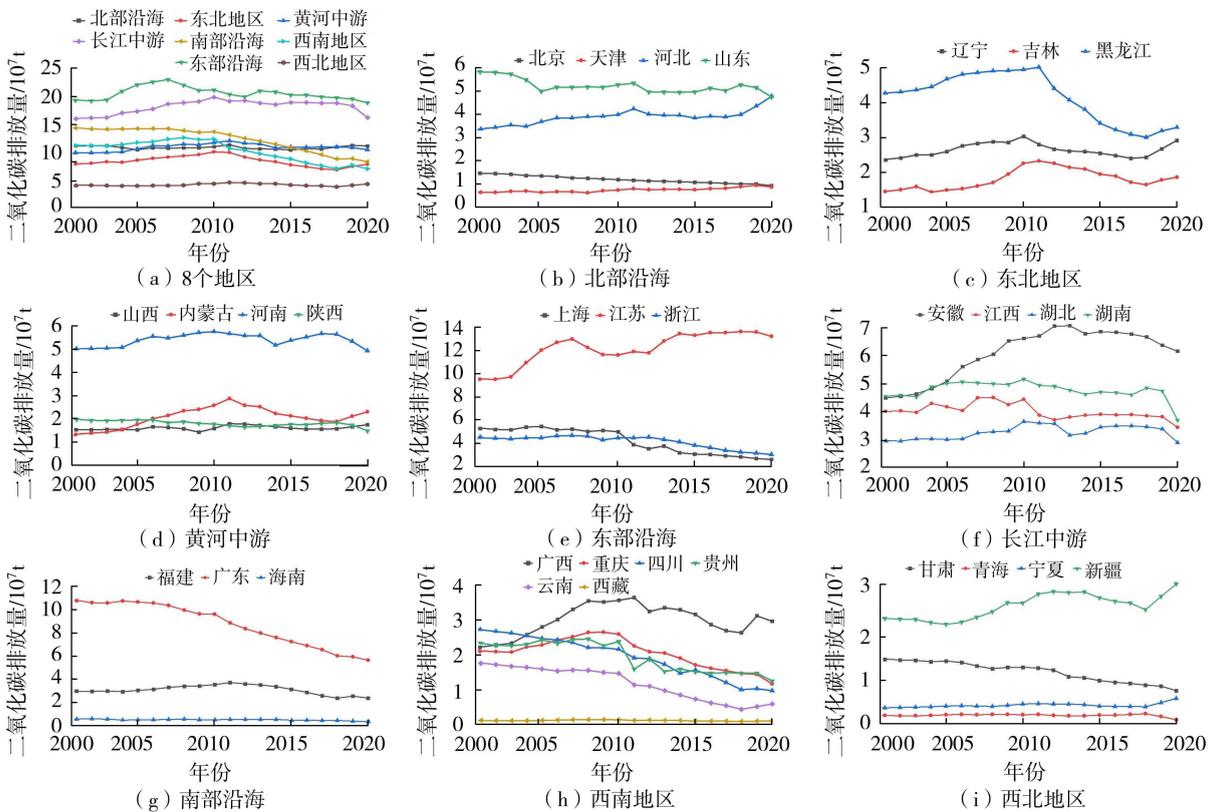


图2 2001—2020年各省份水资源行为二氧化碳排放量

Fig. 2 Carbon dioxide emission from water resource behaviors of each province from 2001 to 2020

同地区的水资源禀赋、经济社会发展水平相匹配。

由图2(b)可见,北部沿海地区中,山东贡献了主要的水资源行为二氧化碳排放量,且呈现波动性下降趋势。进一步分析可知,起主导作用的水资源行为是地下水抽取、工业用水、生活用水等行为,这与山东深入落实最严格水资源管理制度、强力推进地下水超采综合治理、广泛普及农业节水灌溉技术等^[23]努力有关。河北与其相反,水资源行为二氧化碳排放量呈现显著增长趋势,从2001年的3351.38万t增至2020年的4750.17万t,增长率约为40%,主要归因于研究期内河北人口规模和海水淡化规模的逐步扩大^[24]。

由图2(c)可见,东北地区水资源行为二氧化碳排放量多年平均值排名第七。2001—2020年,黑龙江贡献了主要的水资源行为二氧化碳排放量,在2011年达到峰值4995.82万t,经历了先增后减再增的复杂过程。这一时期,起主导作用的水资源行为是农业用水行为,作为我国重要的粮食生产基地,黑龙江农业用水量的增长主导了这一趋势^[25]。2011年之后,黑龙江水资源行为二氧化碳排放量开始明显下降,其中工业用水、生活用水等行为二氧化碳排放量的下降尤为显著,这归因于最严格水资源管理制度的实施使该地区用水总量得以控制。相比之下,吉林水资源行为二氧化碳排放量多年平均值

在该地区最低,为1801.2万t,这一差异的主要原因在于吉林人口规模最小,从而导致相关水资源行为二氧化碳排放量较小。

由图2(d)可见,黄河中游地区水资源行为二氧化碳排放量多年平均值排名第五。2001—2020年,河南水资源行为二氧化碳排放量始终远高于其他3个省份。其中起主导作用的水资源行为是生活、工业、农业用水行为,这是由于较大的人口规模和相对密集的经济活动显著提高了河南的生活、工业、农业用水需求,进而使得水资源行为二氧化碳排放量长期处于高位。就演变趋势而言,2001—2010年河南省水资源行为二氧化碳排放量增长显著,在此期间河南工业产值增加了近5倍,因此工业规模的快速增长所引发的工业用水量激增是导致这一结果的可能原因。2010—2014年,河南水资源行为二氧化碳排放量有所下降,但在此期间南水北调中线工程的通水和生活用水量的增加推动了其水资源行为二氧化碳排放量的再次上升。2018—2020年,河南水资源行为二氧化碳排放量出现下降趋势,这得益于河南节水减排措施的加强实施,比如河南在2019年颁布了《河南省节水行动实施方案》,重点提出推进工业领域节水减排行动。

由图2(e)可见,东部沿海地区水资源行为二氧化碳排放量多年平均值位居首位。该地区作为我国

经济最发达的区域之一,其水资源行为二氧化碳排放量反映了高度工业化和城市化对气候的直接影响。2001—2020年,江苏水资源行为二氧化碳排放量始终处于高位,且呈现出周期性波动增长趋势,同时工业用水行为产生了主要的二氧化碳排放。进一步分析可知,江苏产业结构的调整是这些现象的主要原因,2003—2006年江苏重工业的快速发展及外向型经济战略的实施^[26],导致其工业用水量急剧增加,从而引发水资源行为二氧化碳排放量快速增长;2007—2012年江苏加快产业结构优化升级^[26],提高了工业用水效率,从而减少了水资源行为二氧化碳排放量;2013—2014年出现小幅上升后,江苏水资源行为二氧化碳排放量开始趋于稳定并表现出下降趋势,这反映了江苏在落实最严格水资源管理制度方面取得的显著成效。上海和浙江两省份的水资源行为二氧化碳排放量平均值相接近,分别为4 208.74万t和4 164.34万t,均远低于江苏的12 186.60万t。这一差异主要由人口规模所决定,与浙江和上海相比,江苏常住人口较多,从而导致其相关水资源行为二氧化碳排放量较高。

由图2(f)可见,长江中游地区水资源行为二氧化碳排放量多年平均值位居第二。安徽为该地区水资源行为二氧化碳排放量的主要贡献省份,且该省起主导作用的水资源行为是生活、工业用水行为。2001—2013年其水资源行为二氧化碳排放量从4 510.10万t升至7 024.37万t,这主要受安徽工业规模扩大引起工业用水增长所驱动^[27]。2013年后,安徽水资源行为二氧化碳排放量呈现明显下降趋势,于2020年降至6 137.86万t,这与安徽在此期间实施的节水政策密切相关,如2015年安徽开始实施《安徽省节约用水条例》。相对而言,湖北水资源行为二氧化碳排放量多年平均值最低,这主要是由两省份产业结构上的差异所导致,相较于安徽而言,湖北的第二产业占比较低,而第二产业多为用水密集型产业,直接影响了其水资源行为二氧化碳排放量。

由图2(g)可见,南部沿海地区的水资源行为二氧化碳排放量多年平均值位居第三,整体呈现缓慢下降趋势。广东为该地区水资源行为二氧化碳排放量的主要贡献省份,2001—2020年其水资源行为二氧化碳排放量由10 801.79万t降至5 654.34万t,下降了约47%。该省起主导作用的水资源行为是工业用水行为,近年来广东工业用水效率的显著提高和用水结构的持续优化^[28]致使其水资源行为二氧化碳排放量不断下降。相比之下,海南水资源行为二氧化碳排放量多年平均值在该地区最小,这主要归因于海南较小的人口及产业规模,用水需求较

低^[29],直接影响了相关水资源行为二氧化碳排放量,使其与广东和福建两省份水资源行为二氧化碳排放量存在显著差距。

由图2(h)可见,西南地区的水资源行为二氧化碳排放量多年平均值位居第六,尽管该地区包含6个省份,但水资源行为二氧化碳排放量多年平均值仍低于仅包含3个省份的东部沿海和南部沿海地区,这主要是由于地区人口与经济规模所致。广西水资源行为二氧化碳排放量多年平均值最大,为3 026.57万t,其中主要为生活及工业用水行为所产生的二氧化碳。就演变趋势而言,广西在2001—2011年呈现上升趋势,2011年后则呈现波动下降趋势,在这一时期,国家不断加强的环境治理力度促使广西在水资源利用和管理方面采用更为高效的节水减排技术^[30],从而降低了水资源行为二氧化碳排放量。相比之下,西藏水资源行为二氧化碳排放量多年平均值最小,为146.83万t,这归因于西藏独特的自然条件^[31],限制了人口密度和相应的用水需求,从而导致其水资源行为二氧化碳排放量多年平均值远低于其他省份,这也说明了水资源行为二氧化碳排放量与自然地理条件和经济发展水平密切相关。

由图2(i)可见,西北地区水资源行为二氧化碳排放量多年平均值居末位。新疆水资源行为二氧化碳排放量多年平均值为2 608.11万t,位列西北地区首位,其中主要由地下水抽取和农业用水行为产生。2001—2014年新疆水资源行为二氧化碳排放量由2 336.26万t升至2 930.29万t,这主要与新疆地下水开发利用量较高、农业灌溉规模不断扩大^[32]有关;2014—2018年其值下降至2 536.96万t,这主要得益于2014年新疆开始严格实施的《自治区农业高效标准化、规范化建设及运行管理办法》等相关政策,显著促进了新疆水资源行为二氧化碳排放量的减少^[33];2018—2020年的再度激增则是由于新疆电力系统二氧化碳排放因子的升高,其值由2018年的0.622升至2020年的0.749^[34],这反映了能源结构对水资源行为二氧化碳排放量的重要影响。

3.2 二维脱钩状态

基于人均GDP和水资源行为二氧化碳排放量数据,采用Stata 10.7软件对模型中的 a_0 、 a_1 、 a_2 3个回归系数进行模拟,结果见表2。由表2可见,参数的高模拟适应度表明模型预测准确,且所有变量均在10%的显著性水平下通过显著性检验,表中 t 值用于判断回归系数是否显著为0。具体而言, t 值检验变量对二氧化碳排放的影响是否显著, P 值低于0.1则表明常数项和二次项高度显著、一次项接近显著。我国水资源行为二氧化碳排放量与人均

表2 EKC 回归系数的模拟结果

Table 2 Simulation results of regression coefficients of EKC

回归系数	系数值	标准误差	t 值	P 值
a_0	0.7460	0.0170	44.240	0.000
a_1	0.0198	0.0110	1.900	0.075
a_2	-0.0057	0.0013	-4.360	0.000

GDP 之间的 EKC 呈现倒 U 形关系,人均 GDP 的高低经济分界点为 17456 元。以 5 a 为时间步长,根据二维脱钩状态判断标准,将研究期划分为 4 个子时段:2001—2005 年、2006—2010 年、2011—2015 年、2016—2020 年,4 个子时段各省份水资源行为二氧化碳排放量与经济发展水平的二维脱钩状态见表 3。由表 3 可见,4 个子时段共出现 4 种脱钩状态:高经济水平-强脱钩状态、低经济水平-弱脱钩状态、高经济水平-弱脱钩状态和低经济水平-强脱钩状态,分别出现 61、25、29、9 次。可见,多数省份呈现出由较低脱钩状态(低经济水平-弱脱钩状态和低经济水平-强脱钩状态)向较高脱钩状态(高经济水平-强脱钩状态和高经济水平-弱脱钩状态)转变

表3 4 个子时段各省份二维脱钩状态

Table 3 Two-dimensional decoupling states of 4 stages of each province

省份	二维脱钩状态			
	2001—2005 年	2006—2010 年	2011—2015 年	2016—2020 年
北京	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
天津	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
河北	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
山西	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
内蒙古	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
辽宁	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
吉林	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
黑龙江	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
上海	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
江苏	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩
浙江	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
安徽	低经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩
福建	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
江西	低经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩
山东	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
河南	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
湖北	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
湖南	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
广东	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
广西	低经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
海南	低经济水平-强脱钩	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
重庆	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
四川	低经济水平-强脱钩	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
贵州	低经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
云南	低经济水平-强脱钩	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
西藏	低经济水平-弱脱钩	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
陕西	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩
甘肃	低经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩
青海	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-强脱钩
宁夏	低经济水平-弱脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩
新疆	低经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩	高经济水平-强脱钩	高经济水平-弱脱钩

的趋势。其中,高经济水平-强脱钩状态由 2001—2005 年的 5 次,上升至 2011—2015 年和 2016—2020 年的 26 和 21 次。这一趋势反映了我国在推进经济社会发展和环境保护相统筹的可持续发展理念方面取得了长足进步,体现了国家通过制定和实施一系列重大战略规划和政策措施^[35],不断加大水资源保护和污染治理力度,推动绿色低碳转型发展的成效。

从省级层面来看,北京、浙江和广东等省份在整个研究期间一直保持高经济水平-强脱钩状态,表明这些省份在经济快速增长的同时,水资源行为二氧化碳排放减少速度高于经济发展增长速度,展示出良好的可持续发展模式。这主要归因于这些省份对环保政策较早的积极响应^[36-37],在一定程度上加快了水资源行为二氧化碳排放量的下降速度。相对而言,安徽、江西、广西、贵州、西藏等省份在 2010 年以前均为低经济水平-弱脱钩状态,2010 后才转变为较好脱钩状态(如高经济水平-弱脱钩状态和高经济

水平-强脱钩状态)。这反映了这些省份经济发展相对落后的同时,水资源行为二氧化碳排放量的减少速度高于经济的增长速度,2010年之后的转变也反映了“十二五”规划等国家战略的深入实施,推动各地区深入开展绿色低碳发展,如贵州通过大力发展生态旅游^[38-39]等产业,实现经济增长与环境保护的双赢。

从4个子时段来看,吉林、上海、福建、河南、湖北、湖南、海南、重庆、四川、云南、青海等省份在各个子时期呈现出从较低脱钩状态(如低经济水平-弱脱钩状态和低经济水平-强脱钩状态)向高经济水平-强脱钩状态逐步转变的过程,这一过程反映了这些省份在发展经济的同时,有效地控制了水资源行为二氧化碳排放的增长,实现了经济发展与环境压力逐步脱钩^[40]。这种现象与能源利用效率的提高、节水工程的大力推进等措施存在密切联系。天津、河北、山西、内蒙古、辽宁、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、新疆等省份在各个子时段呈现出脱钩状态在一定程度上的转变,主要表现为高经济水平-强脱钩状态向高经济水平-弱脱钩状态的回转。这反映出在经济高速增长背景下,环境保护与可持续发展依然面临严峻挑战,这主要归因于这些省份普遍位于我国北部和西部地区,属于绿色技术创新与低碳发展水平的低协同区域。

4 结 论

a. 2001—2020年,我国水资源行为二氧化碳排放量经历了先增后减的转变。2010年水资源行为二氧化碳排放量达到峰值10.4亿t,2020年下降至8.5亿t。研究期内,东部沿海地区的水资源行为二氧化碳排放量多年平均值在8个地区中最高,为20559.68万t;西北地区的水资源行为二氧化碳排放量多年平均值最低,为4339.30万t。

b. 我国各省份水资源行为二氧化碳排放量的差异揭示了水资源行为二氧化碳排放量受自然地理条件、经济发展水平、产业结构、政策导向、技术进步和人口规模等因素影响。应当针对不同地区特征制定差异化的节水减排政策,如东部地区需重点控制工业用水,西北地区应加大农业节水力度,优化用水结构。深化区域合作,共享节水减排理念和实践经验;推动节水技术、管理模式创新,并在重点区域和行业开展示范引领;加大宣传教育力度,提升公众节水意识;搭建多元化监督渠道,发挥公众和社会组织的监督作用。

c. 2001—2020年,我国各省份水资源行为二氧化碳排放与经济增长间逐步实现良性互动,尤其在2011年之后几乎所有省份均实现高经济水平-强脱

钩状态,这表明在经济增长的同时,各省份成功控制了水资源行为二氧化碳排放量。但仍存在部分省份出现了从高经济水平-强脱钩状态到高经济水平-弱脱钩状态的转变,这表明在持续推动经济增长的过程中,部分省份面临着环境保护方面的挑战,需要进一步加大政策和技术创新力度,以实现更加持久和稳定的脱钩状态。

d. 不同时段内不同省份二维脱钩状态存在显著差异,这种差异与各地资源禀赋、产业结构、经济发展水平和环保意识等相关。北京、天津、浙江、山东和广东等发达地区较早达到了高经济水平-强脱钩状态;云南、四川、贵州通过发展生态旅游等绿色产业,成功实现了从低经济水平-弱脱钩状态到高经济水平-强脱钩状态的转变。

参考文献:

- [1] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.(WU Qiang, TU Kun, ZENG Yifan. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1884-1898. (in Chinese))
- [2] 左其亭,邱曦,钟涛.“双碳”目标下我国水利发展新征程[J].中国水利,2021(22):29-33.(ZUO Qiting, QIU Xi, ZHONG Tao. China's new journey of water conservancy development under the “carbon peak and neutrality” goals[J]. China Water Resources, 2021(22): 29-33. (in Chinese))
- [3] 王永琴,周叶,张荣.碳排放影响因子与碳足迹文献综述:基于研究方法视角[J].环境工程,2017,35(1):155-159.(WANG Yongqin, ZHOU Ye, ZHANG Rong. A review of the research methods on influencing factors of carbon emissions and carbon footprint[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(1): 155-159. (in Chinese))
- [4] ZAWARTKA P, BURCHART-KOROL D, BLAUT A. Model of carbon footprint assessment for the life cycle of the system of wastewater collection, transport and treatment [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 5799.
- [5] 周兴,郑有飞,吴荣军,等.2003—2009年中国污水处理部门温室气体排放研究[J].气候变化研究进展,2012,8(2):131-136.(ZHOU Xing, ZHENG Youfei, WU Rongjun, et al. Greenhouse gas emissions from wastewater treatment in China during 2003-2009[J]. Climate Change Research, 2012, 8(2): 131-136. (in Chinese))
- [6] 左其亭,赵晨光,马军霞,等.水资源行为的二氧化碳排放当量分析方法及应用[J].南水北调与水利科技(中英文),2023,21(1):1-12.(ZUO Qiting, ZHAO Chenguang, MA Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis method of water resource behaviors and its application [J]. South-to-North Water Transfers and

- Water Science & Technology, 2023, 21 (1): 1-12. (in Chinese))
- [7] WANG X C, KLEMESŠ J J, WANG Y T, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China; an environmental input-output model-based approach [J]. Applied Energy, 2020, 261: 114431.
- [8] XIAN Chaofan, GONG Cheng, LU Fei, et al. The evaluation of greenhouse gas emissions from sewage treatment with urbanization; understanding the opportunities and challenges for climate change mitigation in China's low-carbon pilot city, Shenzhen [J]. Science of the Total Environment, 2023, 855: 158629.
- [9] 郭炳南, 林基, 刘堂发. 长三角地区二氧化碳排放与经济增长脱钩关系的实证研究 [J]. 生态经济, 2017, 33 (4): 25-29. (GUO Bingnan, LIN Ji, LIU Tangfa. An empirical analysis of decoupling relations between economic growth and carbon dioxide emissions in Yangtze River delta region [J]. Ecological Economy, 2017, 33(4): 25-29. (in Chinese))
- [10] 何洋洋, 魏振香. 工业碳排放与经济增长的关系: 基于速度脱钩和数量脱钩的实证研究 [J]. 湖南师范大学 (自然科学学报), 2021, 44(5): 19-29. (HE Yangyang, WEI Zhenxiang. The relationship between industrial carbon emissions and economic growth: a validated analysis based on the decoupling between speed and quantity [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2021, 44(5): 19-29. (in Chinese))
- [11] 杨晓华, 胡怡文. 制造业碳排放和经济增长脱钩关系研究: 基于速度和数量双重视角 [J]. 生态经济, 2021, 37 (4): 13-18. (YANG Xiaohua, HU Yiwen. Research on the decoupling relationship between carbon emissions and economic growth in manufacturing industry: based on dual perspectives of speed and quantity [J]. Ecological Economy, 2021, 37(4): 13-18. (in Chinese))
- [12] JIANG Jingjing, YE Bin, ZHOU Nan, et al. Decoupling analysis and environmental Kuznets curve modelling of provincial-level CO₂ emissions and economic growth in China: a case study [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 1242-1255.
- [13] SONG Yan, ZHANG Ming, ZHOU Min. Study on the decoupling relationship between CO₂ emissions and economic development based on two-dimensional decoupling theory: a case between China and the United States [J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 230-236.
- [14] 夏勇, 钟茂初. 经济发展与环境污染脱钩理论及 EKC 假说的关系: 兼论中国地级城市的脱钩划分 [J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(10): 8-16. (XIA Yong, ZHONG Maochu. Relationship between EKC hypothesis and the decoupling of environmental pollution from economic development: based on China prefecture-level cities' decoupling partition [J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(10): 8-16. (in Chinese))
- [15] 李原园, 李云玲, 何君. 新发展阶段中国水资源安全保障战略对策 [J]. 水利学报, 2021, 52(11): 1340-1346. (LI Yuanyuan, LI Yunling, HE Jun. Strategic countermeasures for China's water resources security in the new development stage [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1340-1346. (in Chinese))
- [16] 蒋国栋, 左其亭, 赵晨光, 等. 中国水资源行为二氧化碳排放当量及空间非均衡性 [J]. 水资源保护, 2024, 40 (2): 72-80. (JIANG Guodong, ZUO Qiting, ZHAO Chenguang, et al. Carbon dioxide emission equivalent and spatial disequilibrium of water resource behaviors in China. [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(2): 72-80. (in Chinese))
- [17] JI Y, ZUO Q, ZHANG Z, et al. Carbon dioxide emission equivalent calculation and inter-sectoral transfer pattern of different water use terminals in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 473: 143561.
- [18] ZUO Qiting, ZHANG Zhizhuo, MA Junxia, et al. Carbon dioxide emission equivalent analysis of water resource behaviors: determination and application of CEEA function table [J]. Water, 2023, 15(3): 431.
- [19] 王菲, 陈敏, 曹永强, 等. 黄河流域九省区水-土-能-碳关联系统网络特征 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (4): 31-37. (WANG Fei, CHEN Min, CAO Yongqiang, et al. Network characteristics of water-land-energy-carbon correlation system of nine provinces along the Yellow River Basin [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(4): 31-37. (in Chinese))
- [20] LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Zhizhou. A new assessment method of sustainable water resources utilization considering fairness-efficiency-security: a case study of 31 provinces and cities in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103839.
- [21] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析 [J]. 管理世界, 2009, 25(4): 27-36. (LIN Boqiang, JIANG Zhujun. A forecast for China's environmental Kuznets curve for CO₂ emission, and an analysis of the factors affecting China's CO₂ emission [J]. Journal of Management World, 2009, 25(4): 27-36. (in Chinese))
- [22] PETERS G P, MARLAND G, LE QUÉRÉ C, et al. Rapid growth in CO₂ emissions after the 2008-2009 global financial crisis [J]. Nature Climate Change, 2012, 2(1): 2-4.
- [23] 封丽, 赵又霖. 华北地下水开采与粮食生产的脱钩效应及其空间差异性研究 [J]. 中国农村水利水电, 2021 (1): 132-138. (FENG Li, ZHAO Youlin. Research on the decoupling effect and spatial difference between groundwater exploitation and grain production in North China plains [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(1): 132-138. (in Chinese))

- [24] 栗鸿强,管云恺,周锋,等.海水淡化发展与趋势研究[J].水处理技术,2023,49(12):19-21. (LI Hongqiang, GUAN Yunkai, ZHOU Feng, et al. Research on the development and trends of seawater desalination [J]. Technology of Water Treatment, 2023, 49(12):19-21. (in Chinese))
- [25] ZHAO Youzhu, JIANG Qiuxiang, WANG Zilong. The system evaluation of grain production efficiency and analysis of driving factors in Heilongjiang province [J]. Water, 2019, 11(5):1073.
- [26] 顾湘,姜海,王铁成,等.工业用地集约利用评价与产业结构调整:以江苏省为例[J].资源科学,2009,31(4):612-618. (GU Xiang, JIANG Hai, WANG Tiecheng, et al. Evaluation of intensive use of industrial land and industrial structure adjustment: a case study of Jiangsu Province [J]. Resources Science, 2009, 31(4):612-618. (in Chinese))
- [27] 张礼兵,徐勇俊,金菊良,等.安徽省工业用水量变化影响因素分析[J].水利学报,2014,45(7):837-843. (ZHANG Libing, XU Yongjun, JIN Juliang, et al. Analysis of influence factors of regional industry water use in Anhui Province [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7):837-843. (in Chinese))
- [28] 周桂欢,鱼京善,王纤阳.广东省工业用水效率评价及其影响因素研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2023,59(3):413-424. (ZHOU Guihuan, YU Jingshan, WANG Xianyang. Industrial water use efficiency and influencing factors in Guangdong Province [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(3):413-424. (in Chinese))
- [29] 甘丰余,林振豪,陈正维.海南省用水结构演变特征及驱动力分析[J].人民黄河,2021,43(增刊1):64-66. (GAN Fengyu, LIN Zhenhao, CHEN Zhengwei. Analysis of water use structure evolution characteristics and driving forces in Hainan Province [J]. Yellow River, 2021, 43(Sup1):64-66. (in Chinese))
- [30] 张杰,邓晓军,翟禄新,等.基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J].水土保持研究,2018,25(5):385-389. (ZHANG Jie, DENG Xiaojun, ZHAI Luxin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of water resources sustainable utilization based on entropy weight in Guangxi [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5):385-389. (in Chinese))
- [31] 张宪洲,何永涛,沈振西,等.西藏地区可持续发展面临的主要生态环境问题及对策[J].中国科学院院刊,2015,30(3):306-312. (ZHANG Xianzhou, HE Yongtao, SHEN Zhenxi, et al. Frontier of the ecological construction support the sustainable development in Tibet Autonomous Region [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(3):306-312. (in Chinese))
- [32] 邓铭江.新疆地下水资源开发利用现状及潜力分析[J].干旱区地理,2009,32(5):647-654. (DENG Mingjiang. Current situation and its potential analysis of exploration and utilization of groundwater resources of Xinjiang [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(5):647-654. (in Chinese))
- [33] 张沛,龙爱华,海洋,等.1988—2015年新疆农业用水时空变化与政策驱动研究:基于农作物水足迹的统计分析[J].冰川冻土,2021,43(1):242-253. (ZHANG Pei, LONG Aihua, HAI Yang, et al. Spatiotemporal variations and driving forces of agricultural water consumption in Xinjiang during 1988-2015; based on statistical analysis of crop water footprint [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):242-253. (in Chinese))
- [34] 中国华能碳中和研究所,生态环境部环境规划院.中国区域电网二氧化碳排放因子研究(2023)[R].北京:中国华能碳中和研究所,生态环境部环境规划院,2023.
- [35] 宋竹芳,徐宁,曹妍雪.中国西部省区旅游生态位测评及旅游空间格局研究[J].北方民族大学学报(哲学社会科学版),2020(2):48-56. (SONG Zhufang, XU Ning, CAO Yanxue. A study on tourism niche evaluation and tourism spatial pattern in Western China [J]. Journal of North Minzu University (Philosophy and Social Science), 2020(2):48-56. (in Chinese))
- [36] 左其亭,李可任.最严格水资源管理制度理论体系探讨[J].南水北调与水利科技,2013,11(1):34-38. (ZUO Qiting, LI Keren. Discussion on theoretical system of the strictest water resources management system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(1):34-38. (in Chinese))
- [37] 唐军.北京居民环保态度和环保行为的社会学分析[J].城市问题,2000(5):23-26. (TANG Jun. Sociological analysis of environmental attitudes and behaviors among residents of Beijing [J]. Urban Problems, 2000(5):23-26. (in Chinese))
- [38] 杨键.浙江节能环保科研大厦[J].建筑学报,2007(8):26-29. (YANG Jian, Zhejiang scientific research building for energy saving and environmental protection [J]. Architectural Journal, 2007(8):26-29. (in Chinese))
- [39] 张翼.中国省域绿色技术创新与低碳发展协同的测度与推进研究[J].技术经济,2020,39(11):36-43. (ZHANG Yi. Research on the measure and promotion of the collaborative relationship between green technology innovation and low carbon development in China [J]. Journal of Technology Economics, 2020, 39(11):36-43. (in Chinese))
- [40] 左其亭,吴青松,马军霞,等.“双碳”目标下水资源行为调控研究框架及展望[J].水资源保护,2023,39(1):8-14. (ZUO Qiting, WU Qingsong, MA Junxia, et al. Research framework and prospect of water resource behavior regulation under carbon peak and carbon neutrality goals [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1):8-14. (in Chinese))