

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230357

双碳目标下京津冀区域间电力行业水足迹研究

彭颖^{a,b}, 周茜^{a,b}

(华北电力大学 a. 经济与管理学院; b. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 为探讨双碳目标下京津冀地区电力行业的生产贸易及相应水足迹是否能满足地区长期发展需求的问题, 构建了一个动态多区域可计算一般均衡模型模拟减碳政策给京津冀地区电力行业生产贸易及其水足迹带来的变化, 模型中设计了4种碳减排方案, 以研究碳税、投资和可再生能源补贴等政策的影响。结果表明, 碳税政策发电节水效果最显著; 减碳政策会大幅增加电力贸易虚拟水的区域间流动; 各种情景下电力行业完全水足迹变化不大(低于15%), 其中北京市电力行业水足迹对减碳政策的敏感度最高。因此, 双碳目标下电力行业的节水重点应着眼于贸易环节, 优化贸易结构, 减少区域间虚拟水流动。

关键词: 水足迹; 发电用水; CGE模型; 可再生能源发电; 双碳目标; 京津冀地区

中图分类号: TV213.4; X22

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)12-0036-05

1 引言

近10年来, 京津冀年用水量约为 $250 \times 10^8 \text{ m}^3$, 几乎每年的水资源生产量均低于用水量, 存在严重的水资源短缺问题^[1]。若维持目前的发电结构, 未来的水资源供应将不足以确保稳定的电力生产。为实现双碳目标, 京津冀协同发展战略以加强能源结构优化调整为关键要素, 未来将大大提升可再生能源发电占比, 在减少碳排放的同时, 也会对发电用水的消耗产生影响。电力水足迹是表征电力生产和消费过程中水资源利用和消耗的重要指标, 也是研究电力贸易中水资源空间转移情况的重要手段, 可反映水-能耦合关系^[2]。京津冀的能源消耗高度依赖外部地区^[3], 因此电力贸易是京津冀电力部门耗水研究中不可忽视的环节, 只从生产端考虑能耗与水耗是不合理的^[4]。本文从京津冀电力贸易及其产生的虚拟水转移问题出发, 分析预测双碳目标下京津冀区域间的电力贸易水足迹变化, 以为京津冀地区水资源可持续利用提供参考。

2 模型与数据

2.1 构建多区域动态可计算一般均衡模型(CGE)

在邓光耀^[5]的研究基础上建立了一个电力部门细分的CGE模型, 并引入水需求测算公式, 用于计算电力行业生产和贸易过程中产生的完全水足迹。模型以2017年为基准年, 预测2017~2060年京津冀地区电力部门的生产和贸易及相应的水足迹, 探究减碳情景下电力生产贸易和水资源的节约所受的影响。

CGE模型中生产模块为5层嵌套结构(图1), 其中要素投入拆分为劳动、资本和能源三类, 化石能源被拆分为煤炭、石油和天然气, 电力能源被拆分为火电、水电、核电与其他可再生能源。

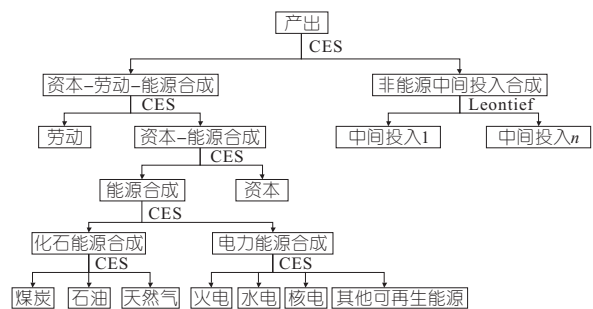


图1 CGE模型生产结构

Fig. 1 Production structure of CGE model

贸易模块也是多层嵌套结构, 包含产品与国外的进出口和国内地区间的流入流出, 见图2。

收稿日期: 2023-03-11, 修回日期: 2023-04-10

基金项目: 北京市社会科学基金项目(19GLB014)

作者简介: 彭颖(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力与水资源需求分析, E-mail: cynthiapeng1998@163.com

通讯作者: 周茜(1984-), 女, 博士、副教授、硕导, 研究方向为水-能耦合, E-mail: zhou. qian@ncepu. edu. cn

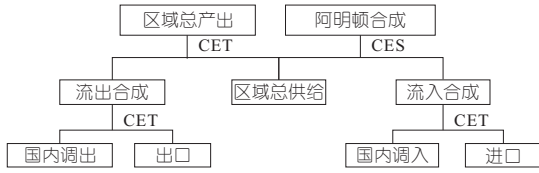


图 2 CGE 模型

Fig. 2 Trade structure of CGE model

2.2 社会核算矩阵(SAM)表

使用的数据基础为 2017 年北京、天津、河北地区 SAM 表,模型中大部分外生变量及参数均可直接从 SAM 表中获取或标定得到。SAM 表是在京津冀区域间投入产出表的基础上构建而成,将标准 42 部门进行了合并拆分得到了 20 个部门。相近的产业进行适当合并,如油气开采业是将石油和天然气开采产品与石油、炼焦产品和核燃料加工品进行合并,一般是将产品的生产和加工环节进行合并。针对不同的发电方式,其碳排放强度和耗水强度均具有显著差异,因此对电力部门进行细分。电力和热力生产部门被拆分为火电、核电、水电和其他可再生能源发电方式。此外,由于京津冀地区无核电,故不考虑核电行业。SAM 表中生产账户与商品账户的数据来源于投入产出表中的数据,各种税收数据来源于 2018 年《中国财政年鉴》,转移支付数据来源于 2018 年《中国统计年鉴》,电力部门不同发电方式的发电量数据来源于 2018 年《中国电力年鉴》。

模型中的生产和贸易替代弹性,为符合中国实际社会经济发展现状,参考贺菊煌等^[6]的研究进行选取。

2.3 耗水系数和水足迹计算

选取不同发电方式下的耗水系数进行计算,当前京津冀地区的冷却方式均为循环冷却。结合中国目前的发电技术和冷却技术,选取 3 种发电方式(火电(循环冷却)、水电及风电、光伏发电)的耗水强度系数分别为 2.4^[7]、5.48、0.01 L/(kW·h)。

电力部门的产量和贸易量可根据 CGE 模型计算得到,引入耗水系数,可得京津冀本地电力生产用水量。水足迹的测算不仅包含生产环节,还需要纳入贸易环节的隐含虚拟水,计算方法为完全生产水足迹=本地生产用水量+虚拟水贸易量。

3 减碳情景设计

模型设计了基线情景和 4 种减碳情景,见表 1。基线情景未实施任何减排政策,社会经济可自然发展。2017 年为研究基年,减碳政策从 2018 年开始实施。

表 1 CGE 模型的情景设计

Tab. 1 Scenario design for CGE models

情景	投资转移	碳税	可再生 能源补贴	具体内容
基线情景	—	—	—	没有其他政策冲击的自然社会经济持续增长
投资情景	o	—	—	将 0.1% 的社会固定资产投资从碳排放密集型产业转移到可再生能源发电部门
碳税情景	—	o	—	对生产环节征收 50 元/t 的碳税,且所有碳税收入归入政府财政
碳税+情景	—	o	o	对生产环节征收 50 元/t 的碳税,且 1/2 的碳税收入再投资于可再生能源发电
组合情景	o	o	o	将 0.1% 的社会固定资产投资从碳排放密集型产业转移到可再生能源发电部门,对生产环节征收 50 元/t 的碳税,且 1/2 的碳税收入再投资于可再生能源发电

注:“—”表示未实施政策,“o”表示实施政策。

减碳情景主要从 2 个角度设计:①改变社会固定资产投资比重,即减少高耗能行业现有投资。根据各生产部门能源投入,可确定 20 部门中其他工业、建筑业和交通运输及仓储和邮政业的能耗强度最高,将这部分投资转移到可再生能源发电部门。根据京津冀协同发展战略的具体要求,对可再生能源的投资增加量约为社会固定资产投资总量的 0.1%。在 CGE 模型中,各行业固定资产投资可通过投资系数进行调整。计算公式为:

$$Q_{QINV_{a,t+1}} = (1 + \delta_a) Q_{QINV_{a,t}} \quad (1)$$

式中, $Q_{QINV_{a,t}}$ 为第 t 年 a 部门的社会固定资产投资; δ_a 为 a 部门的投资系数。②引入碳税。当前国内的碳税水平为 0~100 元/t,选取 50 元/t 进行模拟。碳税为一种从量税,CGE 模型的量化计算是基于相对价格的,因此需将其转化为从价税:

$$t_{tc_a} = c_{ctax} s_{seccar_a} \quad (2)$$

$$T_{TCTAX} = \sum_a t_{tc_a} Q_{QA_a} P_{PA_a} \quad (3)$$

式中, t_{tc_a} 为 a 部门从价碳税率; c_{ctax} 为实际碳税税率,即 50 元/t; s_{seccar_a} 为 a 部门单位价值的碳排放量; T_{TCTAX} 为全产业碳税总额; Q_{QA_a} 、 P_{PA_a} 分别为 a 部门的产量、生产价格。

双碳目标下电力生产和贸易的水足迹核算中,清洁能源发电的比例是一个重要因素。因此,情景设计中还增加了可再生能源补贴,即部分碳税收入被重新投资作为可再生能源发电部门的社会固定资产投资。

4 双碳目标下京津冀区域间电力行业水足迹计算

4.1 电力生产及贸易流动

电力行业的生产和贸易流动的模拟预测结果见图 3。

由图 3 可知,不同情景下京津冀地区的电力

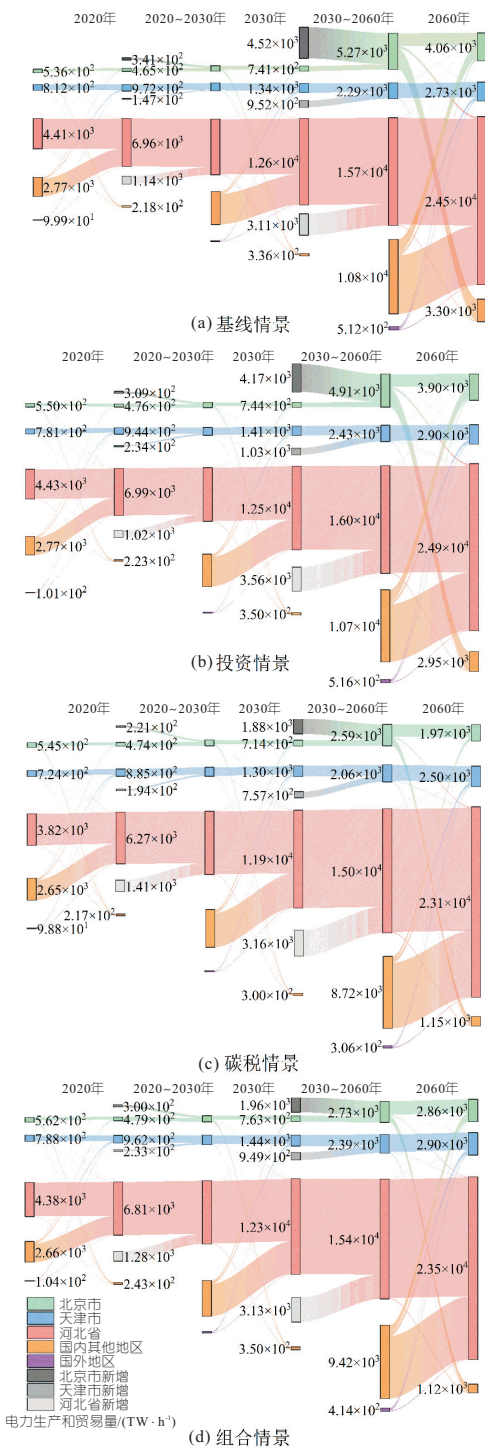


图3 各种情景下京津冀地区电力行业生产和贸易流动
Fig. 3 Production and trade flows of power industry in Beijing-Tianjin-Hebei region under various scenarios

生产和贸易具有差异性,同一政策对不同地区的作用效果也存在空间差异。对于京津冀总体,各情景下的电力最终使用量(生产量+贸易量)差别不大。碳税政策对电力生产和消费的抑制作用相对明显,这是由于碳税的征收加大了生产成本从而抑制生产,而成本的上升会让生产者将多出来的一部分成本转移给消费者负担,导致电价上升使电力消费减少。投资政策对天津市和河北省的

电力生产和消费有一定的促进作用,然而北京市在投资情景下电力生产会有所下降。从电力贸易角度来看,相比于基线情景,投资情景下电力贸易会增加,碳税情景下会下降。这是因为投资政策不会直接抑制电力的生产,而是将碳排放密集型产业的社会固定资产投资转移到对可再生能源发电的投资,短期内地区电力生产会下降,但可再生能源发电厂一旦建成投产,就会大大提升地区发电能力,也会使贸易更加活跃。而碳税政策是直接对生产进行抑制,来增加成本的减少生产以达到减碳的目的。此外,电力贸易的输送过程中也会产生碳排放,所以碳税政策的实施也会增加电力贸易成本,从而抑制电力贸易。在组合情景下,2060年北京市、天津市、河北省的发电量分别为 2.73×10^3 、 2.39×10^3 、 1.54×10^4 TW·h,相比于基线情景的变化率分别为-48.20%、4.37%、-1.91%。由此可见,减碳政策的实施对北京市的发电量影响最明显。从贸易环节来看,减碳政策的实施对三地的电力贸易均有明显的抑制作用。但从电力的最终使用量来看,天津市和河北省两地并无明显影响,但北京市的电力使用会大大下降。这可能是因为北京市的第三产业占比高达80%以上,高于其他两地,使碳税政策的抑制作用会远大于投资政策对生产的促进。在这种组合情景下,未来北京市的电力供应能否满足社会生产生活的需要值得进一步探讨。

4.2 电力部门水足迹核算

根据电力生产和贸易的预测结果,在动态多区域CGE模型中引入不同发电方式的耗水系数,得到各种情景下的水足迹核算结果,见表2。由表2可知:①从生产环节来看。碳税政策对发电生产的节水效果最显著,投资政策在短期会对发电生产有一定的节水作用,但长期可能会增加用水(如2060年的北京市、河北省)。这是由于投资政策在短期内会减少对火电的投资,导致火力发电量的减少从而减少发电用水,待可再生能源发电项目完成并投入运营后,其发电量就会大大增加,尽管其耗水强度不如火电,但发电量绝对值的上升也会使耗水量超过基线情景。②从贸易环节来看。减碳政策对电力贸易虚拟水流动的影响与生产环节存在较大差异。投资情景下,政策实施的节水效果存在时空差异。北京市短期内贸易虚拟水会上升但长期与基线情景的区别不大,天津市的政策效果不明显,河北省的贸易虚拟水上升较明显。碳税情景下,天津市和河北省的电力贸易虚拟水大幅增加,而北京市大幅下降。

表 2 各种情景下京津冀地区关键年份电力行业水足迹

Tab. 2 Water footprint of power sector of Beijing-Tianjin-Hebei region in key years under various scenarios $10^8 L$

名称	情景	2030 年				2060 年			
		生产	流出	流入	消费	生产	流出	流入	消费
北京市	基线情景	1 355.19	430.53	310.19	1 234.85	4 500.49	2 944.73	2 748.31	4 304.07
	投资情景	1 302.13	446.53	367.72	1 223.32	4 945.61	3 055.38	2 569.42	4 459.65
	碳税情景	1 192.20	383.75	428.25	1 236.70	4 080.32	1 683.18	1 712.84	4 109.97
	碳税+情景	1 192.20	404.93	352.08	1 139.35	4 139.93	1 739.27	1 751.42	4 152.08
	组合情景	1 290.40	445.02	420.85	1 266.23	4 673.37	1 715.84	1 989.99	4 947.52
天津市	基线情景	2 514.67	138.20	450.94	2 827.40	5 139.30	283.49	677.74	5 533.56
	投资情景	2 556.19	136.98	473.03	2 892.24	4 411.44	242.99	754.06	4 922.51
	碳税情景	2 257.82	127.61	495.63	2 625.84	3 778.00	228.29	916.63	4 466.33
	碳税+情景	2 256.10	126.10	537.19	2 667.19	3 970.71	228.64	948.00	4 690.07
	组合情景	2 431.72	134.26	516.63	2 814.09	4 037.06	236.97	1 141.05	4 941.14
河北省	基线情景	17 541.05	178.54	7 263.19	24 625.69	34 073.17	349.82	10 628.46	44 351.81
	投资情景	17 171.97	179.49	17 080.67	34 073.15	35 300.73	372.17	11 186.07	46 114.64
	碳税情景	16 453.24	164.99	7 455.22	23 743.46	32 223.14	320.10	13 145.18	45 048.22
	碳税+情景	16 453.24	171.98	7 943.03	24 224.29	35 300.73	372.17	14 118.03	49 046.60
	组合情景	17 176.80	174.27	7 030.63	24 033.16	31 841.14	339.01	14 398.42	45 900.54

若当前情景下电力生产明显下降,就会通过电力输送来满足社会经济发展所需的用电量。因此,从消费端来看,京津冀三地的电力完全生产水足迹在各情景下变化不大,均低于 15%。碳税情景对发电完全水足迹的节约效果最显著,在投资政策的影响下,水足迹会有所上升。组合情景下,北京市和河北省的投资政策对水足迹的促进作用会高于碳税政策对水足迹的抑制效果,所以总体发电水足迹会高于基线情景,而天津市的投资政策效果对水足迹的影响不够显著,碳税政策节水效果更明显,组合政策下的完全水足迹相比于基线情景有明显下降。

图 4 为基线情景和组合情景下关键年份电力行业贸易虚拟水流动。由图 4 可看出,减碳政策对电力行业水足迹的影响会随着时间的推移越来越显著。组合情景下京津冀地区的发电用水更多地用于本地,而基线情景下更依赖于电力贸易虚拟水的输入。这主要有两方面的原因:①由于减碳政策减少了当地的发电量,这会使当地的电力会优先供给本地使用,电力输出会减少,从而减少贸易虚拟水的输出;②电力输送也会产生一定的碳排放,减碳政策会直接减少电力的跨区输送,从而减少贸易虚拟水的跨区流动。但从贸易虚拟水的绝对值来看,天津市和河北省用于本地电力生产的水足迹会减少,跨区贸易水足迹会上升,这是为了保证满足当地的用电需求,在本地发电量减少的情况下,从其他地区输送电力以维持社会生产。

综合来看,减碳政策对电力行业水足迹的影响存在地区差异。但只从生产环节来看,减碳政策能节约发电生产用水。在考虑了贸易环节后,电力行业完全水足迹的变化会异于生产水足迹,而具体的变化情况会取决于不同政策在当地的作

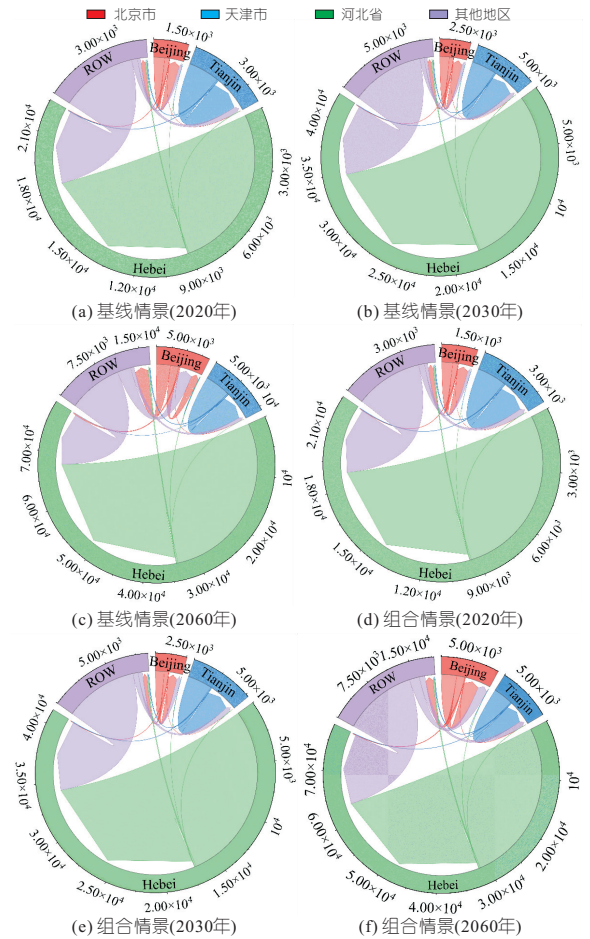


图 4 基线情景和组合情景下关键年份电力行业贸易虚拟水流动

Fig. 4 Electricity industry trade virtual water flows in key years under baseline and combination scenarios

用效果。2060 年,电力行业完全水足迹最少的情景是碳税情景,投资转移和可再生能源补贴均会在一定程度上促进电力行业水足迹,政策影响程度在北京市最明显,其次是河北省,而天津市这两项政策的影响程度不如碳税,所以组合情景下水足迹会低于基线情景。

5 结 论

a. 减碳政策对电力生产用水有一定的节约效果,京津冀三地分别为 4.8%、3.3%、2.1%,但会加大电力跨区输送以保证地区用电,导致电力贸易虚拟水流量增加。

b. 碳税对电力水足迹的节约最显著,京津冀三地分别为 4.5%、19.3%、-1.6%,而投资和可再生能源补贴会在一定程度上增加水足迹。

c. 政策影响存在地区差异,天津市水足迹节约最明显,河北省和北京市在组合情景下电力水足迹反而会上升。

参考文献:

[1] 周露明, 谢兴华, 余丽, 等. 水资源管理中的水—

能源—经济耦合关系[J]. 水电能源科学, 2019, 37(4):144-147,166.

[2] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(1):52-61.

[3] 王岩, 何山水. 生态足迹视角下我国能源贸易转型[J]. 经济与管理, 2017, 31(4): 83-88.

[4] 王勇. 全行业口径下中国区域间贸易隐含虚拟水的转移测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(4): 107-115.

[5] 邓光耀. 中国多区域水资源 CGE 模型的构建及其应用[J]. 统计与决策, 2020, 36(14): 157-161.

[6] 贺菊煌, 沈可挺, 徐嵩龄. 碳税与二氧化碳减排的 CGE 模型[J]. 数量经济技术经济研究, 2002(10): 39-47.

[7] 车德竞, 孟洁, 陈永辉, 等. 未来 20 年我国火力发电用水情况预测分析[J]. 电力建设, 2013, 34(8): 17-21.

Research on Water Footprint of Power Industry Between Beijing, Tianjin and Hebei Regions Under Dual Carbon Goals

PENG Ying^{a,b}, ZHOU Qian^{a,b}

(a. School of Economics and Management; b. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The current regional water supply and power generation structure is not able to achieve sustainable development in the long term. It is worth exploring whether the production, trade and the corresponding water footprint of the power sector in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region can meet the long-term development needs of the region after the dual-carbon goals is proposed. Therefore, this study constructed a dynamic multiregional computable general equilibrium model to simulate the changes in the production and trade of the power sector and its water footprint in the BTH region caused by the carbon reduction policy. Four carbon reduction scenarios were designed in the model to explore the impacts of policies such as carbon tax, investment and renewable energy subsidies. The results show that the carbon tax policy has the most significant water saving effect on power generation; The carbon reduction policy significantly increases the inter-regional flow of virtual water in the power trade; The complete water footprint of the power sector under various scenarios does not change much (less than 15%), in which the water footprint of the power sector in Beijing has the highest sensitivity to the carbon reduction policy. Therefore, the focus of water conservation in the power sector under the dual-carbon target should be on the trade chain, optimizing the trade structure and reducing interregional virtual water flows.

Key words: water footprint; water consumption for power generation; CGE model; renewable energy generation; dual carbon goals; Beijing-Tianjin-Hebei region

(上接第 84 页)

Analysis on Influencing Factors of Regulation and Storage Capacity of River Channel in Polder Areas

WU Chun, NI Peng, DING Zhao-hui

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) CO., LTD., Shanghai 200092, China)

Abstract: The regulation and storage capacity of a river channel plays an important role in the safety of drainage in polder areas. In order to study the factors related to the actual effective regulation and storage capacity of a river channel in polder areas, this paper adopts the unsteady flow model and the water balance method to calculate the regulation and storage capacity of a single river channel. The calculation results of the two methods show that the main influencing factors of the regulation and storage capacity of a river channel are the water depth corresponding to the starting regulation level, the roughness of the river channel, the length of the river channel and the cross-section morphology, etc. For the backbone drainage channel with large discharge, the actual effective regulation and storage capacity is the storage capacity from above the water surface line corresponding to the designed discharge to the maximum water level. The research results have certain reference value for the planning and design of drainage in polder areas.

Key words: channel regulation and storage; drainage calculation; unsteady flow; dynamic storage capacity