

吉林省农作物虚拟水时间演化与空间重构研究

马晓蕾

(安阳师范学院 资源环境与旅游学院, 河南 安阳 455000)

摘 要:虚拟水从植物累计蒸发蒸腾量的角度对农作物耗水量进行测算,更贴近农业的实际耗水量。运用虚拟水理论、ArcGIS 标准差椭圆分析方法和空间重构模型,对 2000 年、2005 年、2010 年、2017 年吉林省县域地区 6 种主要农作物虚拟水空间布局及其特征进行了分析。从农业水-土资源空间匹配视角,提出了农业虚拟水空间重构的 3 种主要模式。结果表明:(1) 2000 年以来吉林省农作物虚拟水总量呈明显上升趋势,由 147.46 亿 m^3 ,上升到 2017 年的 247.95 亿 m^3 ;(2) 吉林省单位面积农作物虚拟水由东到西呈逐渐增加趋势;(3) 吉林省农业虚拟水和播种面积空间重心均位于长春市区,但虚拟水空间重心位于播种面积的西部;(4) 吉林省农作物单位面积虚拟水由高到低,依次为水稻、葵花籽、玉米、烟叶、蔬菜、大豆。若要实现农业水、土资源的空间匹配,需结合区域自然气候条件,农作物耗水量区域差异等多方面因素,对吉林县域农作物种植结构与布局进行优化和调整。

关键词:农作物虚拟水; 标准差椭圆; 空间布局; 空间重构模型; 吉林省县域

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0304-09

Study on Temporal Evolution and Spatial Reconstruction of Crop Virtual Water in Jilin Province

MA Xiaolei

(School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract: Virtual water measures crop water consumption from the point of view of plant cumulative evapotranspiration, which is closer to actual water consumption of agriculture. In this paper, virtual water theory, ArcGIS standard deviational ellipse method and spatial reconstruction model were used to evaluate spatial distribution and its characteristics of crops virtual water in Jilin Province in 2000, 2005, 2010 and 2017. At last, the paper proposed three main models of agricultural virtual water spatial reconstruction from the perspective of spatial matching of agricultural water and soil resources. The results showed that: (1) the total amount of crop virtual water in Jilin Province had been on the rise since 2000, it increased from 14.746 billion m^3 in 2000 to 24.795 billion m^3 in 2017; (2) there were big regional differences of crop virtual water per unit area among eastern, central and western Jilin, crop virtual water per unit area showed gradually increasing trend from east to west; (3) the spatial gravity centers of both agricultural virtual water and crop sown area in Jilin Province were located in Changchun urban area, but the spatial gravity center of virtual water was located in the west of crop sowing area; (4) the virtual water quantity per unit area of main crops in Jilin Province decreased in the order: rice>sunflower>maize>tobacco>vegetable and soybean. In order to achieve the spatial matching of agricultural water and soil resources, it is necessary to optimize and adjust the cropping structure and layout of crops according to regional natural climate conditions, regional differences in crop water consumption and other factors.

Keywords: crops virtual water; standard deviational ellipse; spatial distribution; spatial reconstruction model; counties of Jilin Province

水资源是人类生存和发展所需的不可替代的宝贵资源,对人类社会经济和人民生活有着重要影响,当前水资源短缺和水污染已成为全球共同面临的问题。吉林省为中度缺水省份,且水资源呈“南丰北欠,东多西少”的格局,时空分布不均^[1]。吉林省耕地面积占全省总面积的 32.5%,以玉米和水稻种植为主,农业灌溉用水量约占总用水量的 66%^[2]。吉林省东、中、西部在社会经济、自然环境、气候条件和农业布局等方面,有着鲜明的区域差异和特征。吉林东部地下水开发利用率约 18%,而中、西部地下水开发利用率将近 40%,东、中、西部尚未形成水源互补、调度灵活的供水体系,水资源供需矛盾突出^[3]。东部长白山区年降雨量为 800~1 240 mm,为全省最高值;西部平原区年降雨量仅约 400 mm,处于全省低值区;吉林中部社会经济发展迅速,耕地面积大,工业和农业用水量多,水资源量与社会经济活动强度存在一定矛盾。

虚拟水概念提出以来,受到了国内外学者的广泛关注^[4-6],虚拟水理论为解决水资源短缺,合理优化利用水资源和水资源可持续发展提供了新的视角^[7-8]。由于农业用水量大,农产品中隐含的虚拟水含量最高,因此,对农业虚拟水的研究具有重要现实意义^[9]。虚拟水能够真实地反映区域中农作物或动物生产所消耗的水资源量,结合区域实际可利用的水资源量,有助于合理规划区域水资源的可持续利用。目前,学者们对虚拟水贸易、虚拟水流动等方面展开了较为深入的研究^[10-14],如虚拟水流动对区域水资源量和质的影响^[15]、区域间粮食虚拟水流动对区域经济和水资源的影响^[16]、农业虚拟水流动对区域水资源压力的影响^[17]、实体水-虚拟水二维度的农业水资源管理体系的研究^[18],以及食品消费虚拟水与水资源可持续利用等方面的研究^[19-23]。关于空间重构,目前国内外学者进行了较为深入研究^[24],已有关于空间重构的研究,主要采用定量和定性相结合的研究方法,定量分析往往根据研究对象特征和研究目标,建立特定的空间重构思路,并结合引力模型、空间自相关、ArcGIS 缓冲区分区分析等方法,对要素进行空间重构分析^[25-27]。综上所述,已有研究主要从虚拟水流动和虚拟水贸易的视角展开,而关于农作物虚拟水和土地资源优化配置的研究较少。同时,现有关于空间重构研究的思路和方法,需随着要素及研究目标的不同进行相应变化,缺少具有普适性的定量研究方法,亟待完善。

本文从水资源约束视角,运用虚拟水方法测算吉

林省县域地区 6 种农作物虚拟水消耗情况,并采用 ArcGIS 空间分析方法,对农作物虚拟水空间格局特征进行研究;基于要素间空间耦合关系,建立“空间重构模型”,提出吉林省农作物虚拟水的空间重构模式。本文构建具有普适性的空间重构模型,有助于完善当前对于空间重构定量研究方法的不足,丰富空间重构的理论研究框架。研究结果不仅对吉林省农作物空间布局和结构优化及农作物水资源合理配置具有重要意义,对我国其他水资源短缺地区的农业水资源优化利用,也具有重要参考价值。

1 研究区概况

吉林省(东经 121°38′—131°19′,北纬 40°50′—46°19′)作为我国粮食主产区,区域内水资源时空分布不均。对吉林省农作物虚拟水空间格局进行研究,有助于了解区域差异对农作物虚拟水的影响。本文以吉林省县域为研究对象(市区作为整体),根据《吉林省东部绿色转型发展区总体规划》、《吉林省中部创新转型核心区总体规划》和《吉林省西部生态经济区总体规划》,对吉林省东、中、西部进行划分^[28],见表 1。吉林东部地区位于长白山脉核心区,生态优良、资源丰富,是我国重要的森林生态功能区,东部包括通化市、白山市、延边州等区域,区域总面积占全省的 46.4%,总人口占全省的 25.35%。此外,吉林东部地区的松花江、图门江、鸭绿江等水系河网密布,水资源总量约占全省的 74%。吉林省中部包括长春、吉林、四平 etc,区域内耕地面积广阔,农业生产条件优越,有榆树、公主岭、梨树等产粮大县,粮食年产量约占全省的 85%,是全国重要的粮食主产区,为保障国家粮食安全做出了重要贡献。吉林西部自然资源比较丰富,农牧业优势突出,土地总面积占全省的 29.5%^[2]。西部地区总体干旱,生态环境较为脆弱,区域发展过程中应坚持绿色发展,生态优先的原则。

2 研究方法数据来源

2.1 虚拟水

虚拟水计算方法采用联合国粮农组织推荐的彭曼公式,运用 CROPWAT8.0 软件^[29-30],根据地区每月最低气温、最高气温、湿度、风速、日照时数、降雨量等气象指标,计算参考作物蒸发蒸腾量 ET_0 (mm/d) 和作物蒸散发量 ET_c (mm)。 CWR_{cn} (Crop Water Requirement, mm/dec) 为区域 n 作物 c 的需水量,近似等于 ET_c ^[31-32], Y_{cn} (hm²) 为区域 n 作物 c 的播种

面积,则区域 n 作物 c 生长过程中的虚拟水总量 TVW_{cn} (m³) 计算公式如下^[28]:

TVW_{cn} = CWR_{cn} × Y_{cn} × 10

(1)

县域地区气象数据由各地区气象站点统计,采用

1981—2010 累年平均值,气象站点数据来源于中国气象数据网([http:// data.cma.cn/](http://data.cma.cn/)),市区采用同一气象站点数据,由于缺少东辽县气象站台,采用东丰县的气象数据。农作物播种面积数据来源于《吉林统计年鉴》。

表 1 吉林省东、中、西部区域范围

地区	地级市	县、市、区
西部地区	白城市全境	洮北区、洮南市、大安市、镇赉县、通榆县
	松原市全境	宁江区、长岭县、前郭县、乾安县、扶余市
	长春市	农安县
	四平市	双辽市
中部地区	长春(除农安)	长春市区、榆树市、德惠市
	吉林(除桦甸和磐石)	吉林市区、蛟河市、舒兰市、永吉县
	四平(除双辽)	四平市区、公主岭市、梨树县、伊通县
	辽源市全境	辽源市、东丰县、东辽县
东部地区	通化市全境	通化市区、梅河口市、集安市、通化县、辉南县、柳河县
	白山市全境	白山市区、临江市、抚松县、靖宇县、长白县
	延边州全州	延吉市、图们市、敦化市、龙井市、珲春市、和龙市、汪清县、安图县
	吉林市	桦甸市、磐石市

2.2 标准差椭圆

运用 ArcGIS 中的标准差椭圆空间分析方法^[33-35],对吉林省农作物虚拟水空间分布方向和重心进行分析。本文采用一个标准差椭圆面,包含约占总数 68% 的输入要素,椭圆的长半轴表示空间分布方向,短半轴表示数据分布范围。长、短半轴之比为椭圆扁率,扁率越大,数据分布的方向性越强;扁率越小,即椭圆越接近圆形,数据空间分布方向性越弱,离散程度越大。

2.3 空间重构模型

为优化吉林省农作物水-土资源空间布局,本文构建空间重构模型,通过调整区域内农作物种植结构,达到水、土资源空间重心的重合,基本实现空间匹配的目标。假设 T 区包含 n 个子区域,已知 n 个子区域的两个具有紧密联系要素的值。若要使这两个要素在 T 区域的空间分布重心重合,则需调整区域内其中一个要素的值,既通过已知要素的空间重心,调整另一要素的空间布局。设 a_i 为 i ($i=1, \cdots, n$) 子区域中已知指标的值,称之为固定要素(本文指播种面积, hm²), $a_i(x_i, y_i)$ 为 a_i 的空间坐标, $T_0(x_0, y_0)$ 为 $a_1, a_2, a_3, \cdots, a_n$ 的空间分布重心坐标; b_i 为已知且可被调整的要素($b_i \neq a_i$),称之为可变要素(本文指虚拟水量, m³)。空间重构模型即求以 $T_0(x_0, y_0)$ 为重心的情况下, b_i 值及其空间格局。首先,从 n 个区域中选出一个区域固定其 b_i 值;第二,根据 $a_i / \sum a_i$ 的值(记为 m_i , 为已知值),对其余 $n-1$ 个 b_i 值进行调整,则得出的 T 区域中 b_i 指标的空间分布重心与 a_i 空间重心一致。 b_i 值及不同 b_i 值所对应的空间重构方式的计算方法如下:

第一种调整方式,保持 b_1 值固定不变。

令 $\frac{b_1}{\sum_{i=1}^n b_i} = \frac{a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} = m_1$, 得 $\sum_{i=1}^n b_i = \frac{b_1}{m_1}$,

同样, $\frac{b_2}{\sum_{i=1}^n b_i} = \frac{a_2}{\sum_{i=1}^n a_i} = m_2$, 得 $b_2 = \frac{m_2}{m_1} \times b_1, \cdots$

可推导出, $b_i = \frac{m_i}{m_1} \times b_1$

(2)

第二种调整方式,保持 b_2 值固定不变。

令 $\frac{b_2}{\sum_{i=1}^n b_i} = \frac{a_2}{\sum_{i=1}^n a_i} = m_2$, 得 $\sum_{i=1}^n b_i = \frac{b_2}{m_2}$

此时, $\frac{b_1}{\sum_{i=1}^n b_i} = \frac{a_1}{\sum_{i=1}^n a_i} = m_1$, 得 $b_1 = \frac{m_1}{m_2} \times b_2, \cdots$

可推导出, $b_i = \frac{m_i}{m_2} \times b_2, \cdots$

(3)

第 n 种调整方式,保持 b_n 值固定不变:

同理,可推导出, $b_i = \frac{m_i}{m_n} \times b_n$

(4)

上述计算模型称为“空间重构模型”,每种调整方式均对应一种空间布局模式。因此,包含 n 个子区域的 T 区在进行空间重构时,有 n 种空间重构模式。在实际应用过程中,需将结果与实际相结合,从中选出适合区域发展的重构模式。

3 结果与分析

3.1 农作物虚拟水随时间变化

3.1.1 全省 6 种农作物虚拟水及其总量随时间变化
吉林省 6 种农作物虚拟水总量呈明显增长趋势,由

2000 年的 147.46 亿 m^3 , 上升到 2017 年的 247.95 亿 m^3 。2000—2017 年, 玉米虚拟水总量和比重均处于快速上升趋势, 总量由 81.6 亿 m^3 , 上升到 184.67 亿 m^3 , 占农作物虚拟水总量比重由 55.34%, 上升到 74.48%; 水稻虚拟水总量处于稳定增长趋势, 由 31.75 亿 m^3 , 增长到 50.64 亿 m^3 , 占农作物虚拟水总量比重变化幅度较小, 由 21.5%, 下降至 20.42%。2017 年, 大豆、葵花籽、烟叶和蔬菜的虚拟水总量, 分别为 6.68 亿 m^3 , 2.58 亿 m^3 , 0.23 亿 m^3 , 3.16 亿 m^3 , 所占比重依次为 2.7%, 1.04%, 0.09%, 1.28%, 大豆、蔬菜虚拟水总量呈明显下降趋势, 烟叶、葵花籽表现为波动下降趋势(图 1)。

3.1.2 吉林省东、中、西部农作物虚拟水总量比例变化 2000—2005 年吉林东、中、西部农作物虚拟水比例结构变化较小。2005—2010 年, 吉林西部农作物虚拟水所占比重明显上升, 由 36.72% 增长到 2010 年的 40.73%; 吉林中部虚拟水比重下降, 由 2005 年的 48.26%, 下降到 2010 年的 43.77%; 东部农作物虚拟水比

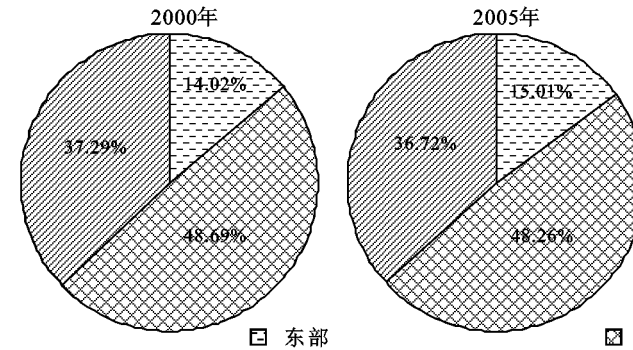


图 2 吉林省东、中、西部农作物虚拟水比例变化

3.1.3 吉林省东、中、西部 6 种农作物虚拟水及其总量变化 吉林东部虚拟水总量呈上升趋势(图 3), 由 2000 年的 20.68 亿 m^3 , 上升到 2017 年的 36.72 亿 m^3 , 17 a 间增长了 77.6%。其中, 水稻虚拟水总量在 2000 年时高于其余农作物, 2005 年以后玉米虚拟水消耗量大幅度增加, 总量高于水稻, 成为吉林东部虚拟水消耗量最高的农作物, 水稻表现为波动增加, 大豆波动下降, 蔬菜呈下降趋势, 葵花籽和烟叶都呈大幅度下降趋势。2000—2017 年, 玉米虚拟水总量所占比重由 34.67%, 上升到 63.26%, 上升幅度最大; 水稻虚拟水总量所占比重有所下降, 由 35.1% 下降到 23.47%; 大豆虚拟水总量由 4.23 亿 m^3 , 下降到 4.06 亿 m^3 ; 葵花籽由 0.33 亿 m^3 下降到 0.02 亿 m^3 ; 蔬菜也呈明显下降趋势。结果表明, 吉林东部农作物多样性程度下降, 玉米、水稻规模不断扩大, 农业节水应重点从玉米和水稻两种作物着手。

重基本保持在 15% 左右, 变化较小(图 2)。吉林西部属于水资源相对缺乏地区, 降雨量处于全省较低水平, 但随着西部水利设施不断完善, 适当缓解了当地资源型缺水问题, 对农业的发展也起到了一定促进作用, 使得农业耗水量增长速度快。今后应进一步合理优化农业结构和空间布局, 加快发展节水型农业, 做好农业用水规划, 促进西部地区水资源的可持续利用。

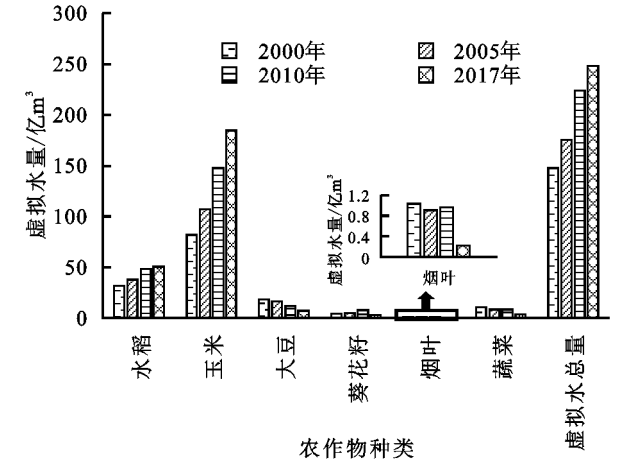


图 1 吉林省 6 种农作物虚拟水及其总量变化

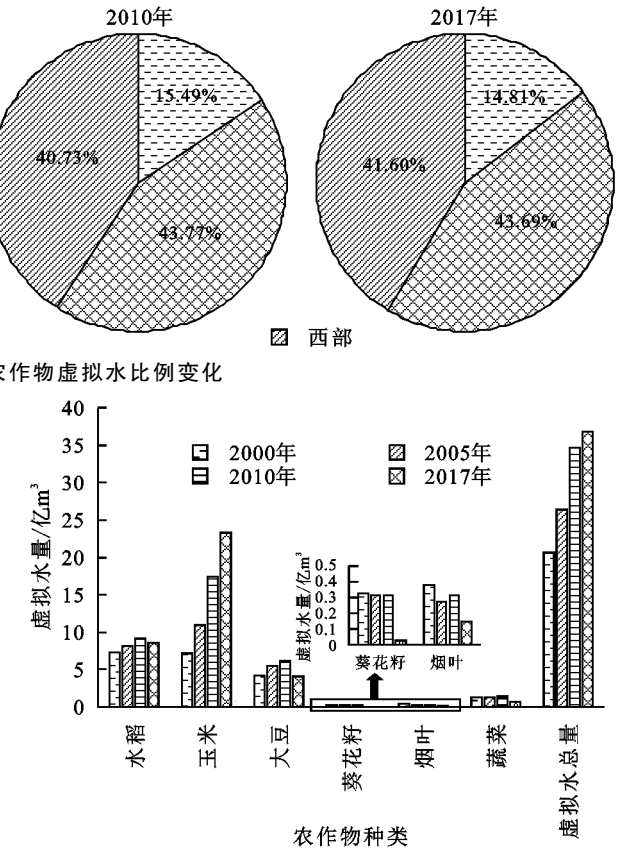


图 3 吉林东部主要农作物虚拟水量及其总量变化

吉林中部农作物虚拟水总量由 2000 年的 71.8 亿 m^3 上升到 2017 年的 108.34 亿 m^3 , 增长了 50.89%。吉林中部玉米虚拟水总量一直处于最高水平, 其次为水稻, 蔬菜和大豆较低, 葵花籽和烟叶最少(图 4)。2000—2017 年, 玉米虚拟水总量增长快, 水稻增长相

对较慢,其余 4 种农作物均呈下降趋势。其中,玉米虚拟水总量及所占比重分别由 38.39 亿 m^3 ,53.47% (2000 年),上升到 82.1 亿 m^3 ,75.77% (2017 年),上升幅度大;水稻虚拟水总量由 17.50 亿 m^3 ,增长到 23.29 亿 m^3 ,但其所占比重由 24.37% 下降到 21.49%;2017 年,大豆、蔬菜、烟叶和葵花籽所占比重较低,依次为 1.5%,1.18%,0.02%,0.04%。与 2000 年相比,除玉米虚拟水总量所占比重上升外,其余作物均下降。

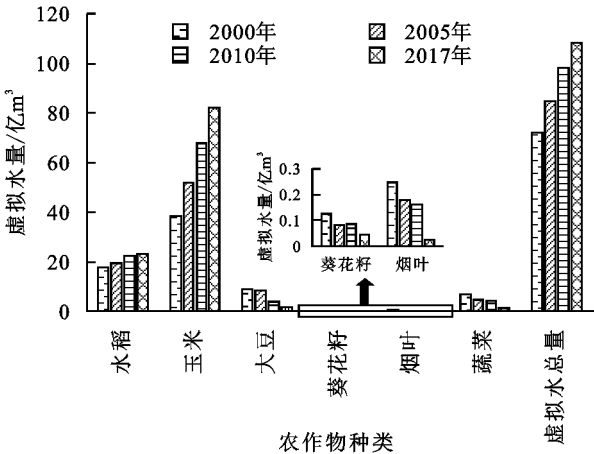


图 4 吉林中部主要农作物虚拟水量及其总量变化

吉林西部农作物虚拟水总量由 2000 年的 54.98 亿 m^3 ,增长到 2017 年的 102.89 亿 m^3 ,增长了 87.14%,增长率高于东部和中部。吉林西部玉米虚拟水总量最高,且呈大幅度上升趋势,其次为水稻,而葵花籽、蔬菜、大豆和烟叶虚拟水总量低,且下降幅度较大,2017 年四者之和仅 4.81 亿 m^3 ,所占比重为 4.68%。2000—2017 年,玉米虚拟水总量及其比重分别由 36.05 亿 m^3 ,65.56%,上升到 79.34 亿 m^3 ,77.11%;水稻分别由 6.99 亿 m^3 ,12.72%,上升到 18.74 亿 m^3 ,18.21%。玉米和水稻虚拟水总量,分别增长了 120.11%,168%(图 5)。

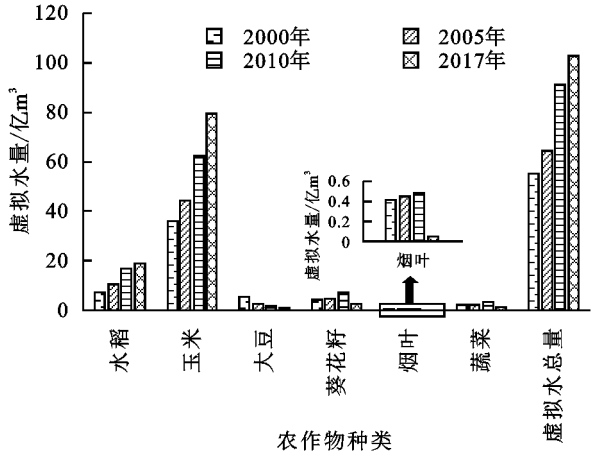


图 5 吉林西部主要农作物虚拟水量及其总量变化

3.1.4 农作物单位面积虚拟水变化 2000 年以来,

全省 6 种农作物平均单位面积虚拟水呈上升趋势,由 4 566.49 m^3/hm^2 ,上升到 2017 年的 4 702.36 m^3/hm^2 ;吉林东部变化幅度较小,在 3 900 m^3/hm^2 左右波动;吉林中部表现为先小幅度下降后上升的趋势,由 4 604.33 m^3/hm^2 上升到 4 699.6 m^3/hm^2 ;吉林西部由 4 811.46 m^3/hm^2 ,增长到 5 064.44 m^3/hm^2 ,增长幅度较大。由此可见,农作物平均单位面积虚拟水消耗最少的地区为吉林东部,其次为吉林中部,吉林西部最高,意味着相同耕地面积下,吉林西部农作物对水资源的需求量更大。从 6 种农作物单位面积虚拟水变化看,2000—2017 年,全省水稻、葵花籽单位面积虚拟水上升幅度大,每 1 hm^2 虚拟水消耗量分别增加 214.28,104.91 m^3 ;而玉米、大豆分别下降了 46.29,354.28 m^3 。结果表明单位面积玉米和大豆对水资源的需求量有所下降,有利于减少水资源消耗,尤其是大豆下降幅度大(表 2)。

从东、中、西部对比看,6 种农作物平均单位面积虚拟水消耗量,表现为西部>中部>东部。2017 年东、中和西部,水稻单位面积虚拟水分别为 5 817.37,6 690.67,7 455.89 m^3/hm^2 ,玉米分别为 3 761.26,4 378.41,4 747.30 m^3/hm^2 ,西部高于全省平均值,东、中部低于全省平均值。西部单位面积水稻和玉米虚拟水消耗量分别比中部高出 765.22,368.89 m^3/hm^2 ,比东部高出 1 638.52,986.04 m^3/hm^2 。从农作物单位面积虚拟水消耗量对比看,2017 年吉林东部 6 种农作物单位面积虚拟水消耗量,由高到底的顺序依次为水稻>玉米>葵花籽>烟叶>蔬菜>大豆,吉林中部依次为水稻>葵花籽>玉米>蔬菜>烟叶>大豆,吉林西部依次为水稻>葵花籽>玉米>烟叶>蔬菜>大豆(表 2)。由此可见,全省及东、中、西部农作物相比较,单位面积虚拟水消耗均以水稻最高,大豆虚拟水耗水量最低。因此,在农作物布局过程中,应结合区域水资源条件,合理安排农作物种植结构,优化农业用水。

3.2 农作物虚拟水空间布局特征

3.2.1 6 种农作物虚拟水空间布局特征及其变化 水稻标准差椭圆面积由 2000 年的 48 112.41 km^2 增长到 2017 年的 61 048.6 km^2 ;椭圆的长短轴之比由 1.52 增加到 1.83,表明水稻虚拟水空间分布方向性增强。空间分布重心一直位于长春市区,但逐渐向西北移动,主要是由于近些年吉林西部增加了水稻的种植面积,使得西部水稻虚拟水总量增加。玉米标准差椭圆面积不断扩大,表明玉米虚拟水空间分布范围呈扩大趋势,椭圆中心一直位于长春市区,表明玉米虚拟水集聚区域位置较稳定,椭圆长短轴比例小幅度增加,空间分布方向性略有增强。2000—2017 年,随着

全省大豆播种面积的下降,吉林省大豆虚拟水量整体呈显著下降趋势,高值集聚区由中部向东部转移,分布重心位置变化幅度较大,由长春市(125.81°E, 43.96°N),转移到东部的蛟河市(127.15°E, 43.60°N);标准差椭圆的长短轴之比由 1.52 增加到 1.93,空间分布方向性显著增强(图 6)。

表 2 吉林省及东、中、西部农作物单位面积虚拟水变化 m³/hm²

地区	年份	水稻	玉米	大豆	葵花籽	烟叶	蔬菜	农作物平均
全省	2000	6560.58	4481.22	3389.37	4821.21	3905.32	3880.68	4566.49
	2005	6618.41	4457.23	3254.75	4902.41	4040.00	3843.28	4598.84
	2010	6703.94	4452.33	3065.62	5029.23	4015.68	3818.60	4665.26
	2017	6774.86	4434.93	3035.09	4926.12	3629.43	3817.30	4702.36
东部	2000	5758.62	3764.70	2832.84	3641.06	3272.12	3230.03	3923.31
	2005	5782.27	3782.72	2841.55	3607.58	3286.52	3234.98	3895.67
	2010	5795.65	3775.42	2805.28	3621.38	3316.13	3243.54	3859.75
	2017	5817.37	3761.26	2792.42	3693.52	3343.21	3246.32	3923.26
中部	2000	6688.57	4417.20	3520.20	4409.20	4118.58	3957.94	4604.33
	2005	6688.58	4397.65	3429.93	4338.09	4293.59	3915.24	4597.96
	2010	6703.06	4399.29	3305.20	4398.07	4274.52	3907.57	4676.89
	2017	6690.67	4378.41	3354.75	4445.52	3910.53	3924.04	4699.60
西部	2000	7262.51	4733.40	3745.06	4966.23	4585.60	4133.98	4811.46
	2005	7309.26	4741.55	3788.30	5034.39	4565.73	4117.03	4966.64
	2010	7332.65	4753.20	3817.30	5125.64	4538.39	4004.42	5052.91
	2017	7455.89	4747.30	3782.69	4951.78	4602.34	4069.37	5064.44

葵花籽虚拟水总量空间分布的标准差椭圆面积显著下降,空间集聚程度明显增强,空间分布重心位于乾安市及其周边地区。此外,长短轴之比一直大于 2,空间分布方向性强。烟叶虚拟水空间布局趋于分散,空间分布方向性减弱,2017 年其空间分布重心位于吉林市的永吉县。蔬菜标准差椭圆面积呈扩大趋势,长短轴比例增加,分布范围趋于分散,但空间格局相对稳定,分布重心一直位于长春市区(表 3)。

3.2.2 农作物虚拟水总量及播种面积空间布局特征

2000 年以来吉林省县域地区农作物虚拟水总量呈增长趋势,高于 9.17 亿 m³ 的地区数所占比重,由 2000 年的 8.51% 上升到 2017 年的 17.02%。2017 年农作物虚拟水总量处于最高等级的地区有,长春市区、德惠、扶余、公主岭、梨树县、农安、榆树和长岭,上述地区农业生产消耗的水资源量较大,应注重提高农业用水效率,加快农业节水技术发展。2000 年、2017 年农业虚拟水与耕地面积空间等级分布基本一致,但 2000 年白城市区耕地面积等级低于周边地区,而虚拟水总量等级与周边地区相同(图 7)。这表明吉林省农业虚拟水消耗量虽然受耕地面积的影响较大,但还受其他因素,如农作物种类、区域气候条件等因素的影响。由表 4 可知,农业虚拟水及播种面积重心均位于吉林中部,二者位置接近,但 2017 年农业虚拟水重心(125.35°E, 44.08°N),位于播种面积重心(125.44°E, 44.02°N)的西北部,此外,椭圆面积、旋转角度、长短轴比例均基本保持一致。研

究结果表明吉林省农业水-土资源匹配度较高,但随着近年来吉林西部农业用水强度的不断提高,拉大了虚拟水和耕地面积空间重心的距离,今后应从全省整体出发,优化农作物空间结构。

3.3 农作物虚拟水空间重构模式

为实现吉林省农业水-土资源空间匹配,运用空间重构模型,分别以吉林省 47 个县域地区为参照区域,对 2017 年吉林省农业虚拟水进行了空间重构,共得出 47 种空间重构模式。下面主要以其中 3 种典型模式为例,进行重点介绍(图 8)。第一种,以抚松县作为参照区域,对全省其他县域地区的农作物虚拟水进行空间重构,所得出的吉林省农作物虚拟水总量最低,为 171.96 亿 m³,表明以抚松县为参照区,对农作物虚拟水进行调整,可以以最低的农业虚拟水消耗量,实现全省农业水-土资源空间重心的匹配,但需对现有农作物种植结构做出较大的调整(图 8A)。第二种,以农安县作为参照,得出的全省虚拟水总量为 247.9 亿 m³,与全省实际虚拟水消耗量(247.96 亿 m³)最接近,表明若以农安县为参照区域对其余县市农业虚拟水进行调整,可以在全省农作物种植结构变化幅度最小的情况下,实现全省农业水-土资源空间重心匹配(图 8B)。第三种,以镇赉县为参照,得出的全省虚拟水总量最高,为 327.17 亿 m³,可见镇赉县的农业单位耕地面积虚拟水消耗量最大,若从水资源节约利用角度,在实践中不适宜参照镇赉县农业种植结构(图 8C)。

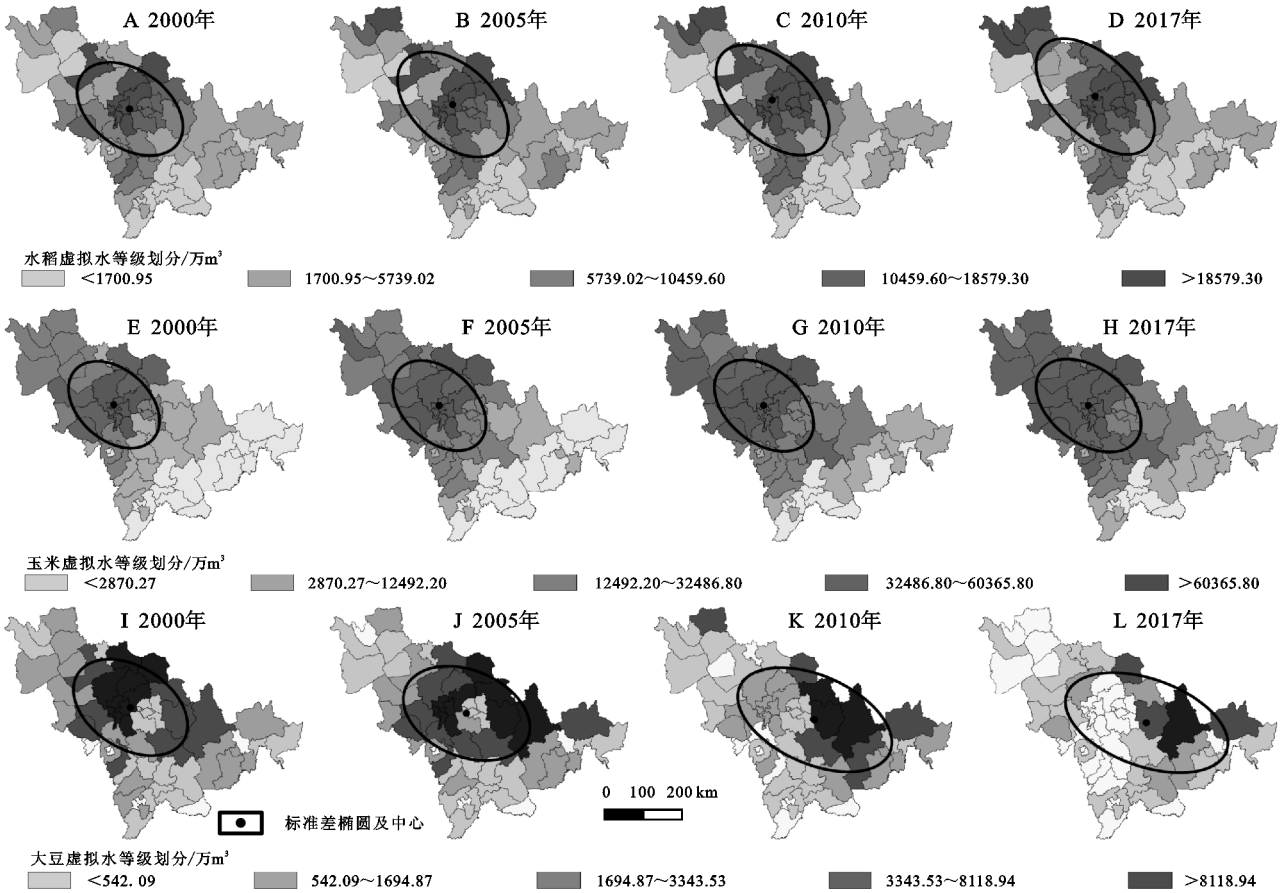


图 6 水稻、玉米、大豆虚拟水总量空间格局及其变化

以农安县为参照区,可在尽量减小吉林省现有农作物种植结构情况下,实现农业水-土资源的空间匹配,调整结果见表 5。吉林东部各县市农作物虚拟水消耗量应适当提高,敦化市、桦甸市和磐石市,农业虚拟水消耗量的提升空间较大,可分别比实际消耗量提高 1.92 亿 m³,0.95 亿³,0.61 亿 m³;而吉林西部除前郭、长岭县应分别提高 0.15 亿³,0.01 亿 m³,农安县不变外,其他地区均应适当降低农业虚拟水消耗量。其中,白城市区和洮南市农作物虚拟水需分别降低

1.48 亿 m³,1.44 亿 m³;吉林中部应提高和降低农业虚拟水总量的地区数比例大致为 1 : 1,东丰、东辽县、公主岭、蛟河、梨树、辽源市区、伊通和永吉县应提高农业虚拟水总量,其余地区应降低农业虚拟水总量,榆树市需降低的幅度最大,为 1.45 亿 m³。根据各地区调整后的农作物虚拟水总量,并结合农作物单位面积虚拟水消耗量的区域差异,以及农产品市场前景等,综合优化农作物种植结构,对实现农业的水土资源空间匹配具有重要意义。

表 3 葵花籽、烟叶和蔬菜标准差椭圆主要参数变化

农作物	年份	椭圆面积/ km ²	椭圆中心坐标		椭圆长、短轴长度及比值			旋转 角度/(°)
			东经/(°)	北纬/(°)	长轴(X)/m	短轴(Y)/m	X/Y	
葵花籽	2000	47772.11	123.95	44.65	195387.86	77836.97	2.51	116.10
	2005	44897.32	123.74	44.71	197498.00	72372.91	2.73	111.53
	2010	34174.28	123.36	44.80	163301.00	66621.93	2.45	117.58
	2017	20845.47	123.65	44.84	115581.32	57413.67	2.01	125.66
烟叶	2000	70540.32	126.17	44.06	247539.46	90721.73	2.73	119.94
	2005	58682.95	125.78	44.13	210733.04	88650.89	2.38	123.36
	2010	57394.71	125.76	44.05	198467.62	92061.50	2.16	125.61
	2017	115991.60	126.59	43.47	238121.99	155062.14	1.54	123.20
蔬菜	2000	31162.33	125.55	43.91	117387.81	84505.07	1.39	134.54
	2005	35224.25	125.56	43.93	131860.43	85036.67	1.55	131.14
	2010	35490.47	125.49	43.95	138126.18	81793.32	1.69	127.43
	2017	54754.15	125.77	43.91	188574.68	103057.15	1.83	134.19

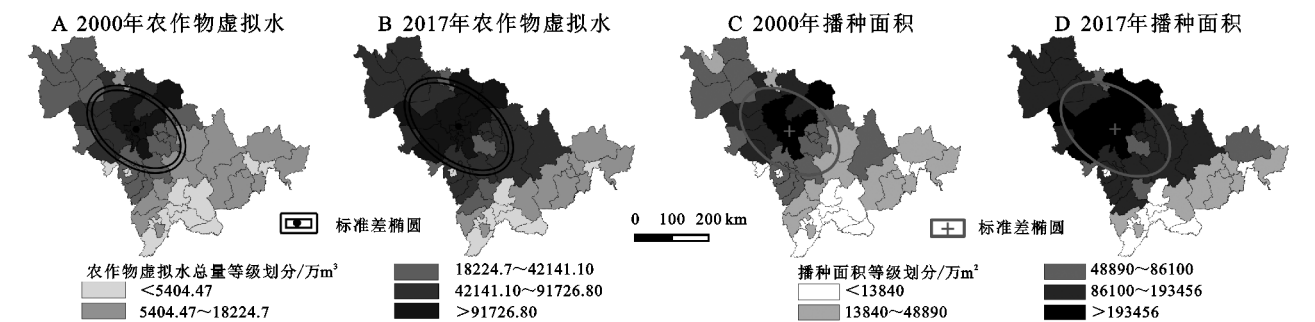


图 7 吉林省农作物虚拟水总量及播种面积空间格局总体演变情况

表 4 农作物虚拟水总量及播种面积标准差椭圆主要参数

项目	年份	椭圆面积/ km ²	椭圆中心坐标		椭圆长、短轴长度及比值			旋转 角度/(°)
			东经/(°)	北纬/(°)	长轴(X)/m	短轴(Y)/m	X/Y	
虚拟水	2000	44295.74	125.45	44.02	147897.23	95341.27	1.55	126.95
	2017	53054.21	125.35	44.08	166537.81	101411.68	1.64	127.93
播种面积	2000	46517.13	125.51	43.98	151316.47	97860.07	1.55	126.24
	2017	54793.08	125.44	44.02	168425.74	103561.39	1.63	125.78

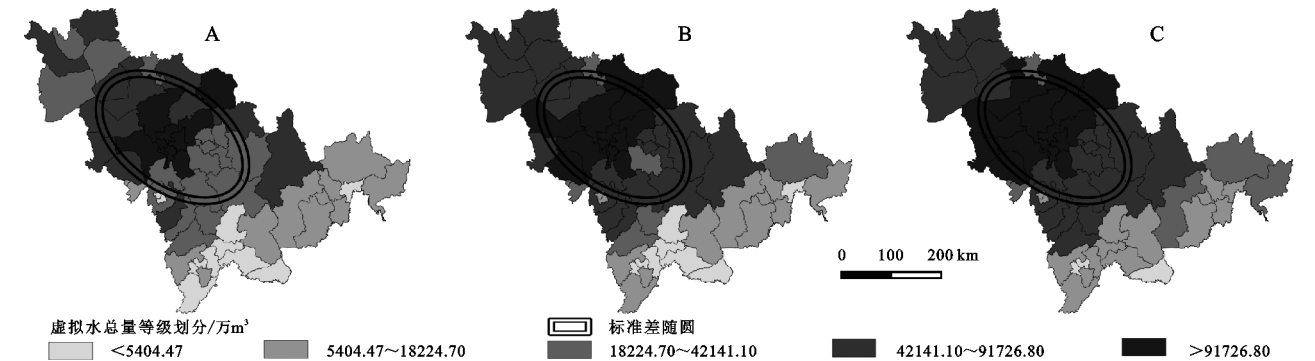


图 8 吉林省农作物虚拟水空间重构的 3 种主要模式

表 5 农安县作为参照区吉林各县市农业虚拟水变化值

亿 m ³					
东部地区	变化值	中部地区	变化值	西部地区	变化值
安图县	0.40	吉林市区	−0.19	大安市	−0.52
通化市	0.05	长春市区	−0.81	扶余市	−0.01
敦化市	1.92	德惠市	−0.70	松原市区	−0.29
抚松县	0.27	东丰县	0.48	农安县	0.00
和龙市	0.21	东辽县	0.59	前郭县	0.15
桦甸市	0.95	公主岭市	0.26	乾安县	−0.40
珲春市	0.32	蛟河市	0.82	双辽市	−0.55
辉南县	0.26	梨树县	0.39	白城市区	−1.48
白山市区	0.14	辽源市区	0.07	洮南市	−1.44
集安市	0.08	舒兰市	−0.22	通榆县	−0.65
靖宇县	0.15	四平市区	−0.05	长岭县	0.01
临江市	0.13	伊通县	0.72	镇赉县	−2.19
柳河县	0.24	永吉县	0.13		
龙井市	0.25	榆树市	−1.45		
梅河口市	0.02				
磐石市	0.61				
通化县	0.24				
图们市	0.13				
汪清县	0.74				
延吉市	0.13				
长白县	0.06				

4 讨论与结论

(1) 2000 年以来吉林省农作物虚拟水总量呈明显上升趋势。由 2000 年的 147.46 亿 m³, 增长到 2017 年的 247.96 亿 m³, 17 a 间增长了 68.15%。全省单位面积农作物虚拟水呈逐渐上升趋势, 由 2000 年的 4 566.49 m³/hm², 上升到 2017 年的 4 702.36 m³/hm²。吉林中部和西部农业虚拟水消耗量较高, 占全省的 85%, 东部地区约占 15%。因此, 吉林省应重点在西部和中部地区加强农业节水发展力度, 并优化农作物种植结构。

(2) 2017 年吉林省虚拟水总量最高的农作物为玉米, 全省玉米虚拟水总量由 2000 年的 81.6 亿 m³, 上升到 2017 年的 184.67 亿 m³, 增长率高达 126.29%, 且占 6 种农作物虚拟水总量的比重上升幅度较大, 由 2000 年的 55%, 上升到 2017 年的 74.48%。其次为水稻, 虚拟水总量由 2000 年的 31.8 亿 m³, 上升到 2017 年的 50.64 亿 m³, 增长了 59.49%, 所占比重为 20.42%。其余 4 种农作物随着播种面积的逐渐下降, 虚拟水总量也不断减少。

(3) 吉林省农作物虚拟水总量和播种面积空间分布重心均位于长春市区,农业水-土资源空间匹配度较高。但2000年以来吉林西部水稻播种面积增加,且西部单位面积农作物虚拟水消耗量高于中部和东部,使得全省农业虚拟水空间重心向西移动,导致与播种面积空间重心呈分离趋势,水-土资源空间匹配度有待进一步优化。

(4) 整体上看,农作物单位面积虚拟水量表现出由东向西逐渐上升的趋势,虽然吉林东部农作物单位面积虚拟水量较低,但由于东部地区受地形影响,扩大农作物种植面积有一定困难,不能充分发挥农作物水资源消耗量低的优势条件。因此可适当调整东、中、西部之间农作物种植结构,通过转移区域间农作物虚拟水,优化全省农业用水布局。吉林中部地区农作物虚拟水消耗量处于中等水平,且农作物播种面积较高,因此吉林中部农业发展力度有进一步提升空间。吉林西部地区由于单位面积农作物虚拟水量最高,应优化农作物种植结构,大力发展节水农业。

参考文献:

- [1] 石小亮,陈珂.吉林省森林涵养水源经济价值核算[J].水土保持通报,2015,35(5):169-172,179.
- [2] 吉林省统计局.吉林统计年鉴[Z].北京:中国统计出版社,2018.
- [3] 吉林省水利厅.吉林省水资源公报[R].长春:吉林省水资源公报编辑部,2020.
- [4] 孙思奥,郑翔益,刘海猛.京津冀城市群虚拟水贸易的远程分析[J].地理学报,2019,74(12):2631-2645.
- [5] 南国卫,孙虎,宋永永.基于虚拟水战略的黄土高原地区农业生产空间布局优化:以榆林市为例[J].经济地理,2017,37(10):197-205.
- [6] Schwarz J, Mathijs E, Maertens M. A dynamic view on agricultural trade patterns and virtual water flows in Peru[J]. Science of the Total Environment, 2019, 683: 719-728.
- [7] 齐娅荣,唐莲,陈炯利.基于CROPWAT的宁夏虚拟水战略适宜性初步评价[J].水文,2020,40(1):58-63.
- [8] 孙才志,王中慧.中国和“一带一路”沿线国家农产品虚拟水贸易的驱动因素[J].水利经济,2020,38(1):1-7.
- [9] 郭相平,余涛,吴梦洋,等.中国省区虚拟水流动及对农业用水的影响[J].排灌机械工程学报,2018,36(8):744-749.
- [10] 孙才志,王中慧.中国与“一带一路”沿线国家农产品贸易的虚拟水量流动特征[J].水资源保护,2019,35(1):14-19,26.
- [11] 魏怡然,邵玲,张宝刚,等.北京市虚拟水消费与贸易[J].自然资源学报,2019,34(9):1962-1973.
- [12] 杜依杭,王钧,鲁顺子,等.城市化背景下中国虚拟水流动空间变化特征及其驱动因素研究[J].北京大学学报:自然科学版,2019,55(6):1141-1151.
- [13] Ma Xiaolei, Ma Yanji. The spatiotemporal variation analysis of virtual water for agriculture and livestock husbandry: A study for Jilin Province in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 1150-1161.
- [14] 孙才志,韩雪,秦晓楠.中国区际间主要农产品虚拟水流动格局稳定性[J].地理研究,2014,33(3):478-489.
- [15] Liu J, Li M, Wu M, et al. Influences of the south-to-north water diversion project and virtual water flows on regional water resources considering both water quantity and quality[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118920.
- [16] 王玉宝,吴普特,孙世坤,等.我国粮食虚拟水流动对水资源和区域经济的影响[J].农业机械学报,2015,46(10):208-215.
- [17] 李新生,黄会平,韩宇平,等.京津冀农业虚拟水流动及对区域水资源压力影响研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):40-48.
- [18] 吴普特,卓拉,刘艺琳,等.区域主要作物生产实体水:虚拟水耦合流动过程解析与评价[J].科学通报,2019,64(18):1953-1966.
- [19] 田贵良,吴茜.居民畜产品消费增长对农业用水量的影响[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):109-115.
- [20] 王艳阳,王会肖,张昕.基于投入产出表的中国水足迹走势分析[J].生态学报,2013,33(11):3488-3498.
- [21] 王艳阳,王会肖,蔡燕.北京市水足迹计算与分析[J].中国生态农业学报,2011,19(4):954-960.
- [22] 黄会平,李新生,韩宇平,等.京津冀居民膳食虚拟水消费差异及影响因素分析[J].南水北调与水利科技,2019,17(2):20-28.
- [23] 秦丽杰,侯希明,梅婷,等.中国城乡居民膳食水足迹的时空分异研究[J].生态经济,2015,31(11):19-22.
- [24] 罗奎,李广东,劳昕.京津冀城市群产业空间重构与优化调控[J].地理科学进展,2020,39(2):179-194.
- [25] 王景新,支晓娟.中国乡村振兴及其地域空间重构:特色小镇与美丽乡村同建振兴乡村的案例、经验及未来[J].南京农业大学学报:社会科学版,2018,18(2):17-26.
- [26] 邓春,王成,王钟书.村落生产生活生态空间重构的共生路径研究:基于农户间共生界面的分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(3):96-103.
- [27] 乔旭宁,顾羊羊,牛海鹏,等.河南省焦作市产业结构升级与空间重构[J].地域研究与开发,2018,37(3):34-39.
- [28] 马晓蕾.新时期粮食主产区农业产业结构演变与空间格局研究:以吉林省为例[D].长春:中国科学院大学,2019.
- [29] 张润,刘志辉,秦艳,等.新疆2000—2012年主要农作物虚拟水含量计算与分析[J].水土保持研究,2015,22(4):265-268.

[20] 魏璐瑶,陆玉麒.“一带一路”背景下全球气候变化的响应机制研究[J].生态经济,2019,35(12):153-158.

[21] 吴成启,唐登勇.近 50 年来全球变暖背景下青藏高原气温变化特征[J].水土保持研究,2017,24(6):262-266,272.

[22] 何金海,詹丰兴,祁莉,等.全球变暖减缓期陆地地表气温变化特征和 CMIP5 多模式的未来情景预估[J].大气科学,2016,40(1):33-45.

[23] 张秀年,严华生,郭世昌.“全球变暖”背景下的全球气温时空变化特征[J].热带气象学报,2004,20(5):561-570.

[24] Ge Q S, Zhang X Z, Hao Z X, et al. Rates of temperature change in China during the past 2000 years[J]. Science China, 2011,54(11):1627-1634.

[25] Panin G N, Solomonova I V, Vyruchalkina T Y. Climatic trends in the middle and high latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Water Resources, 2009,36(6):718-730.

[26] Kong Y, Wang C H. Responses and changes in the permafrost and snow water equivalent in the Northern Hemisphere under a scenario of 1.5℃ warming[J]. Advances in Climate Change Research, 2017,8(4):235-244.

[27] 徐婷,邵华,张弛.近 32 a 中亚地区气温时空格局分析[J].干旱区地理:汉文版,2015,38(1):25-35.

[28] 吴国雄,刘屹岷,何编,等.青藏高原感热气泵影响亚洲夏季风的机制[J].大气科学,2018,42(3):488-504.

[29] Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. Nature, 2007,448(7152):461-465.

[30] Huang X, Zhou T J, Zhang W X, et al. Northern Hemisphere land monsoon precipitation changes in the twentieth century revealed by multiple reanalysis datasets[J]. Climate Dynamics, 2019,53(11):7131-7149.

[31] Chiang J C H, Friman A R. Extratropical cooling, inter-hemispheric thermal gradients, and tropical climate change[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2012,40:383-412.

[32] Wan H, Zhang X B, Zwiers F, et al. Attributing northern high-latitude precipitation change over the period 1966—2005 to human influence[J]. Climate Dynamics, 2015,45:1713-1726.

[33] Li R L, Wang C H, Wu D. Changes in precipitation recycling over arid regions in the Northern Hemisphere[J]. Theoretical & Applied Climatology, 2018,131(4):489-502.

[34] 梁珑腾,马龙,刘廷玺,等.1951—2014 年中国北方地区季节气温突变与变暖停滞年份的时空变异性[J].自然资源学报,2018,33(12):2149-2166.

[35] Liu H T, Zhang X J, Li X D, et al. Climatic characteristics of temperature and precipitation in Hetian River Basin during 1954—2007[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2009,4:26-30.

[36] 邱雅惠.中国区域气候多尺度突变特征及成因分析[D].南京:南京师范大学,2019.

[37] 马晓波,胡泽勇.青藏高原 40 年来降水变化趋势及突变的分析[J].中国沙漠,2005,25(1):139-141.



(上接第 312 页)

[30] 刘洋,于恩涛,杨建军,等.西北干旱区 1960—2019 年实际蒸散发时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(6):75-80,89.

[31] 龙爱华,徐忠民,张志强.虚拟水理论方法与西北四省(区)虚拟水实证研究[J].地球科学进展,2004,19(4):577-584.

[32] 秦丽杰,靳英华,段佩利.吉林省西部玉米生产水足迹研究[J].地理科学,2012,32(8):1020-1025.

[33] 赵璐,赵作权.基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J].地理科学,2014,34(8):979-986.

[34] 赵宏波,余涤非,苗长虹,等.基于 POI 数据的郑州市文化设施的区位布局特征与影响因素研究[J].地理科学,2018,38(9):1525-1534.

[35] 任嘉敏,马延吉.东北地区工业污染时空格局演变研究[J].环境科学学报,2018,38(5):2108-2118.



(上接第 319 页)

[30] Wang C, Wang S, Fu B J, et al. Precipitation gradient determines the tradeoff between soil moisture and soil organic carbon, total nitrogen, and species richness in the Loess Plateau, China[J]. Science of the Total Environment, 2017,575:1538-1545.

[31] 黄麟,曹巍,吴丹,等.西藏高原生态系统服务时空格局及其变化特征[J].自然资源学报,2016,31(4):543-555.

[32] 张华国.试论新时期西藏“一江两河”农业生态流域资源开发和经济发展的生态环境问题及对策[J].西藏农业科技,2017,39(2):40-44.

[33] Niu Q, Liu L, Heng J, et al. A multi-index evaluation of drought characteristics in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibetan Plateau, Southwest China[J]. Frontiers in Earth Science, 2020,8. DOI: 10.3389/feart.2020.00213.

[34] 拉珍,拉巴,陈涛,等.基于 TVDI 的西藏“一江两河”地区干旱监测研究[J].高原山地气象研究,2015,35(4):48-52.