



中国农业资源与区划

Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning

ISSN 1005-9121, CN 11-3513/S

《中国农业资源与区划》网络首发论文

题目： 基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析
作者： 崔晨曦，孟凡浩，罗敏，王媛媛，萨楚拉，包玉海
收稿日期： 2021-10-19
网络首发日期： 2022-01-10
引用格式： 崔晨曦，孟凡浩，罗敏，王媛媛，萨楚拉，包玉海. 基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析[J/OL]. 中国农业资源与区划. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3513.S.20220107.1731.052.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

· 资源利用 ·

基于地理探测器的内蒙古耕地水资源短缺时空变化特征及驱动力分析*

崔晨曦^{1,2}, 孟凡浩^{1,2,3,*}, 罗敏^{1,2}, 王媛媛^{1,2}, 萨楚拉^{1,2}, 包玉海^{1,2}

(1. 内蒙古师范大学地理科学学院, 呼和浩特 010022; 2. 内蒙古师范大学遥感与地理信息系统重点实验室, 呼和浩特 010022; 3. 内蒙古自治区土地利用与整治工程技术研究中心, 呼和浩特 010022)

摘要 [目的]明晰干旱半干旱区耕地水资源短缺的时空变化特征及驱动因素,是实现区域水资源可持续利用的首要前提,对保障区域乃至全国粮食安全和生态健康有着重要意义。[方法]以内蒙古为典型研究区,以水足迹理论为依据,通过构建耕地水资源短缺指数(Arable Land Water Scarcity Index, *AWSI*),分析2000—2018年内蒙古*AWSI*时空格局及变化特征,并进一步借助地理探测器模型定量揭示研究区内气候、植被、地形、人口密度等11个自然和社会经济因素对耕地水资源短缺时空变化的影响差异。[结果]结果表明:①内蒙古*AWSI*总体呈西高东低的分布特征,西部耕地缺水压力较大。2000—2018年内蒙古*AWSI*呈增加趋势,增加区域占总面积82%以上,主要分布在东部和中部地区。②自然因素主要决定内蒙古耕地水资源短缺的空间格局,其影响明显大于社会经济因素,但是2000—2018年间社会经济因素的影响力在呈增大趋势。③自然因素中以蒸发量、年均温、降水量为主的气候因子在生态探测中共有19组显著差异,占据了影响因子中的主导地位。而在社会经济因素与自然因素的交互作用下,影响力呈现相互增强或非线性增强。[结论]由于农业水资源短缺空间分布不均及供需矛盾加剧,亟需增加节水设施和调整种植结构成为内蒙古未来农业水资源可持续利用的重要问题。

关键词 耕地水资源 时空变化 地理探测器 自然因素 社会经济因素 内蒙古

中图分类号: P942 **文献标识码**: A

0 引言

耕地作为维护国家粮食安全的基石,承担着生产供给、生态景观等职能^[1]。耕地不仅贡献粮食、蔬菜等农副产品,还具有调节气候、涵养水源等生态环境功能^[2]。随着公众对生态环保意识的逐渐增强及对建设生态文明的大力提倡,如何协调粮食安全、社会保障、生态和谐成为研究焦点^[3]。由于我国水资源分布不均,特别是农业水资源供需之间的矛盾升级^[4],多个产粮大区面临缺水问题,严重遏制了我国经济和社会的可持续发展^[5]。据统计,我国存在严重缺水城市约110个,每年因缺水造成的经济损失达2000亿元^[6]。近年来,随着城市建设占用大量耕地,中国粮食生产的中心逐渐向内蒙古等仅占全国水资源总量19%的北方地区转移,高耗水、低收入的粮食生产给北方地区带来了巨大水资源和生态压力^[7]。人口激增及城市扩张,也导致曾经的土地格局发生了自然资源枯竭、生态系统破坏等巨大改变,致使生态系统功能退化严重,农业水资源短缺问题加速恶化,保持农业可持续发展成为重中之

收稿日期: 2021-10-19

作者简介: 崔晨曦(2000—),女,内蒙古敖汉旗人,硕士。研究方向:农业水资源调查与应用

*通讯作者: 孟凡浩(1990—),男,内蒙古扎赉特旗人,博士、讲师。研究方向:水文水资源。Email: mfh320@imnu.edu.cn

*资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目“内蒙古典型草原内陆河流域水文-生态协同演变机制研究—以乌拉盖河流域为例”(2020BS03042); 内蒙古自治区科技计划项目“基于需水阈值的黄河流域内蒙古段生态修复与管控技术集成研究”(2021GG0367)

重^[8]。若要做到农业的可持续发展,水资源短缺将是面临的首要挑战^[9]。明确耕地缺水时空变化状况及其驱动因素是实现区域水资源可持续利用的关键所在。

目前学者们已建立多个指标来反映耕地水资源短缺状况。例如, Falkenmark 等人提出了水压力指数 (Water Pressure Index, *WPI*), *WPI* 是以人均水资源量为标准来衡量一个地区的水资源稀缺程度^[10]。Raskin 等人用直接水代替总需水量,考虑直接水和可利用水资源之间的关系,制定了水资源脆弱性指数 (Water Resource Vulnerability Index, *WRVI*)^[11]。然而,上述指标在评价水资源短缺时并不包括绿水。农作物使用的自然降水(即绿水)也很重要,是除灌溉水外缓解作物需水的主要水源^[12]。综合考虑区域蓝水、绿水和灰水足迹是水足迹理论的核心。操信春等考虑到绿色水足迹,在水足迹和广义水资源的基础上,建立了耕地水资源短缺指数 (Arable Land Water Scarcity Index, *AWSI*),作为实现广义水资源和实际用水量统一的载体^[13]。尽管 *AWSI* 在一些地区得到评估,但其在干旱半干旱地区的适用性尚不明确。

近年来多位学者利用不同方法分析了自然或社会活动对农业水资源的影响。如韩宇平等利用主成分分析法研究了京津冀地区内作物蓝水、绿水、灰水足迹的时空分布、变化趋势及影响因子^[14];冯变变等采用对数迪氏指数分解法得出种植规模和人口变化是使山西省作物水足迹增加的主要驱动力^[15]。但当前研究缺乏定量评价自然和经济因素共同作用下对耕地缺水的影响。地理探测器有别于传统主观性较强、缺乏定量化分析的统计方法,是一种不仅能够检验单变量的空间分异性,还可以探测两个变量间一致性和因果关系的统计模型^[16]。

内蒙古自治区是全国 13 个粮食重点生产省区之一,截至 2017 年,内蒙古现有耕地 1.37 亿亩,是全国耕地保有量过亿亩的 4 个省区之一,人均耕地面积 5.48 亩,是全国人均耕地面积的 3.7 倍。水资源短缺作为全世界的系统性风险,在干旱半干旱地区尤为严重^[17]。内蒙古属典型干旱半干旱地区,严重制约着全区农业的持续发展。本文选取内蒙古作为研究区,以水足迹理论为依据建立耕地水资源短缺指数 (*AWSI*),分析 2000—2018 年内蒙古 *AWSI* 时空格局及变化特征,并选取降水量、蒸发量、NDVI 等 8 个自然因素和人口密度等 3 个社会经济因素作为耕地缺水的影响因子,借助地理探测器模型定量揭示内蒙古自然和社会经济多种因素对 *AWSI* 的影响差异。本研究结果可为政府有关部门制定合理、可持续的农业用水方案提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

内蒙古地处中国北部边疆,位于北纬 37°24'~53°23'、东经 97°12'~126°04'之间,东北部与黑龙江、吉林、辽宁、河北交界,南部与山西、陕西、宁夏相邻,西南部与甘肃毗连,北部与俄罗斯、蒙古接壤,属于四大地理区划的西北地区(图 1)。内蒙古地势较高,平均海拔高度 1 000 米左右,全区基本属于高原型的地貌区,水土流失严重。气候以温带大陆性季风气候为主,有降水量少而不匀、寒暑变化剧烈的特点。地跨黄河、额尔古纳河、嫩江、西辽河四大水系。截至 2019 年末,内蒙古总面积 118.3 万平方公里,辖 12 个地级行政区,常住人口 2 539.6 万人,内蒙古地势由东北向西南斜伸,呈狭长形,东西直线距离 2400 多千米。该文将内蒙古划分为三大区域:东部地区,包括赤峰市、通辽市、兴安盟、呼伦贝尔市;中部地区,包括呼和浩特市、乌兰察布市、锡林郭勒盟;西部地区,包括包头市、鄂尔多斯市、乌海市、巴彦淖尔市、阿拉善盟。东部地区土地面积占全区的 27%,耕地面积占全区的 20%,人口占全区的 18%,而水资源总量占全区的 67%,人均占有水资源量为全区均值的 3.6 倍;中西部地区的土地面积占全区 26%,耕地占全区 30%,人口占全区 66%,但水资源仅占全区 24%,大部分地区水资源紧缺。

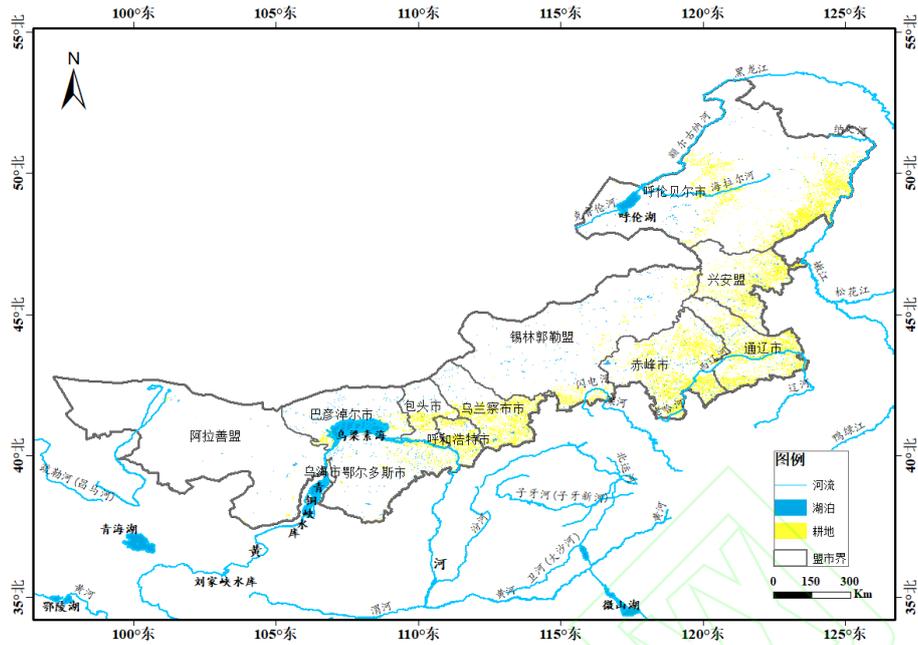


图1 研究区概况图（审图号 GS(2019)3333 号，底图无修改。）

1.2 数据来源与处理

该文的研究区域为内蒙古 12 个盟市，研究时段为 2000—2018 年。其中，计算耕地水资源短缺指数 (*AWSI*) 所需数据有：①气象数据（包括月降水量、月平均最高、最低气温、风速等）源于国家气象中心 (<http://www.nmic.cn/>)，若一个地级市内有多站点取其平均值；②各盟市历年耕地面积、农作物播种面积和产量、化肥施用量、第一产业生产总值等数据源于《内蒙古统计年鉴》和《内蒙古调查年鉴》；③土壤数据来自世界土壤数据库 (HWSD v1.2) 土壤数据集；④各盟市历年总用水量、水资源总量等数据来自《内蒙古自治区水资源公报》。耕地水资源短缺的影响因子数据来自：①高程、坡度、NDVI（归一化植被指数）、土地利用 / 覆盖数据来源于中国科学院资源环境数据中心 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>)；②垦殖率、牲畜密度数据来源于《内蒙古统计年鉴》；③人口密度数据来源于 World pop 国家/地区数据 (<https://www.worldpop.org/>)；④气温、降水、蒸发量等气候数据来源于国家气象中心 (<http://www.nmic.cn/>)。高程、坡度、人口密度、NDVI（归一化植被指数）、蒸发量通过 ArcGIS 10.4 软件中区域统计工具计算获取。土地利用程度指标通过 ArcGIS 软件中面积制表工具统计每个地级市单元内每种地类面积后，根据土地利用程度计算公式计算获取。数据以县级行政区划为统计单元，并换算为与其他数据统一的单位密度（每平方公里）或占比（%），最后将统计数据与对应的行政区划做空间关联，以及矢量转栅格处理。

1.3 研究方法

1.3.1 耕地水资源短缺指数

该文基于水足迹理论视角下的广义水资源 (Agricultural Water Resources, *AWR*) 与水足迹总量 (Crop Water Footprint, *CWF*)，构建耕地水资源短缺评价指标 (Arable Land Water Scarcity Index, *AWSI*)。首先通过 CROPWAT 8.0 软件^[18]计算得到内蒙古各盟市历年作物（小麦、玉米、大豆、薯类）的蓝水、绿水和灰水足迹，然后得到全区历年主要农作物的 *CWF*，再利用水资源数据计算出 *AWR*，从而获得 *AWSI* 数据。*AWSI* 的计算公式如下：

$$AWSI = \frac{CWF}{AWR} \quad (1)$$

式中：*AWSI* 为耕地水资源短缺指数，无量纲；*CWF* 为区域农作物水足迹总量， m^3 ；*AWR* 为

区域农业广义水资源量，即可以提供作为农作物生产的蓝水和绿水水资源量， m^3 。

$$CWF = CWF_b + CWF_g + CWF_{grey} \quad (2)$$

$$AWR = AWR_b + AWR_g \quad (3)$$

式中： CWF_b 、 CWF_g 及 CWF_{grey} 分别为作物的蓝水、绿水和灰水足迹， m^3 ； AWR_b 与 AWR_g 分别为农业可利用蓝水（常规水资源）和绿水资源量， m^3 。 CWF_b 与 CWF_g 基于作物需水量估算^[19]， CWF_{grey} 、 AWR_b 、 AWR_g 分别通过以下公式求得：

$$CWF_b = CWU_b * A = A * 10 * \sum_{d=1}^{lg} p ET_b \quad (4)$$

$$CWF_g = CWU_g * A = A * 10 * \sum_{d=1}^{lg} p ET_g \quad (5)$$

$$CWF_{grey} = \alpha F / (C_{max} - C_{nat}) \quad (6)$$

$$AWR_b = TWR * AWU / TWU \quad (7)$$

$$AWR_g = 0.1A * P_e \quad (8)$$

$$ET_b = \max(0, ET_c - P_e) \quad (9)$$

$$ET_g = \min(ET_c, P_e) \quad (10)$$

$$P_e = \begin{cases} P(4.17 - 0.02P)/4.17 & P < 83 \\ 41.7 + 0.1P & P \geq 83 \end{cases}$$

(11)

式中： CWU_b 与 CWU_g 分别为作物蓝水用量和绿水用量（ m^3/ha^{-1} ）； F 为化肥施用量， kg ； α 为淋溶率； C_{max} 为水体最大容许浓度， kg/m^3 ； C_{nat} 为自然本底浓度， kg/m^3 ； ET_b 和 ET_g 分别为作物蓝水需水量和绿水需水量（ mm ）； ET_c 为作物蒸发蒸腾量（ mm ），可通过 CROPWAT 8.0 软件计算得到； TWR （Total Water Resources）为区域常规水资源总量， m^3 ； TWU （Total Water Using）与 AWU （Agricultural Water Using）分别为总用水量与农业用水量， m^3 ； A 为耕地面积， ha ； P_e 为有效降水^[20]， mm 。

基于水足迹理论下构建 $AWSI$ ，全面揭示了研究区对水资源需求的能力，将 $AWSI$ 指标进行等级划分不仅可以直观判断研究区的水资源短缺程度，还可以直接对区域间水资源短缺程度进行对比。该文 $AWSI$ 等级划分及其对应水短缺等级（表 1）， $AWSI$ 值越高意味着研究区面临的水资源压力越大。

表 1 AWSI水短缺等级

耕地水资源短缺指数 ($AWSI$)	水短缺等级
$AWSI < 0.100$	无水资源压力
$0.100 \leq AWSI < 0.200$	低度水资源压力
$0.200 \leq AWSI < 0.400$	中度水资源压力
$0.400 \leq AWSI < 0.800$	高度水资源压力
$AWSI > 0.800$	极高水资源压力

1.3.2 影响因子选取

耕地缺水受多重因素的影响，该文依据内蒙古地势较高、地貌广阔、气候以温带大陆季风气候为主等的自然特征，在自然因子中选取了年降水量、年均温、蒸发量、归一化植被指数（NDVI）、土地利用度、垦殖率、坡度、高程 8 个自然因素。近年来内蒙古人口骤增、畜牧业飞速发展导致社会因素的影响也不可小觑，该文综合选取了人口密度、牲畜密度、第一产业生产总值（一产 GDP）3 个社会经济因素研究对内蒙古耕地缺水的影响（表 2）。

表 2 影响内蒙古耕地水资源短缺的自然和社会因素

类型	指标	
自然因素	年降水	
	气候	
	年均温	
	蒸发量	
	植被	归一化植被指数 (NDVI)
	土地	土地利用度
	地形	垦殖率
社会经济因素	坡度	
	高程	
	人口密度	
	牲畜密度	
	第一产业生产总值 (一产 GDP)	

利用 ArcGIS 10.4 创建渔网工具，生成全区范围内 10 km×10 km 格网^[21]，共 11 568 个中心点作采样点，提取空间上对应的 X 和 Y 属性值；利用重分类工具中自然断点法将影响因子 X₀ 根据其大类标准分为 6 类^[22]，最后将其代入地理探测器模型处理。

1.3.3 地理探测器模型

应用地理探测器模型可以探测耕地水资源短缺指数 (AWSI) 及其影响因子的空间分异性^[23]，从而揭示其背后驱动力。该文应用地理探测器中风险因子探测、生态探测、交互探测三个探测器。

(1) 风险因子探测：在本研究中利用此方法探测 Y (AWSI) 的空间分异性，以及探测影响因子 X (自然及社会因素) 在多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。用 q 值度量，表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (12)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \quad SST = N \sigma^2 \quad (13)$$

式中， $h = 1, \dots, L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层 (Strata)，即分区或分类； N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数； σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和 (Within Sum of Squares) 和全区总方差 (Total Sum of Squares)。q 值的值域为 [0,1]，值越大说明 Y 的空间分异性越明显；如果分层是由自变量 X 生成的，则 q 值越大表示自变量 X 对属于 Y 的解释力越强，反之则越弱，q 值表示 X 解释了 100×q% 的 Y。

(2) 生态探测：本研究根据此方法比较影响因子中两因子 X1 和 X2 对属性 Y (AWSI) 的空间分布的影响是否有显著差异，以 F 统计量来衡量。在两种因子之间的统计学差异显著的结果中，如果行列因子间有显著差异性，标记为“Y”，反之标记为“N”，通过生态探测可进一步验证主导的影响因子。

$$F = \frac{N_{X1}(N_{X2}-1)SSW_{X1}}{N_{X2}(N_{X1}-1)SSW_{X2}} \quad (14)$$

$$SSW_{X1} = \sum_{h=1}^{L1} N_h \sigma_h^2, \quad SSW_{X2} = \sum_{h=1}^{L2} N_h \sigma_h^2$$

(15)

式中： N_{X1} 及 N_{X2} 分别表示两个因子 $X1$ 和 $X2$ 的样本量； SSW_{X1} 和 SSW_{X2} 分别表示由 $X1$ 和 $X2$ 形成的分层的层内方差之和； $L1$ 和 $L2$ 分别表示变量 $X1$ 和 $X2$ 的分层数目。其中零假设 H_0 ： $SSW_{X1} = SSW_{X2}$ 。如果在 α 的显著性水平上拒绝 H_0 ，这表明两因子 $X1$ 和 $X2$ 对属性 Y 的空间分布的影响存在着显著的差异。

(3) 交互探测：利用此方法可识别不同风险因子 X_s 之间的交互作用，即评估影响因素中两因子 $X1$ 和 $X2$ 共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y ($AWSI$) 的解释力，或这些因子对 Y ($AWSI$) 的影响是相互独立的。评估的方法是首先分别计算两种因子 $X1$ 和 $X2$ 对 Y 的 q 值： $q(X1)$ 和 $q(X2)$ ，并且计算它们交互时的 q 值： $q(X1 \cap X2)$ ，并对 $q(X1)$ 、 $q(X2)$ 与 $q(X1 \cap X2)$ 进行比较。两个因子之间的关系可分为以下几类（表 3）：

表 3 交互作用分类

判断依据	交互作用
$q(X1 \cap X2) < \text{Min}(q(X1), q(X2))$	非线性减弱
$\text{Min}(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \text{Max}(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱
$q(X1 \cap X2) > \text{Max}(q(X1), q(X2))$	双因子增强
$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强

2 结果与分析

2.1 耕地水资源短缺时空格局及变化特征

2000—2018 年内蒙古 $AWSI$ 总体呈西高东低的分布特征，以多年平均 0.66 的水平经受着高度水资源压力，而降水稀少的西部面临更为严重的水短缺（图 2a）。内蒙古 $AWSI$ 从时间变化来看，既有增加又有减少，总体呈增加趋势（图 2b）。其中，耕地缺水指数增加的区域面积占内蒙古总面积的 82%以上。自 2000 年至 2018 年，东部地区和中部地区 $AWSI$ 都有不同程度的增长，而西部地区 $AWSI$ 数值显著下降（图 2b）；东部地区 $AWSI$ 整体上呈现增长趋势，赤峰市的增长率达到 182%，呼伦贝尔市和通辽市分别增长 15%和 54%，兴安盟 $AWSI$ 增长率虽有所下降，但自 2015 年后又呈现上升趋势（图 2c）；中部地区的乌兰察布市 $AWSI$ 数值下降 22%，呼和浩特市和锡林郭勒盟 $AWSI$ 均有所增长，锡林郭勒盟增长率达到 186%（图 2d）；西部地区 $AWSI$ 整体上呈现下降趋势，包头市、乌海市和巴彦淖尔市 $AWSI$ 均显著降低，鄂尔多斯市和阿拉善盟 $AWSI$ 明显升高（图 2e）。

为诠释各盟（市）耕地水资源短缺与时间变化的关系，核算了各盟（市） $AWSI$ 的多年均值、中位数、极差、标准差和增长率等（表 4）。12 个盟市中除乌海市，其他盟市 2000—2018 年的多年均值和中位数都仅存在微小差异，变化趋势高度吻合。乌海市由于 2000—2002 年气候因素所致 $AWSI$ 数值增大而导致年均值和中位数出现较大差异。极差采用年际间“最大值-最小值”获得，西部地区的阿拉善盟、巴彦淖尔市和乌海市的极差都超过 2.00，说明这三个盟市的 $AWSI$ 数值年际间变化大且不稳定。呼伦贝尔市和乌兰察布市标准差在 12 盟市中极低，综合 $AWSI$ 数据来看，这两盟市在年际间变化较小，保持稳定。其中 5 个盟市通过退耕还林、生态保护等措施，使得耕地水资源短缺现象有所好转， $AWSI$ 数值也有所下降，尤其是西部地区多个盟市 $AWSI$ 数值显著下降；但仍存在部分盟市的 $AWSI$ 值有不同程度增长，这说明虽有少数盟市耕地水资源短缺现象有所好转，但就目前数据来看，整体 $AWSI$ 数值还处于不断增加的阶段，内蒙古耕地水资源短缺现象仍很严峻。

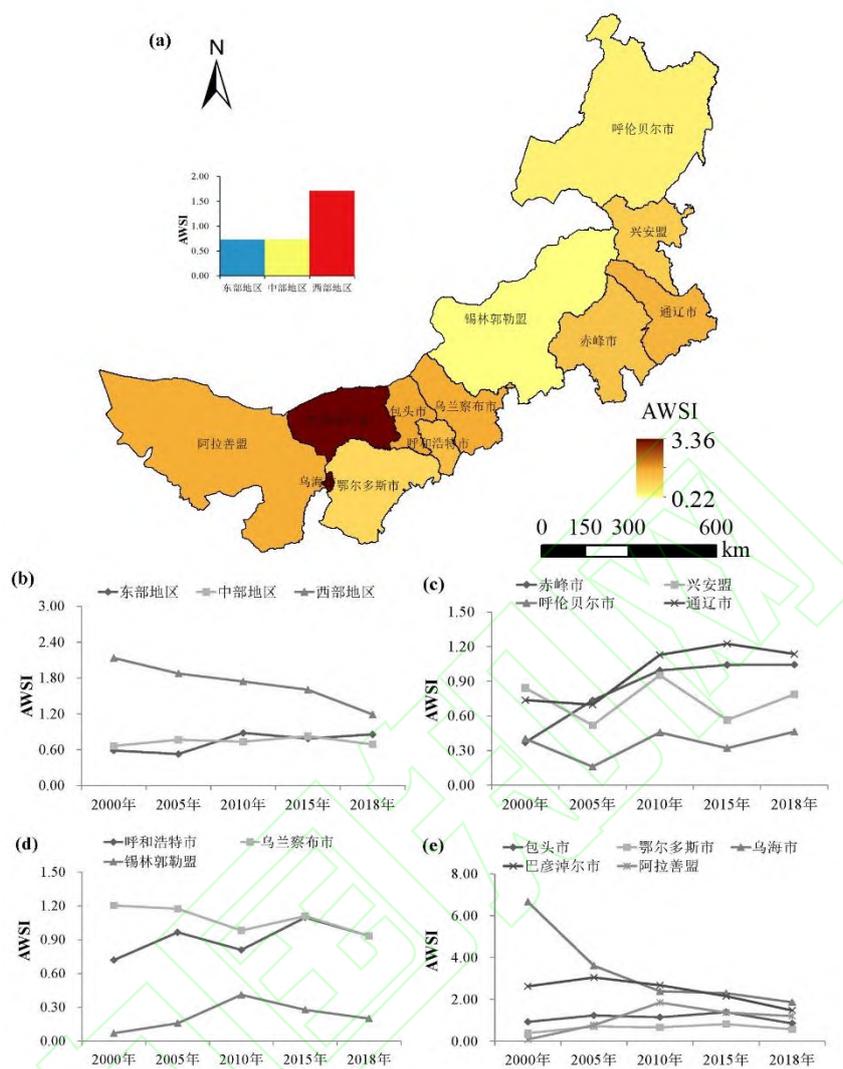


图2 内蒙古各地区2000—2018年AWSI变化趋势

表4 内蒙古各地区AWSI在2000—2018年间的主要统计量

地区	名称	均值	中位数	极差	标准差	增长率
东部地区	赤峰市	0.86	0.88	0.91	0.21	1.82
	兴安盟	0.67	0.63	0.83	0.21	-0.07
	呼伦贝尔市	0.33	0.32	0.61	0.15	0.15
	通辽市	1.11	1.13	1.15	0.29	0.54
中部地区	呼和浩特市	0.83	0.81	0.77	0.22	0.30
	乌兰察布市	1.01	0.99	0.71	0.18	-0.22
	锡林郭勒盟	0.22	0.23	0.34	0.11	1.86
西部地区	包头市	1.00	1.00	0.86	0.21	-0.08
	鄂尔多斯市	0.59	0.57	1.05	0.24	0.47
	乌海市	3.12	2.69	4.94	1.21	-0.72
	巴彦淖尔市	2.32	2.27	2.04	0.52	-0.44

2.2 耕地水资源短缺空间分异驱动因素分析

2.2.1 探测因子单因素分析

因子探测结果 (q 值) 反映了各因子对内蒙古区域耕地缺水指数影响的解释力。综合来看, 所选取的因子对内蒙古耕地水资源短缺状况有着不同程度的影响, 自然因素对耕地水资源短缺变化的影响要高于社会经济因素。根据地理探测器模型所得 2000—2018 年平均 q 值 (图 3) 可知, 各因子对耕地缺水指数变化的影响程度排序依次为: 蒸发量 (平均值为 0.791) > 年均温 (0.775) > 垦殖率 (0.745) > 一产 GDP (0.717) > 植被 NDVI (0.697) > 年降水量 (0.696) > 人口密度 (0.640) > 牲畜密度 (0.635) > 高程 (0.631) > 坡度 (0.555) > 土地利用度 (0.533)。自然因素中解释力最强的因子是蒸发量, 解释率在 79% 以上, 其次是年均温, 解释率在 77% 以上。除坡度和土地利用度以外, 其他因子的平均解释力均达到 60% 以上, 对内蒙古 *AWSI* 的影响均显著。社会经济因子中一产 GDP 的贡献相对较高。综合来看, 自然因素中气候因子对研究区耕地水资源短缺状况的影响力较大, 这与内蒙古气候特征 (降水量少, 蒸发能力强) 及地表覆盖状况有关; 社会因素中一产 GDP 对内蒙古耕地水资源短缺状况的影响最大, 可能源于近年来粮食产量和牲畜数量变化有关, 一产 GDP 的增加受水资源空间调配 (如灌溉等) 影响大。

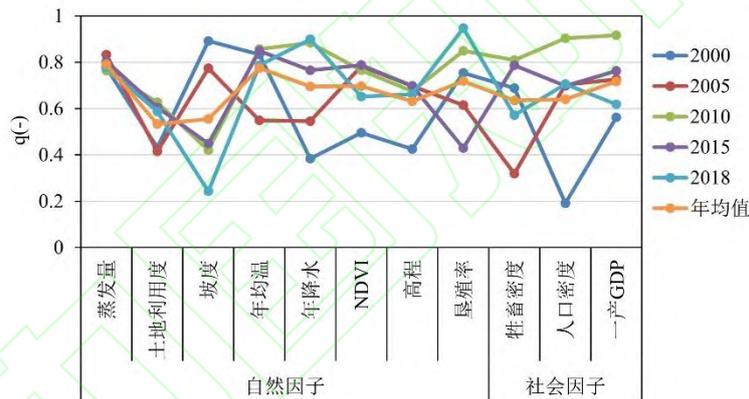


图 3 影响因子 q 值 2000-2018 年际间变化

2.2.2 生态探测

生态探测反映了两种因子对内蒙古耕地水资源短缺的影响是否有显著差异, 进一步验证主导因子的影响, 以及各因子作用机理的差异性。探测结果显示起主导作用的因子间作用机理不同 (图 4), 如气候因子与地形因子极少有显著差异, 气候因子中蒸发量与社会因素中人口密度, 自然因素中气候因子年均温、年降水、垦殖率, NDVI 均有显著差异, 进一步验证蒸发量比其他影响因子的解释力强; 如垦殖率与土地利用度、牲畜密度、人口密度、坡度等均存在显著差异, 也验证了其在探测因子中的影响力 (解释率 74.5%, 第 3 位); 土地利用度与人口密度、垦殖率、年均温、年降水、NDVI、高程有显著差异, 这与其解释力弱的特征相符合。有显著差异的因子数最多的是气候因子, 其次是社会经济因子、地形因子, 气候因子中年均温和年降水与其他因子的显著特征相似, 但两因子间仍存在显著差异, 这也与气候因子是影响研究区耕地缺水的主导因素的结论相一致。而社会因素中一产 GDP 除了与坡度和高程有显著差异外, 与蒸发量、土地利用度、牲畜密度、人口密度、垦殖率、年均温、年降水和 NDVI 等因子均无显著差异, 可以看出研究区耕地缺水受一产 GDP 和其他动态因

子影响均有一致性。

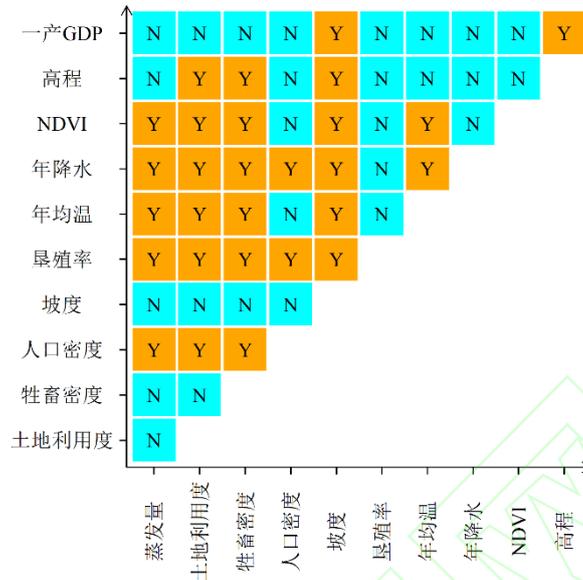


图4 生态探测结果

注：Y表示两因子对耕地缺水指数的影响具有显著差异性（置信度水平为95%）；N表示无显著性差异。

2.2.3 探测因子交互作用分析

交互探测通过评估不同影响因子的交互作用，分析是否会增加或减弱对因变量Y（AWSI）的解释力，或是影响因子对于因变量的影响相互独立。分析自然因子与社会经济因子的交互作用有利于进一步研究耕地缺水的驱动机制。本研究中不同两因子间的交互作用q值均大于单因子q值，即因子之间交互作用均呈现双因子增强和非线性增强，不存在相互独立或起减弱作用的因子。其中，土地利用度∩坡度（0.978）、人口密度∩坡度（1.000）、坡度∩高程（0.983）、坡度∩一产GDP（0.994）呈现非线性增强，单因子影响力最小的因素坡度在与其他因子的交互作用下，对耕地缺水的影响都有着明显的增强；社会经济因素中单因子解释力最弱的牲畜密度，在与自然因子的交互作用中，解释力均呈现相互增强或非线性增强（表5）。探测结果表明多因子交互作用的影响并非简单的叠加过程，而是相互增强或非线性增强的结果，也说明内蒙古区域耕地缺水的空间分异的结果不是由单一因子构成的，而是多种因子相互作用形成的。

表5 交互作用结果

	蒸发量	土地利用度	牲畜密度	人口密度	坡度	垦殖率	年均温	年降水	NDVI	高程	一产GDP
蒸发量	0.791										
土地利用度	0.827	0.533									
牲畜密度	0.839	0.806	0.635								
人口密度	0.912	0.894	0.895	0.640							
坡度	0.970	0.978	0.995	1.000	0.555						
垦殖率	0.999	0.964	0.963	0.935	0.878	0.719					
年均温	0.971	0.993	0.949	0.971	0.986	0.963	0.775				
年降水	0.973	0.995	0.997	0.854	0.993	0.989	0.990	0.696			
NDVI	0.797	0.827	0.817	0.912	0.993	0.996	0.950	0.783	0.697		

高程	0.821	0.829	0.836	0.769	0.983	0.980	0.983	0.829	0.821	0.631
一产 GDP	0.978	0.969	0.973	0.962	0.994	0.955	0.968	0.908	0.942	1.000 0.717

3 讨论

3.1 自然因子主导耕地缺水时空分布

在本研究中的因子解释力表明,自然因子对内蒙古耕地缺水的影响力较大。其中,蒸发量是自然因子中影响耕地缺水的最主要气候因素,年均温仅次于蒸发量对耕地缺水的影响,温度升高也促进了蒸发能力的提升,这与刘彩虹等发现黄河源区流量的变化与降水量、气温及蒸发的变化相关关系显著结果相一致^[24]。在 2000—2018 年间蒸发量和年降水的解释力都有不同程度增强,而年均温的解释力却出现明显波动且呈现下降趋势,这可能与过去 50 年我国北方平均气温增速高于全球,与区域相近时期的暖干化有关^[25]。地形因素(坡度、高程)对耕地缺水的影响并不明显,这是由于内蒙古地貌广阔,跨度较大所导致地形对耕地缺水的解释力一般,而地形起伏度、海拔高度是形成土地利用格局的重要驱动因素^[26],这也导致了土地利用度对研究区耕地缺水的解释力较差。

3.2 社会经济因素对耕地缺水的次要影响

随着人口逐年增多,人口密度因子对耕地缺水的影响急剧增加^[27],其影响率从 2000 年的 19.09%增至 2018 年的 70.56%。黄忠伟等人也通过研究表明,以农业取水为主的人类取水是导致全球 61%的人口面临水资源短缺加剧的主要原因^[28]。内蒙古虽地域辽阔,但耕地面积有限,90 年代以来,耕地每年以 40 多万 hm^2 的速度减少,同时内蒙古自治区耕地利用率低,多为一年一熟制^[29],人们对粮食的需求不断加大,导致一产 GDP 成为社会经济因素中对耕地缺水影响最大的因子;草地作为内蒙古主要土地类型,借助地理优势,人们大多以牲畜放牧作为主要经济来源。过度放牧等人类干扰活动是目前干旱、半干旱区草原退化的重要原因之一^[30],人类放牧活动在固有草场超负荷进行,不仅加速草场的退化,还导致牲畜密度的增大^[31],因此牲畜密度对研究区的影响也较大。

3.3 自然与社会因子对耕地缺水的交互作用

通过地理探测器中的交互作用探测发现自然因子与社会经济因子的交互作用对耕地缺水的影响相较单因子的影响更大。近年来,随着经济的迅速发展和人类活动增多,社会经济因素对耕地缺水的影响逐渐加大,而社会经济因素在与自然因素形成交互作用后对耕地缺水的解释力亦变得更为复杂。本研究中所有影响因子任意两者的交互作用对研究区耕地缺水的影响都不是独立的,即便是解释力最弱的坡度因子,在与其他因子交互作用下,对耕地缺水的影响力都有明显增强。因此,自 2005 年来地方政府采取一系列水土保持、生态恢复政策耕地灌溉策略等以改善耕地缺水情况。如巴彦淖尔市为了保持良好的生态环境采取“大部分农业生产地周围无工业污染源”的措施^[32],使得近年来巴彦淖尔市耕地缺水现象有了很大缓解。乌海市也通过提出煤炭行业的发展和治理、建设绿色生态景观及城乡一体化绿色生态网络极大改善了耕地水资源短缺情况^[33,34]。

4 结论

通过对 2000—2018 年内蒙古耕地水资源短缺(AWSI)时空变化特征分析以及探索气候、植被、土壤、地形及社会经济等多种因素对 AWSI 空间分异的影响差异,得出主要结论如下:

(1) 2000—2018 年间,内蒙古 AWSI 在空间上呈现东、中部地区增加,西部减少,整体呈增加趋势。AWSI 增加区域面积达研究区总面积 82% 以上,多为人口聚集地或自然条件

差的区域, 少部分盟市如乌海市和巴彦淖尔市在减少工业活动、重视生态环境后AWSI有所下降。但目前研究区AWSI整体上依然处于增加阶段, 情况仍很严峻, 未来应注重减少工业用水、建设绿色生态景观等。

(2) 自然因子是影响内蒙古耕地水资源短缺的主导因子。蒸发量、年均温和年降水是与耕地水短缺最为密切的气象因子, 影响力蒸发量>年均温>垦殖率>植被 NDVI>年降水, 均超过 0.650。蒸发量、年均温等均受全球气候变暖的影响, 因此在未来发展中应注重减少温室气体排放, 减少土地蒸发率、提高耕地水资源的循环利用等。

(3) 社会经济因子对AWSI均有较显著的影响。近年来, 社会经济因素对耕地缺水的影响逐年加大, 增加原因主要是人口骤增、粮食与肉类需求增大等所导致的水资源消耗大、资源循环利用差。一产 GDP 为影响内蒙古AWSI最主要社会经济因子。未来应在提高农作物产率、荒地开发利用等方面做出努力。

(4) 因子间的交互作用并非简单的叠加, 两因子交互作用的影响均大于单因子对耕地缺水的影响, 且均呈现双因子增强或非线性增强的关系。即使如牲畜密度影响力最小的社会经济因子, 在与自然因子的交互作用下, 对内蒙古AWSI的影响都有明显的增强。内蒙古耕地缺水的现状, 不是单因子作用的结果, 而是多因子共同作用下产生的增强关系造成的。

参考文献

- [1] 邱敏, 何灏, 曹银贵, 等. 基于产权效应的耕地保护决策行为分析. 中国农业资源与区划, 2021, 1-14[2021-09-24].
- [2] 曹冲, 夏咏, 丁晨晨. 虚拟耕地资源与农业经济增长:作用机理及贡献份额研究. 长江流域资源与环境, 2020, 29(12): 2816-2826.
- [3] 田春, 李世平. 近年来我国耕地生态保护与经济补偿初探. 中国特色社会主义研究, 2010, (06): 74-77.
- [4] 孟丽红, 丁之勇, 李成阳, 等. 区域水资源代谢效率时空变化及驱动因素. 水利水电科技进展, 2021, 41(03): 20-26.
- [5] 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. 科学通报, 2019, 64(18): 1953-1966.
- [6] 钱龙霞, 张韧, 王红瑞, 等. 基于 MEP 和 DEA 的水资源短缺风险损失模型及其应用. 水利学报, 2015, 46(10): 1199-1206.
- [7] Lei C, Chang J, Wang Y, et al. Disclosing the future food security risk of China based on crop production and water scarcity under diverse socioeconomic and climate scenarios. Science of The Total Environment. 2021, 790: 148110.
- [8] 蒋大林, 曹晓峰, 匡鸿海, 等. 生态保护红线及其划定关键问题浅析. 资源科学, 2015, 37(09): 1755-1764.
- [9] 于水, 陈迪桃, 黄法融, 等. 中亚农业水资源脆弱性空间格局及分区研究. 中国农业资源与区划, 2020, 41(04): 11-20.
- [10] Falkenmark, M., Lundqvist, J., Widstrand, C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. Natural Resources Forum, 1989, 13(4): 258-267.
- [11] Raskin, P., Gleick, P., Kirshen, P., et al. Water Futures: Assessment of Long-Range Patterns and Problems. Comprehensive Assessment of the Freshwater Resources of the World. Stockholm Environment Institute, Stockholm, Sweden. 1997.
- [12] Egan, M. The water footprint assessment manual. Setting the global standard. Social and Environmental Accountability Journal, 2011, 31(2): 181-182.
- [13] 操信春, 刘喆, 吴梦洋, 等. 水足迹分析中国耕地水资源短缺时空格局及驱动机制. 农业工程学报, 2019, 35(18): 94-100.
- [14] 韩宇平, 李新生, 黄会平, 等. 京津冀作物水足迹时空分布特征及影响因子分析. 南水北调与水利科技, 2018, 16(04): 26-34.
- [15] 冯变变. 基于水足迹的山西省农业水资源压力评价及其驱动力分析. 山西师范大学, 2018.
- [16] 孙治娟, 谢世友. 基于地理探测器的云南省净初级生产力时空演变及因子探测. 生态学杂志, 2021, 1-16[2021-09-24].
- [17] Wang Y, Meng F, Luo M. Quantitative assessment of the dynamics and attribution of arable land water scarcity for arid and semiarid areas based on water footprint framework: the Inner Mongolia case. Water Supply, 2021, ws2021263.
- [18] Smith, M., Kivumbi D., Heng L. Use of the FAO CROPWAT model in deficit irrigation studies. Deficit irrigation practices, 2002.

- [19] Cao X, Ren J, Wu M, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 1-8.
- [20] Cao X, Shao G, Wang X, et al. Generalized water efficiency and strategic implications for food security and water management: A case study of grain production in China. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 14-21.
- [21] 张思源, 聂莹, 张海燕, 等. 基于地理探测器的内蒙古植被 NDVI 时空变化与驱动力分析. 草地学报, 2020, 28(05): 1460-1472.
- [22] 陈宽, 杨晨晨, 白力嘎, 等. 基于地理探测器的内蒙古自然和人为因素对植被 NDVI 变化的影响. 生态学报, 2021, 41(12): 4963-4975.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [24] 刘彩红, 朱西德, 白彦芳. 近 50 年来黄河源区流量对气候变化的响应及其未来变化趋势预测. 资源科学, 2011, 33(07): 1236-1241.
- [25] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. 气候与环境研究, 2005, 4: 791-798.
- [26] 徐广才, 康慕谊, 李亚飞. 锡林郭勒盟土地利用变化及驱动力分析. 资源科学, 2011, 33(04): 690-697.
- [27] 柴洋洋. 内蒙古自治区人口分布时空变化特征及其影响因素研究. 内蒙古大学, 2020.
- [28] Huang Z, Yuan X, Liu X. The key drivers for the changes in global water scarcity: Water withdrawal versus water availability. Journal of Hydrology, 2021, 601: 126658.
- [29] 周伟, 杨改河, 陈勇. 内蒙古自治区耕地人口承载力现状与发展趋势分析. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 04: 199-202.
- [30] 李月臣. 基于遥感与 BPNN-CA 模型的草场保护区模拟——以锡林浩特温带典型草原为例. 资源科学, 2008(04): 634-641.
- [31] 郭彩霞, 赵东升, 郑度, 等. 放牧对内蒙古草原植被群落特征的影响(英文). 资源与生态学报(英文版), 2021, 12(03): 319-331.
- [32] 张学军, 胡晓玲, 王敏. 巴彦淖尔市发展生态农业的思考. 内蒙古民族大学学报, 2010, 16(06): 60-61.
- [33] 翟孟源, 徐新良, 江东, 等. 1979~2010 年乌海市煤矿开采对生态环境影响的遥感监测. 遥感技术与应用, 2012, 27(06): 933-940.
- [34] 谷康, 曹静怡. 城乡一体化绿地生态网络规划初探——以乌海市为例. 西北林学院学报, 2010, 25(01): 175-180.

SPATIO-TEMPORAL CHANGE CHARACTERISTICS AND DRIVING FACTORS OF CULTIVATED LAND WATER SHORTAGE IN INNER MONGOLIA BASED ON THE GEOGRAPHIC DETECTOR MODEL

Cui Chenxi^{1,2}, Meng Fanhao^{1,2,3,*}, Luo Min^{1,2}, Wang Yuanyuan^{1,2}, Sa Chula^{1,2}, Bao Yuhai^{1,2}

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing and Geographic Information System, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 3. Inner Mongolia Autonomous Region Land Use and Renovation Engineering Technology Research Center, Hohhot 010022, China)

Abstract Clarifying the spatiotemporal characteristics and driving factors of water scarcity for arable land in arid and semi-arid regions is the primary prerequisite for achieving sustainable water resources utilization, and is of great significance for ensuring regional or national food security and ecological health. By taking Inner Mongolia as a study area, the Arable Land Water Scarcity Index (*AWSI*) was constructed to analyze the spatiotemporal

patterns and changing characteristics of the *AWSI* in Inner Mongolia from 2000 to 2018 based on the water footprint theory. In addition, the impacts of climate, vegetation, topography, population density, and other factors on *AWSI* were further revealed quantitatively by using geographic detector model. The results show that: (i) the *AWSI* in Inner Mongolia is generally high in the west and low in the east, and the water scarcity pressure on arable land is higher in the west. The *AWSI* in Inner Mongolia shows an increasing trend from 2000 to 2018, accounting for more than 82% of the total area, and the increasing area mainly locates in the eastern and central regions. (ii) The results of factor detection reveal that natural factors, such as evapotranspiration and temperature generally determine the spatial pattern of water scarcity on arable land in Inner Mongolia, and their influences are significantly greater than those from socio-economic factors (settlement rate, population density, etc.), but the influences of socio-economic factors exhibit a rising trend during 2000-2018. (iii) Among the natural factors, climatic factors, mainly including evapotranspiration, mean annual temperature and precipitation, have 19 sets of significant differences in the ecological surveys and dominate the influencing factors. Under the interaction of socio-economic factors and natural factors, the influences show mutual or non-linear enhancement, indicating that the causes of water shortage changes on arable land in Inner Mongolia become more complex. Due to the uneven spatial distribution of agricultural water shortage and the intensification of the conflict between supply and demand, to increase water-saving facilities and adjust the cropping structure become an important issue for the sustainable use of agricultural water resources in Inner Mongolia in the future.

Keywords arable land water; spatio-temporal variation; geographic detector; natural factors; socio-economic factors; Inner Mongolia