

# 黄淮海平原灌溉水量变化特征及其与气象干旱的关系

陈征<sup>1</sup>, 王文杰<sup>1</sup>, 蒋卫国<sup>2</sup>, 贾凯<sup>2</sup>, 陈坤<sup>1</sup>

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 以黄淮海平原为研究区, 以 WaterGAP 用水量模型的灌溉耗水量与取水量数据、scPDSI 数据为基础, 探讨了黄淮海平原灌溉用水量变化特征及其与气象干旱的关系。研究表明: 黄淮海平原耗水量约占取水量的 1/3, 其中河北南部、河南和山东等地区用水量均高于其他地区, 耕地集中分布区灌溉用水量明显高于其他地区, 2003—2014 年灌溉取水量呈增加趋势, 约 37 mm/月; 黄淮海平原气象条件趋于干旱, 其中 2006—2014 年干旱连续多发, scPDSI 与灌溉取水量距平值大于 0 的单元数间具有显著的非线性相关关系 ( $R^2=0.60$ ), 其中 8-12 月二者相关关系较为显著; 气象干旱是黄淮海平原灌溉用水量增加的重要原因, 在气象干旱和农业灌溉的共同影响下, 研究区水储量亏损量持续增加。

**关键词:** 黄淮海平原; 灌溉用水量; 气象干旱; 水储量亏损

灌溉是影响陆地水储量变化的重要因素之一, 气象干旱使灌溉用水量显著增加<sup>[1]</sup>。我国黄淮海平原的农业灌溉对地下水依赖程度较高, 地下水灌溉成为保证农业生产的基本条件和永久基本农田建设不可缺少的保障条件<sup>[2]</sup>。黄淮海平原作为我国粮食主产区和农业灌溉区, 探讨其农业灌溉用水量时空变化特征及其与气象干旱的响应规律, 对增强水资源紧缺地区的水资源保护和农业可持续发展具有重要意义。

灌溉用水量数据一般以区域农村统计年鉴、水利统计年鉴和水资源公报等统计资料为基础获取, 在此基础上进行不同空间尺度上的时空变化分析<sup>[3]</sup>。因此农业用水量统计数据的真实性和准确性对农业灌溉用水分析至关重要。但由于农业用水情况较为复杂, 统计难度较大, 我国农业用水量统计工作面临诸多问题<sup>[4]</sup>。水文模型模拟是获取灌溉用水量的另一种方法。SWAT 模型是一种分布式水文模型, 具有自动灌溉模块可用于推求作物灌溉用水量<sup>[5]</sup>, 在灌区水循环等方面已有诸多应用。崔远来等<sup>[6]</sup>对 SWAT 模型进行改进, 添加了多水源自动灌溉模块用于模拟作物不同水源类型的灌水量, 并统计推求浙江省浦江通济桥水库灌区的灌溉用水量。Müller Schmieid 等<sup>[7]</sup>利用 WaterGAP 模拟了全球灌溉取水量和耗水量, 为长时间序列灌溉用水时空变化特征研究提供了新的数据。灌溉农业对地下水的高度依赖, 使得农业地下水开采量对区域年降水量变化具有较强的响应<sup>[8]</sup>。在全球气候变化的背景下, 近年来我国干旱事件频发, 对农业生产造成一定影响。目前, 基于水文气象数据的干旱指数被广泛应用于干旱监测中, 主要包括 Palmer 干旱指数 (Palm-

收稿日期: 2019-04-11; 修订日期: 2019-08-17

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503002); 国家自然科学基金项目 (41571077); 国家自然科学基金项目 (41731286)

作者简介: 陈征 (1988-), 女, 河南商丘人, 博士, 助理研究员, 研究方向为水文遥感应用。

E-mail: lubyn@126.com

通讯作者: 王文杰 (1970-), 男, 湖南湘潭人, 博士, 研究员, 研究方向为区域生态环境评价。

E-mail: wangwj@craes.org.cn

er Drought Severity Index)、标准降雨指数SPI (Standardized Precipitation Index)、标准降水蒸散指数SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) 和自矫正PDSI (scPDSI) 等。研究表明scPDSI较少受地域约束, 具有较好的空间可比较性, 且在中国地区的适用性较好<sup>[9-11]</sup>。

本文以黄淮海平原为研究区, 以WaterGAP模拟灌溉取水量和耗水量表示灌溉用水量为基础, 分析2003—2014年黄淮海平原农业灌溉用水量时空变化特征, 结合scPDSI干旱指数, 分析灌溉用水量变化与气象干旱的关系, 并讨论灌溉用水量变化对陆地水储量变化的影响。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

研究区包括北京市、天津市、河北省、山东省和河南省5个省市(图1)。该区域位于我国东部, 总面积约53.66万km<sup>2</sup>, 其中, 北部和西部边缘为山区, 中东部为平原区, 约占整个研究区面积的53%。研究区属温带季风气候, 全年积温约4500℃, 年降水量600~800mm<sup>[12]</sup>。该区域主要农作物包括夏玉米和冬小麦, 属两年三熟制区。由于降水时空分布不均, 作物生长期水分缺乏, 因此人工灌溉是保证该地区农作物正常生长的有效方式, 其中冬小麦主要灌溉期为10月中旬至次年4月<sup>[13]</sup>。该地区农业灌溉用水对地下水依赖程度较高, 地下水开采量占农业用水总量的70%以上<sup>[2,3]</sup>。

### 1.2 数据来源

本文主要数据包括WaterGAP灌溉耗水量和取水量数据、GRACE重力卫星数据以及scPDSI干旱指数数据。2003—2014年WaterGAP灌溉耗水量和取水量数据(参考文献[7])空间分辨率为0.5°×0.5°, 单位为mm/月, 其中耗水量指未流回系统、蒸发或融合入产品中的水量。GRACE重力卫星数据来源于美国德克萨斯大学的空间研究中心CSR (Center for Space Research, <http://www2.csr.utexas.edu/grace>), 空间分辨率为1°×1°, 以等效水柱高度表示, 单位mm。PDSI综合考虑了水分亏缺量和持续时间对干旱程度的影响, 为解决数据的区域适用性问题, Wells等<sup>[14]</sup>基于气象台站历史观测资料, 优化权重系数和持续因子等参数提出了scPDSI。本文收集的2003—2014年scPDSI干旱指数数据来源于英国东英格利亚大学气候研究中心CRU (Climatic Research Unit, <http://www.cru.uea.ac.uk/data>)<sup>[15]</sup>, 空间分辨率为0.5°×0.5°。利用Matlab软件将数据转换为tiff格式, 并进行裁剪, 得到研究区灌溉耗水量和取水量数据、陆地水储量数据及scPDSI干旱指数数据。

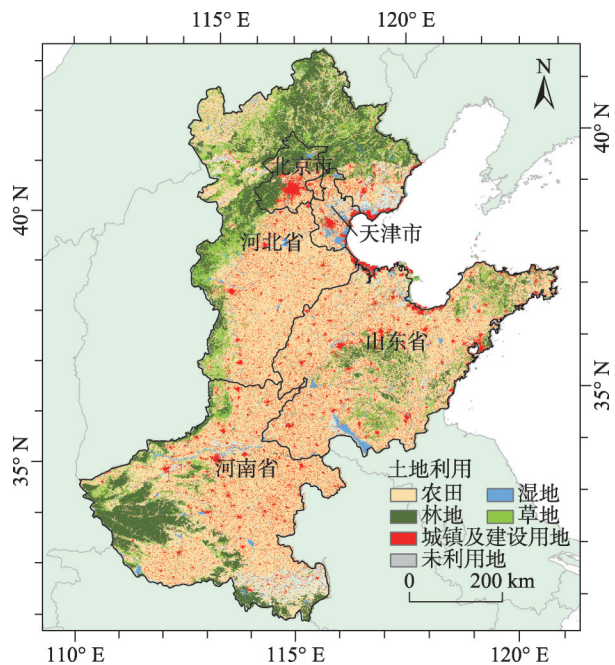


图1 2015年黄淮海平原土地利用图

Fig. 1 The land use map of the Huang-Huai-Hai Plain in 2015

### 1.3 研究方法

陆地水储量包括地表垂直剖面内所有形态的水分变化综合,能够反映陆地水资源变化的现状<sup>[16,17]</sup>。农业灌溉和气象干旱是影响陆地水储量变化的重要因素。为了讨论灌溉用水量变化对陆地水储量的影响,本文利用GRACE数据获取陆地水储量变化数据,并计算得到水储量亏损量,计算原理如下<sup>[18]</sup>:

$$WSD_{i,j} = TWSA_{i,j} - \overline{TWSA_j}$$

式中:  $WSD_{i,j}$  为  $i$  年  $j$  月的水储量亏损量 (mm);  $TWSA_{i,j}$  为  $i$  年  $j$  月陆地水储量变化 (mm);  $\overline{TWSA_j}$  为 2003—2014 年  $j$  月陆地水储量变化平均值 (mm)。若  $WSD_{i,j} < 0$ , 则陆地水储量呈亏损状态; 若  $WSD_{i,j} > 0$ , 则陆地水储量呈盈余状态。

## 2 研究结果

### 2.1 黄淮海平原灌溉取水量与耗水量变化特征分析

本文以 WaterGAP 模型模拟数据和空间统计方法分析黄淮海平原灌溉取水量和耗水量时空变化特征。灌溉耗水量是取水量的一部分,统计结果显示,黄淮海平原平均灌溉耗水量约占灌溉取水量的 1/3 且具有相似的空间分布特征 (图 2), 黄淮海平原灌溉取水量和耗水量呈中部高、北部低,平原地区高、山区低的空间分布特征。由研究区土地利用空间分布图 (图 1) 看出,耕地集中分布区的取水量和耗水量明显较高。

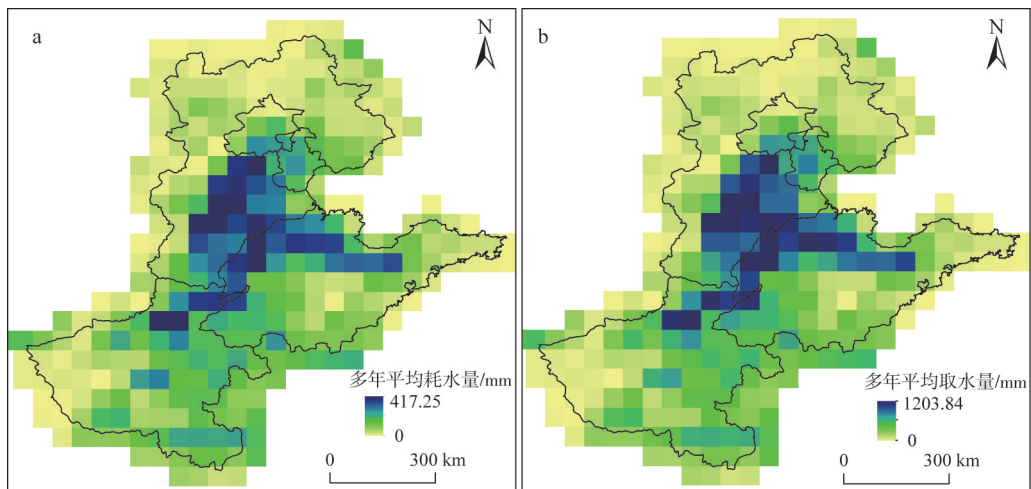


图2 2003—2014年黄淮海平原平均灌溉耗水量和取水量空间分布

Fig. 2 Mean irrigation water withdrawals and consumptions in Huang-Huai-Hai Plain from 2003-2014

为了更好地表示取水量和耗水量的时空变化特征,本文计算了2003—2014年耗水量和取水的距平值 (图 3), 2003—2014 年耗水量和取水量距平值、最大值以及距平值大于 0 的单元数 (共 321 个单元) 均呈增加趋势,由此可见,黄淮海地区近年来灌溉用水量及用水强度有所增加。

根据灌溉取水量和耗水量距平变化范围,将灌溉取水量和耗水量分别划分为 4 个等级,如表 1 所示。由 2003—2014 年灌溉取水量和耗水量空间分布变化图 (图 4、图 5) 可以看出,灌溉取水量和耗水量具有显著的空间异质性且二者具有相似的空间分布特征。从

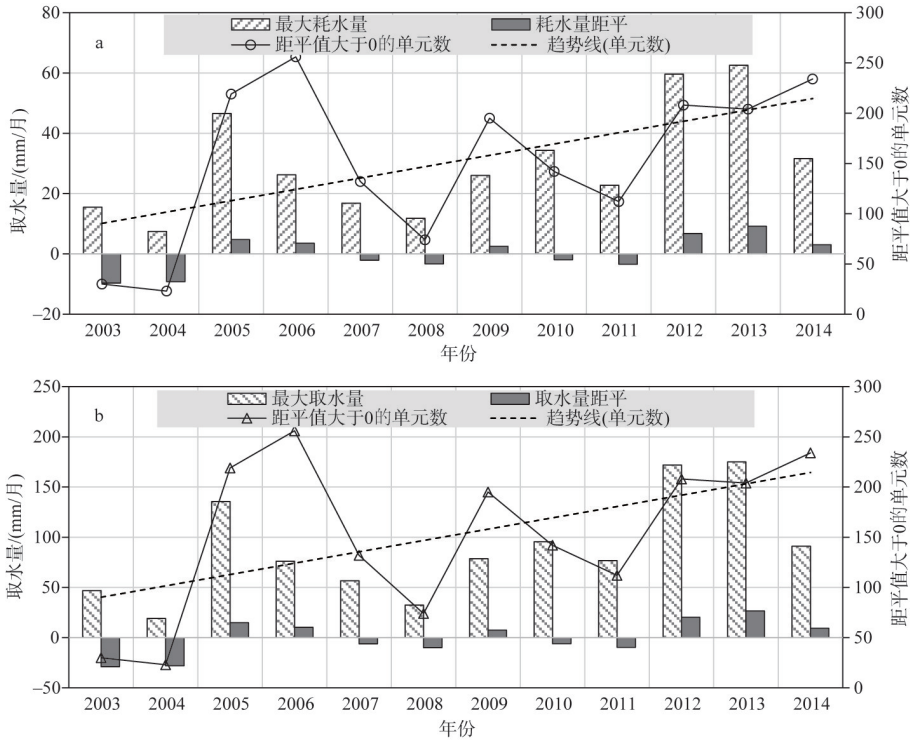


图3 2003—2014年黄淮海平原取水量和耗水量变化趋势

Fig. 3 Trend of irrigation water withdrawals and consumptions in Huang-Huai-Hai Plain from 2003-2014

表1 灌溉耗水量和取水量等级划分

Table 1 The classification of irrigation water withdrawals and consumptions

取水量距平范围	灌溉取水量等级	耗水量距平范围	灌溉耗水量等级
$WW \leq -30$	少量取水	$WC \leq -10$	低度耗水
$-30 < WW \leq 0$	中少量取水	$-10 < WC \leq 0$	中低度耗水
$0 < WW \leq 30$	中量取水	$0 < WC \leq 10$	中高度耗水
$WW > 30$	大量取水	$WC > 10$	高度耗水

地形特征看，平原地区耗水量和取水量变化较为明显，山区变化不大，2004年取水量和耗水量最少，尤其是中部平原地区。2003—2014年黄淮海地区大量取水面积和高度耗水量面积均显著增加，少量取水和低度耗水面积显著减少，尤其是南部地区取水量和耗水量变化最为明显，在2012年、2013年大量取水面积和高度耗水量面积均达到最大值。

2.2 黄淮海平原灌溉用水量与气象干旱的关系分析

本文利用scPDSI分析了2003—2014年黄淮海平原气象干旱变化(图6)，2003—2014年黄淮海平原scPDSI干旱指数呈减少趋势，2005年10月至2014年12月干旱事件频发(scPDSI<-1)且持续时间较长。由此可见，2003—2014年黄淮海平原气象条件趋于干旱。

气象因素是影响农业灌溉用水量的重要因素，本文分析了灌溉取水量对气象干旱的响应关系，以灌溉取水量距平值大于0的单元数表示取水量增加面积。灌溉取水量距平值为当月灌溉取水量相对于本月多年平均值的差。如图7所示，灌溉取水量距平值大于0的单元数与scPDSI干旱指数呈显著的非线性相关关系( $R^2=0.60, a=0.05$ )，取水量增加

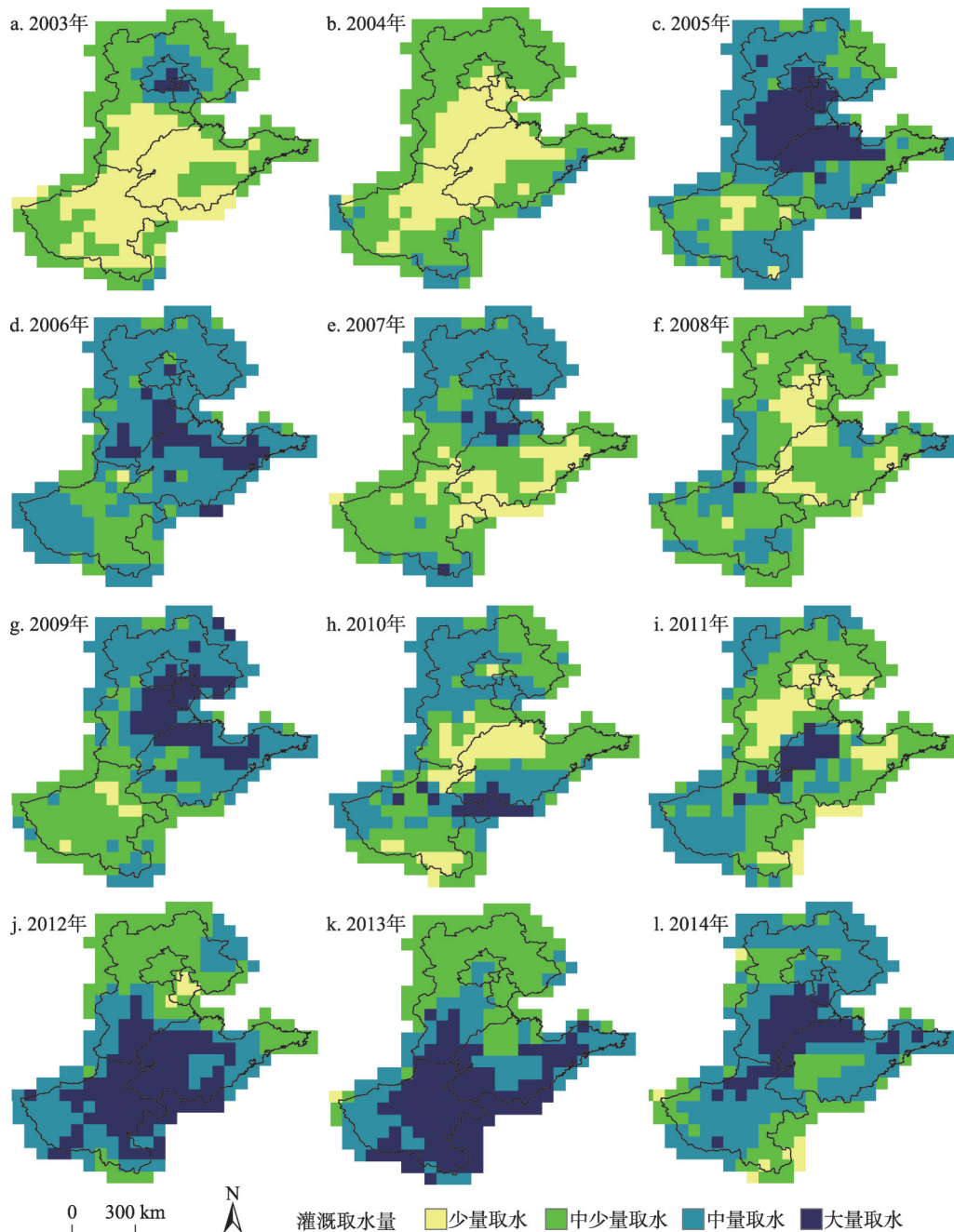


图4 2003—2014年黄淮海平原灌溉取水水量空间分布变化

Fig. 4 Spatial change of irrigation water withdrawals in Huang-Huai-Hai Plain during 2003-2014

的面积随气象干旱程度增加而增加。由此说明气象干旱能够导致灌溉取水水量显著增加，地下水开采是应对干旱事件的主要灌溉方式。

黄淮海平原农作物以冬小麦和夏玉米为主，冬小麦的主要灌溉期为10月中旬到次年4月，夏玉米的主要灌溉期为6-8月。因农作物播种阶段和生长期不同阶段所需水量不同，因此不同时期气象干旱事件对农业灌溉用水量的影响程度不同。通过灌溉取水水量距

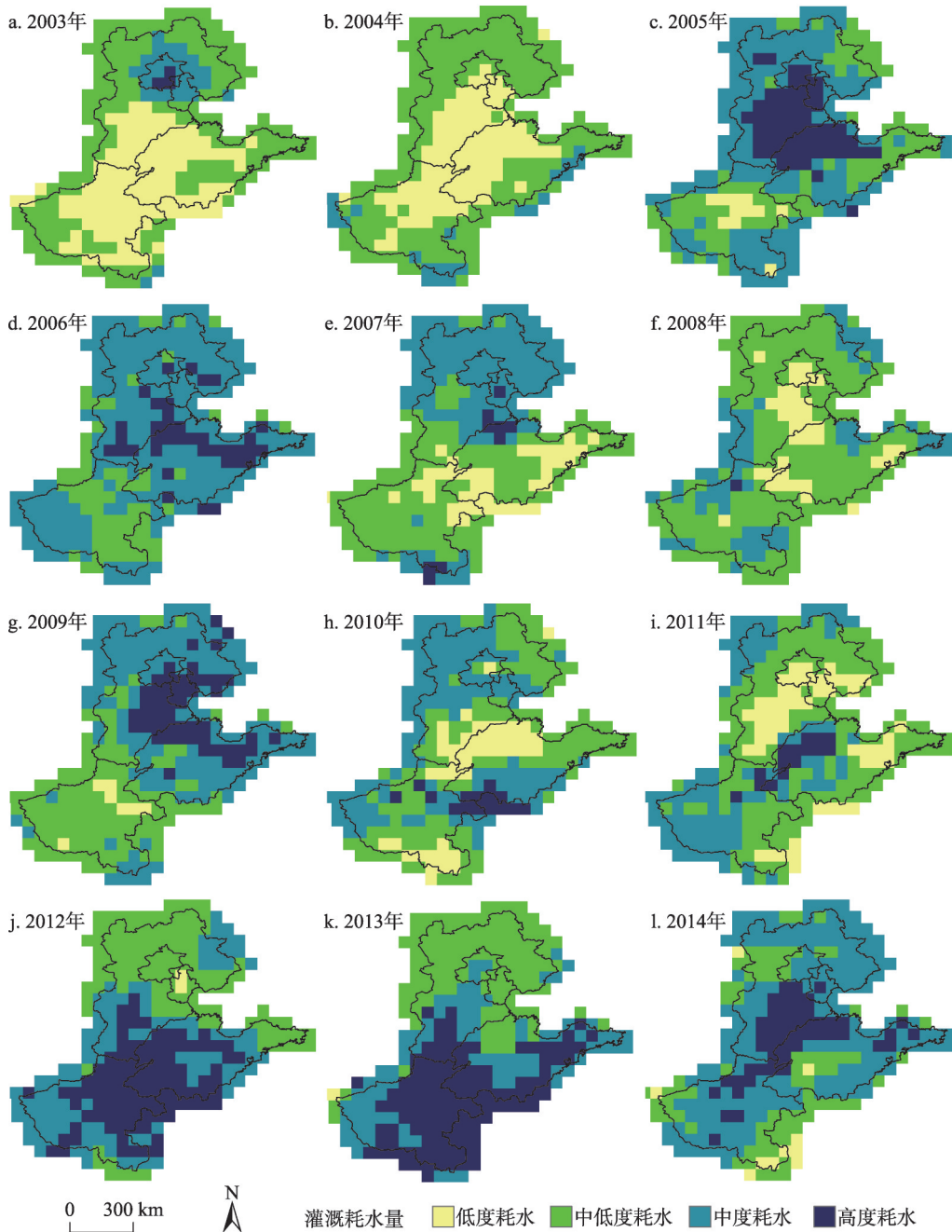


图5 2003—2014年黄淮海平原灌溉耗水量空间分布变化

Fig. 5 Spatial change of irrigation water consumptions in Huang-Huai-Hai Plain during 2003-2014

平值大于0的单元数与scPDSI的关系表示干旱对灌溉用水量的影响。如图8所示，灌溉取水量增加的单元数与scPDSI均呈负相关关系，其中8-12月灌溉取水量增加的单元数与scPDSI呈显著的负相关关系 ( $r>0.70$ )，1-7月二者关系不显著。

由冬小麦和夏玉米的主要灌溉期可知，夏玉米灌溉期主要在夏季，雨水较为充沛，且玉米耐旱性较强，因此一般情况下灌溉需水量较小。但若降水量低于正常值，则需要人

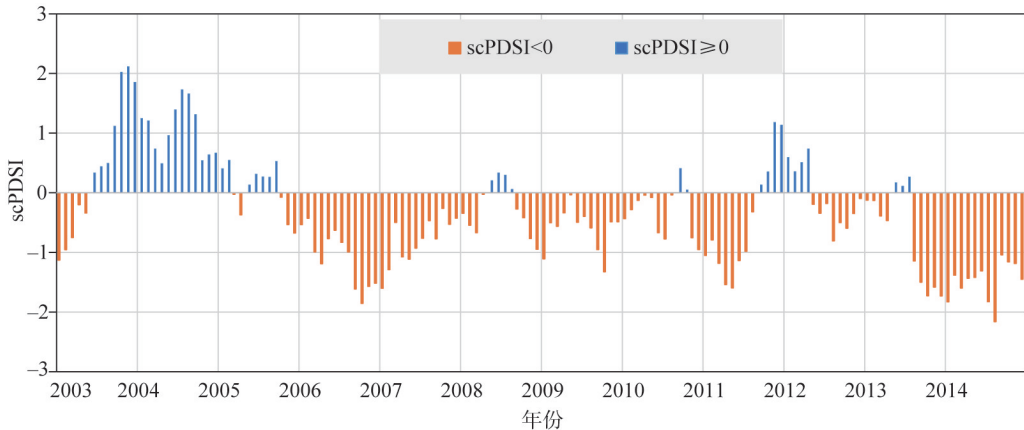


图6 2003—2014年scPDSI变化

Fig. 6 Temporal change of scPDSI from 2003-2014

工灌溉, 因此对于旱具有显著的相关关系。冬小麦灌溉期主要是秋季到次年春季, 降水相对较少, 因此灌溉需水量较大。10月一般为冬小麦生长关键时期, 若降水量明显偏低, 则人工灌溉用水量会显著增加, 因此该时期灌溉用水量对于旱具有显著的相关关系。

### 3 结论与讨论

#### 3.1 讨论

由灌溉取水量与scPDSI干旱指数时间变化特征以及图7可知, 气象干旱会导致灌溉用水量增加, 主要原因是由于气象干旱导致自然降水减少, 为了保证农作物正常生长, 满足农作物生长用水, 农业灌溉用水量增加。从气象干旱长期变化趋势看, 黄淮海平原地区干旱持续时间较长, 干旱事件频繁发生, 导致降水对土壤水分补给不足; 另一方面, 研究区地下水埋深不断增加, 导致地下水对土壤水分补给不足, 因此降水和地下水补给不足造成该地区灌溉用水量呈增加趋势。

陆地水储量变化是气象变化和人类活动共同作用的结果。本文基于GRACE数据计算了陆地水储量亏损量(WSD)表示水量亏损, 探讨农业灌溉和气象干旱对陆地水储量的影响。如图9所示, 2003—2014年黄淮海平原陆地水储量亏损量呈增加趋势, 2009—2014年陆地水储量基本呈亏损状态。结合scPDSI指数变化情况(图6)可知, 水储量亏损量与气象干旱指数具有显著的正相关关系( $r=0.72$ ,  $\alpha=0.05$ )。同时, 结合图3可知, 由于该地区气象条件趋于干旱且持续时间较长, 陆地水储量(尤其是地下水储量)得不到及时补给, 同时灌溉用水量增加, 造成水储量亏损量增加。由此可知, 气象干旱促进了该地区灌溉用水量增加, 进而加剧了陆地水储量的亏损。

#### 3.2 结论

本文以WaterGAP模拟灌溉取水量和耗水量数据、scPDSI干旱指数数据和GRACE重

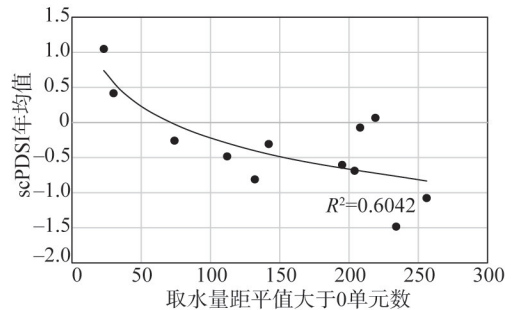


图7 黄淮海平原灌溉取水量距平均值大于0的单元数与scPDSI的关系

Fig. 7 The relationship between scPDSI and number of irrigation water withdrawals anomaly positive units in Huang-Huai-Hai Plain

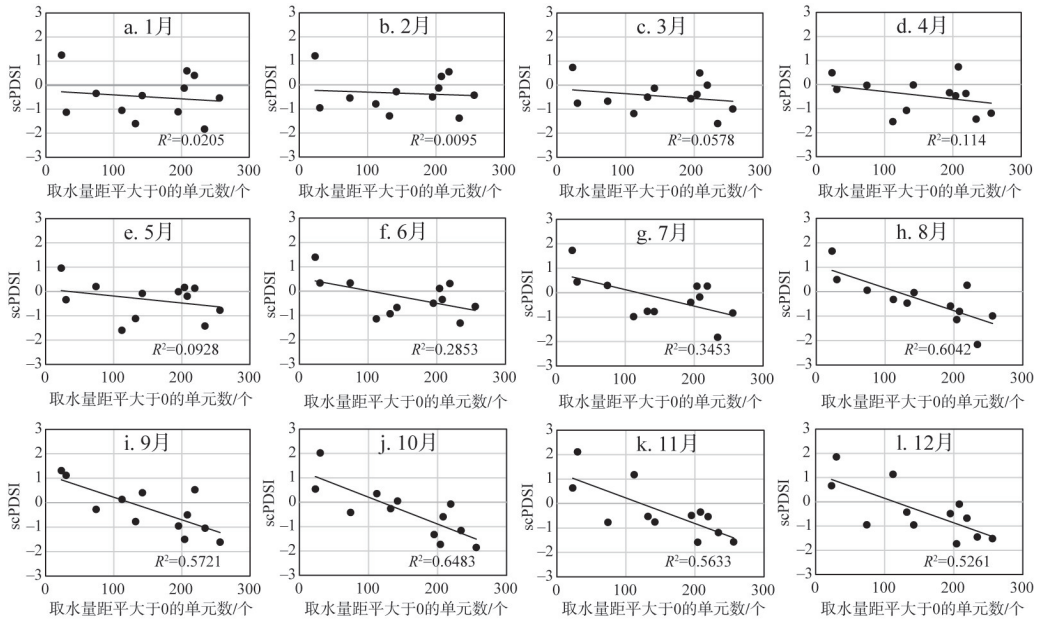


图8 1-12月黄淮海平原灌溉取水距平值大于0的单元数与scPDSI的关系

Fig. 8 The relationship between scPDSI and number of irrigation water withdrawals anomaly positive units of each month in Huang-Huai-Hai Plain

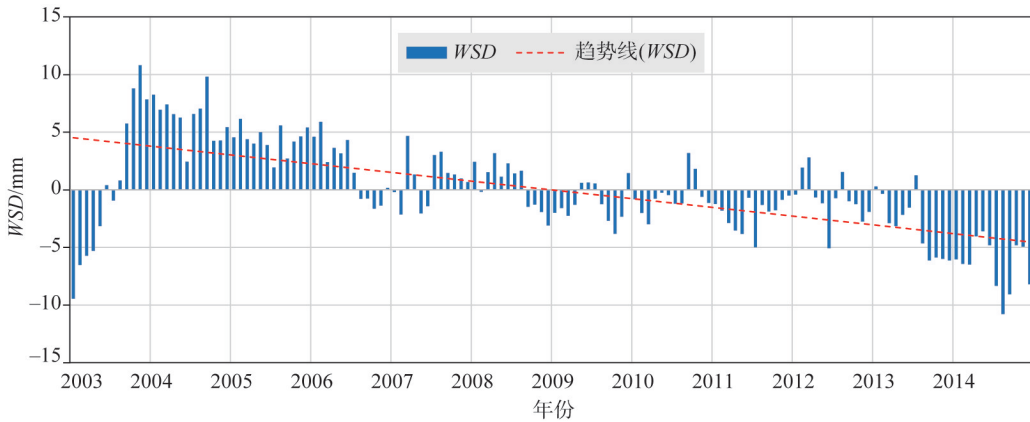


图9 2003—2014年WSD变化

Fig. 9 Temporal change of WSD from 2003-2014

力卫星数据为基础，分析了黄淮海平原2003—2014年灌溉用水量时空变化特征，并探讨了“灌溉用水量—气象干旱—水储量亏损”的关系。研究发现：(1) WaterGAP灌溉取水量和耗水量数据能够很好地反映黄淮海平原灌溉用水量的时空变化特征，2003—2014年黄淮海平原灌溉用水量呈增加趋势，且河南、山东和河北南部等地灌溉用水量增加较为明显；(2) 2003—2014年黄淮海平原气象条件趋于干旱，且与陆地水储量亏损量具有较好的相关关系 ( $r=0.72$ ,  $\alpha=0.05$ )；(3) 灌溉用水量与气象干旱具有显著的非线性相关关系 ( $R^2=0.60$ )，且8-12月农作物生长期气象干旱对灌溉用水量的影响更强，在气象干旱和灌溉取水的共同影响下，黄淮海平原陆地水储量亏损加剧。



**参考文献(References):**

- [1] ASOKA A, GLEESON T, WADA Y, et al. Relative contribution of monsoon precipitation and pumping to changes in groundwater storage in India. *Nature Geoscience*, 2017, 10, 109-117.
- [2] 田言亮, 张光辉, 王茜, 等. 黄淮海平原灌溉农业对地下水依赖程度与保障能力. *地球学报*, 2016, 37(3): 257-265. [TIAN Y L, ZHANG G H, WANG Q, et al. Groundwater safeguard capacity and dependency degree of agricultural irrigation on groundwater in the Huang-Huai-Hai Plain. *Acta Geoscientica Sinica*, 2016, 37(3): 257-265.]
- [3] 熊宇斐, 徐海量, 张广朋. 塔里木河流域农业灌溉用水量变化特征分析. *土地开发工程研究*, 2019, 4(1): 58-64. [XIONG Y F, XU H L, ZHANG G P. Changes in agricultural irrigation water consumption in the Tarim River Basin. *Land Development and Engineering Research*, 2019, 4(1): 58-64.]
- [4] 沈莹莹, 吉晔, 张绍强. 我国农业用水量统计工作面临的问题及建议. *农村水利*, 2016, (7): 50-52. [SHEN Y Y, JI Y, ZHANG S Q. Challenges faced by statistics of agricultural water use in China and advices. *China Water Resources*, 2016, (7): 50-52.]
- [5] 王中根, 刘昌明, 黄友波. SWAT 模型的原理、结构及应用研究. *地理科学进展*, 2003, 22(1): 79-86. [WANG Z G, LIU C M, HUANG Y B. The theory of SWAT model and its application in Heihe Basin. *Progress in Geography*, 2003, 22(1): 79-86.]
- [6] 崔远来, 吴迪, 王士武, 等. 基于改进 SWAT 模型的南方多水源灌区灌溉用水量模拟分析. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 94-100. [CUI Y L, WU D, WAN S W, et al. Simulation and analysis of irrigation water consumption in multi-source water irrigation districts in Southern China based on modified SWAT model. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(14): 94-100.]
- [7] MÜLLER SCHMIED H, EISNER S, FRANZ D, et al. Sensitivity of simulated global-scale freshwater fluxes and storages to input data, hydrological model structure, human water use and calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18, 3511-3538.
- [8] 张光辉, 费宇红, 刘克岩, 等. 华北平原农田区地下水开采量对降水变化响应. *水科学进展*, 2006, 17(1): 43-48. [ZHANG G H, FEI Y H, LIU K Y, et al. Regional groundwater pumpage for agriculture responding to precipitation in North China Plain. *Advances in Water Science*, 2006, 17(1): 43-48.]
- [9] 贺敏, 宋立生, 王展鹏, 等. 基于多源数据的干旱监测指数对比研究: 以西南地区为例. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1257-1269. [HE M, SONG L S, WANG Z P, et al. Evaluation of drought monitoring indices based on multi-source data in Southwest China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(7): 1257-1269.]
- [10] 王兆礼, 李军, 黄泽勤, 等. 基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析. *农业工程学报*, 2016, 32(2): 161-168. [WANG Z L, LI J, HUANG Z Q, et al. Spatiotemporal variations analysis of meteorological drought in China based on scPDSI. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(2): 161-168.]
- [11] 杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7种气象干旱指数的中国区域适应性. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(3): 337-353. [YANG Q, LI M X, ZHENG Z Y, et al. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China. *Science China Earth Sciences*, 2017, 47(3): 337-353.]
- [12] 李卓, 刘淑亮, 孙然好, 等. 黄淮海地区耕地复种指数的时空格局演变. *生态学报*, 2018, 28(12): 4454-4460. [LI Z, LIU S L, SUN R H, et al. Identifying the temporal-spatial pattern evolution of the multiple cropping index in the Huang-Huai-Hai Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4454-4460.]
- [13] 刘明, 武建军, 吕爱锋, 等. 黄淮海平原典型区冬小麦水分胁迫规律与灌溉策略. *农业工程学报*, 2010, 26(5): 40-44. [LIU M, WU J J, LYU A F, et al. Water stress of winter wheat and irrigation strategy in typical region of Huang-Huai-Hai Plain. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(5): 40-44.]
- [14] WELLS N, GODDARD S, HAYES M J. A self-calibrating palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 2004, 17: 2335-2351.
- [15] VAN DER SCHRIER G, BARICHIVICH J, BRIFFA K R, et al. A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901-2009. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118: 4025-4048.
- [16] LONG D, PAN Y, ZHOU J, et al. Global analysis of spatiotemporal variability in merged total water storage changes using multiple GRACE products and global hydrological models. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 192, 198-216.

- [17] 陈坤, 蒋卫国, 何福红, 等. 基于 GRACE 数据的中国水储量变化特征分析. 自然资源学报, 2018, 33(2): 275-286.  
[CHEN K, JIANG W G, HE F H, et al. Temporal and spatial variations of water storage changes in China with GRACE data. Journal of Natural Resources, 2018, 33(2): 275-286.]
- [18] SUN Z L, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China. Science of the Total Environment, 2018, 634: 727-738.

## The spatial and temporal variation pattern of irrigation water use and its relationship with drought in Huang-Huai-Hai Plain

CHEN Zheng<sup>1</sup>, WANG Wen-jie<sup>1</sup>, JIANG Wei-guo<sup>2</sup>, JIA Kai<sup>2</sup>, CHEN Kun<sup>1</sup>

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** This paper aims to analyze the variation pattern of irrigation water use in the Huang-Huai-Hai Plain and its relationship with drought. Based on the irrigation water consumption and withdrawal data, GRACE data and scPDSI data, the relationship between irrigation water use and drought in the Huang-Huai-Hai Plain was analyzed in this paper. The results showed that (1) irrigation water consumption accounts for about one-third of the water withdrawal. The irrigation water use in the southern part of Hebei province, Henan and Shandong province is higher than that of other regions. Irrigation water withdrawal in the Huang-Huai-Hai Plain increased from 2003 to 2014, with a rate of about 37 mm/month. (2) The meteorological condition tended to be arid, and there was a significant nonlinear correlation between scPDSI and the number of cells with positive irrigation water withdrawal anomaly ( $R^2=0.60$ ), especially from August to December. (3) The obvious decrease of precipitation led to occurrence of drought events. Therefore, irrigation water withdrawal was increased to ensure grain production. This indicates that drought is a major cause for increased irrigation water use in the Huang-Huai-Hai Plain and exacerbates the terrestrial water storage deficit.

**Keywords:** Huang-Huai-Hai Plain; irrigation water use; meteorological drought; water storage deficit