

基于 SPI 指数的白洋淀流域干旱演变特征分析

刘丛伟¹, 胡珊珊¹, 张涛², 杨展¹

(1.首都师范大学 资源环境与旅游学院 水资源安全北京实验室, 北京 100048; 2.自然资源部 国土卫星遥感应用中心, 北京 100048)

摘要:为探究白洋淀流域在气候变化背景下的干旱时空演变特征,基于 1979—2018 年 0.1°分辨率降水格点数据,采用年尺度和季节尺度的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI),结合 Mann-Kendall 趋势检验法研究了白洋淀流域干旱频次、干旱面积的时空演变特征。结果表明:(1) 研究区发生轻旱的频次最高,中旱、重旱、特旱发生的频次依次减少,春季和夏季是干旱频次发生较高的季节,但特旱主要分布在秋季和冬季。(2) 研究区年尺度下干旱程度呈不显著减缓趋势,干旱面积略有减少;春季和夏季干旱程度呈不显著增加趋势,干旱面积略有增加;秋季和冬季干旱程度呈显著减缓趋势,秋季干旱面积显著减少。(3) 轻旱和中旱在整个流域内分布广泛,下游平原区的发生频率高于上游山区,大清河山区的北部和西部以及流域的东南边缘是重旱和特旱的高发地带。综上,白洋淀流域整体呈干旱缓和趋势,但春夏季干旱情况在未来可能会加重。

关键词: SPI 指数; 时间尺度; 干旱特征; 时空分布; 白洋淀流域

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)06-0254-06

Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Baiyangdian Basin Based on SPI

LIU Congwei¹, HU Shanshan¹, ZHANG Tao², YANG Zhan¹

(1. *Beijing Laboratory of Water Resources Safety, College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China*; 2. *Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China*)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial evolution characteristics of drought in the Baiyangdian Basin, with a background of climate change, based on the 0.1° resolution precipitation grid data in the study area from 1979 to 2018, the Standardised Precipitation Index (SPI) at annual and seasonal scales and the Mann-Kendall trend test method were used to study the temporal and spatial evolution characteristics of drought frequency and drought area of the Baiyangdian Basin. The results showed that: (1) The frequency of light drought was the highest in the study area, and the frequency of moderate drought, severe drought, and extra drought was decreasing in order. Spring and summer were the seasons with higher drought frequency, extra drought was mainly distributed in autumn and winter. (2) The degree of drought in the study area showed an insignificant reduction trend at the annual scale, with the drought area being decreased slightly; the degree of drought in spring and summer showed an insignificant increasing trend, with the area of drought increase being minimal; additionally, the degree of drought in autumn and winter showed a significant slowing trend with the drought area being decreased significantly in autumn. (3) Light drought and moderate drought are widely distributed throughout the basin, and the occurrence frequency of the lower plain area is higher than that of the upper mountainous area. The northern and western parts of the Daqinghe mountainous area and the southeastern edge of the basin are areas with high incidence of severe drought, and extra drought. To conclude, the Baiyangdian watershed shows a trend of easing drought as a whole, but the drought in spring and summer may increase in the future.

收稿日期: 2021-07-26

修回日期: 2021-09-16

资助项目: 国家自然科学基金(41501027); 北京卓越青年科学家计划(BJJWZYJH01201910028032)

第一作者: 刘丛伟(1996—), 女, 北京人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。E-mail: 1724213171@qq.com

通信作者: 胡珊珊(1984—), 女, 湖北宜昌人, 博士, 副教授, 主要从事变化环境对水文过程的影响研究。E-mail: hushanshan@cnu.edu.cn

Keywords: SPI index; time scale; drought characteristics; temporal and spatial distribution; Baiyangdian Basin

干旱是世界上最主要的自然灾害之一,其发生频率高、持续时间长、影响范围广^[1],可造成水资源短缺、粮食减产与土地退化等一系列问题^[2]。IPCC 的特别报告指出,全球气温与工业化前相比约高出 1℃,气候变暖将加剧全球干旱灾害的发生频率^[3-4]。据统计,我国在 2012—2016 年由旱灾所造成的经济损失高达 2 889.7 亿元,约占全部气象灾害所造成损失的 15.6%。20 世纪 50 年代以来,白洋淀受自然因素和人类活动的影响,湿地面积萎缩,干淀事件频繁发生,严重制约了流域的社会经济发展^[5]。白洋淀流域是我国重要的淡水产品生产基地,也是海河流域大清河水系中重要的蓄水枢纽,承担着缓洪、治涝和蓄水灌溉的重要任务^[6]。此外,白洋淀流域位于雄安新区上游,是其重要的水源涵养区和生态屏障。随着雄安新区的建设,流域的人口和产业必将发生跨越式增长,因此,及时准确地开展干旱时空分布和演变规律研究,有助于科学有效地实施防旱减灾措施,保障新区的建设发展。

干旱指数是干旱监测的基础^[7],国内外学者提出了众多的干旱指数对干旱特征进行量化研究,主要包括:综合气象干旱指数(CI)^[8]、帕尔默干旱烈度指数(PDSI)^[9]、降水距平百分率指数(Pa)^[10]、广义极值干旱指数(GEV)^[11]、标准化降水蒸发散指数(SPEI)^[12]、标准化降水指数(SPI)等^[13]。其中,基于降水资料的 SPI 指数计算简单,稳定性好,具有多时间尺度和时空可比性等优势,在国内外的干旱监测中得到广泛应用^[14]。Hayes 等^[15]基于 SPI 指数对美国南部平原和西南部进行了研究,其监测干旱的结果优于 PDSI 指数;Ogunjo^[16]采用 SPI 指数分析了尼日利亚不同尺度下的干旱特征和干旱演变规律;众多研究证明了 SPI 指数在干旱监测方面具有良好的适用性和可靠性。

尽管对白洋淀流域所属海河流域的干旱相关研究很多,但有关白洋淀流域的研究较少,且多以站点数据作为研究基础。本文基于 0.1°分辨率的格点降水数据,采用 SPI 指数分析白洋淀流域在年和季节尺度下干旱的时空分布特征和变化趋势,研究结果一方面可为流域抗旱减灾和雄安新区生态保护提供理论依据,另一方面可对白洋淀流域干旱研究空白进行补足。

1 研究区概况

白洋淀流域位于海河流域中部,地跨晋、冀、京 3 省市(113°39′—116°20′E,38°23′—40°09′N),流域面积约 3.0×10^4 km²,海拔高差约 2 500 m。流域地势

整体为西北高、东南低,包括大清河山区和淀西平原两部分,其中西北部山区面积 16 536 km²,占 53%,东南部平原面积 14 700 km²,占 47%。白洋淀流域属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,四季分明,平原区年平均气温 12.7℃,山区 7.4℃。流域多年平均降水量 563.9 mm,80%的降水量集中在 7—9 月这 3 个月的汛期。受地形的影响,降水量空间差异较大,其中太行山迎风坡前降雨较大,平原和背风坡较小,流域内不同地区年降水量最大值是最小值的 3 倍^[17]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本研究所用数据包括降水格点数据和干旱灾害历史记录资料。其中计算 SPI 指数所用的数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)发布的中国区域地面气象要素驱动数据集^[18]的月值数据,包括 1979—2018 年研究区所在的 379 个格网的降水数据,时间分辨率为 3 h,水平空间分辨率为 0.1°^[19]。干旱灾害历史记录资料来源于《中国气象干旱大典(河北卷)》和《中国气象灾害年鉴》,用于验证历史阶段的干旱特征。

2.2 研究方法

(1) SPI 指数计算原理。SPI 指数是由美国学者 Mckee 等^[13]提出,可以对不同时间尺度的区域干旱进行定量化的表征^[20]。SPI 指标考虑了降水服从偏态分布的事实,对降水进行了正态标准化处理,具体计算见参考文献[21—22]。

根据 SPI 的正态分布曲线,参照国家气候中心的划分标准划分旱涝等级,确定相应的 SPI 界限值;SPI 值为 0~0.5 为无旱或正常,0.5~1 为轻微干旱,1~1.5 为中等干旱,1.5~2 为重度干旱,≥2 为极端干旱^[23]。

不同时间尺度下的 SPI 值具有不同的物理意义,其中 SPI₃反映了短期土壤的水分盈亏,与农业干旱关系密切;SPI₁₂能较清楚地反映长时期的旱涝变化规律。故此,本文选用 SPI₃和 SPI₁₂分别表征季节尺度和年尺度的干旱变化特征。

(2) 干旱频率。干旱频率 P_i 指某格点 i 有资料年份内发生干旱的年份占比^[24],计算公式如下:

$$P_i = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中: N 为某站有气象资料的年数; n 为该站发生干旱的总年数。

(3) 干旱面积比。干旱面积比 S_d 指发生干旱的

格点数在流域总格点数中的占比,计算公式如下:

$$S_d = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中: S_1 为干旱格点数; S_2 为流域总格点数。

(4) Mann-Kendall 非参数性检验。在时间序列趋势分析中,Mann-Kendall 非参数性检验法是一种已广泛使用的非参数检验方法^[25]。通过对检验的统计变量进行标准化得到统计量 Z ,若 $Z > 0$,则序列呈上升趋势;若 $Z < 0$,则序列呈下降趋势。本文中所描述的显著性检验均为 $|Z| \geq 1.96$,表示序列通过了 95% 的显著性检验。

3 结果与分析

3.1 白洋淀流域干旱频次分布特征

根据干旱等级划分标准,将计算得到的 SPI 值划分为年尺度和季节尺度,并归纳不同等级的干旱频次。从图 1 可以看出,研究区域发生轻旱的频次最高,中旱次之,其次为重旱,发生频次最少的为特旱。在年尺度上,干旱年份共有 12 a,占全部年份的 30%,1981 年、1984 年、1997 年和 2001 年达到重旱。春季干旱年份共有 16 a,占全部年份的 40%,1996 年与 2013 年达到重旱;夏季干旱年份共有 15 a,占全部年份的 37.5%,1997 年达到重旱;秋季干旱年份共有 13 a,占全部年份的 32.5%,2006 年与 2018 年达到特旱;冬季干旱年份共有 14 a,占全部年份的 35.9%,1999 年与 2012 年达到特旱。总体来看,春季和夏季干旱频次较高,冬季和秋季干旱频次较低,但是特旱集中分布在秋季和冬季。

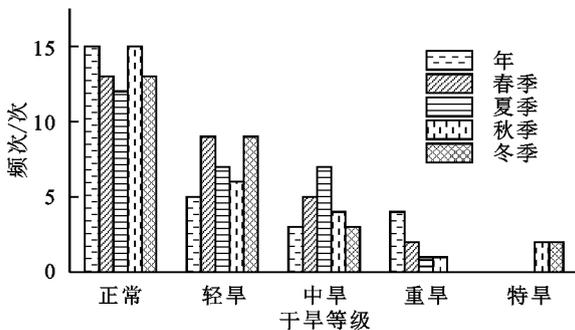


图 1 年尺度和季节尺度干旱频次分布

3.2 白洋淀流域干旱时间变化特征

图 2 为 1979—2018 年白洋淀流域年尺度和季节尺度干旱指数变化曲线,由图可知流域年、秋季和冬季干旱指数呈波动上升趋势,线性倾向率分别为 0.05/10 a,0.32/10 a,0.16/10 a;流域春季和夏季干旱指数呈下降趋势,线性倾向率均为 -0.06/10 a。采用 M-K 法对其进行显著性检验,年、春季和夏季均未通过显著性检验,秋季和冬季通过显著性检验,结

果表明 1979—2018 年白洋淀流域年尺度呈微弱的湿润趋势,春季和夏季呈弱变干趋势,秋季和冬季呈较为明显的湿润趋势。

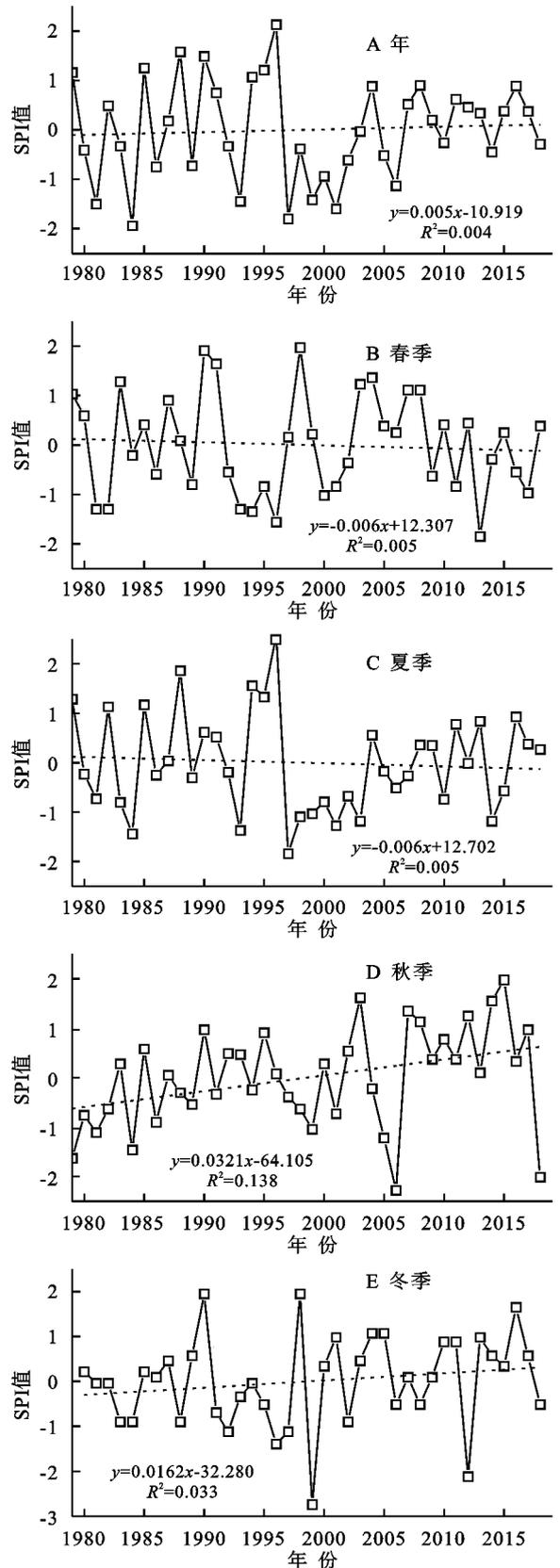


图 2 1979—2018 年白洋淀流域年尺度与季节尺度的干旱指数变化

图 3 为白洋淀流域年尺度和季节尺度干旱面积变化图。从图中数据进一步分析可知,1979—2018 年白洋淀流域年尺度干旱面积比的均值为 31.2%,春、夏、秋、冬 4 个季节的干旱面积比均值分别为 35.5%, 31.9%, 32.4%, 31.4%, 表明干旱面积在整个流域占比较高,春季流域发生干旱的面积最大,其他季节干旱发生面积相差较小。采用 M-K 法对其进行显著性检验,年尺度干旱面积呈不显著减少趋势,春旱和夏旱的面积呈不显著增加趋势,冬旱面积呈不显著减少趋势,秋旱的面积呈显著减少趋势。

3.3 白洋淀流域干旱空间分布特征

白洋淀流域年尺度干旱频率空间分布见图 4,年尺度下不同等级干旱发生频率在空间上差异较大。白洋淀流域轻旱发生频率在 2.5%~25%,大清河北部山区、淀区平原南部和东南边缘都是轻旱的高发区域;中旱发生频率在 0~22.5%,流域东北部山区向平原区过渡的丘陵区和平原区是高发地带;重旱发生频率在 0~12.5%,大清河山区北部是发生频率较高的地区;特旱发生频率在 0~2.5%,在大清河山区的西部和淀区平原南部偶有发生。总体来看,下游平原区发生轻旱和中旱的频率高于上游山区,但上游山区发生重旱和特旱的频率更高。

图 5 为白洋淀流域季节尺度下干旱频率空间分布,由图可知不同等级干旱的发生频率空间分布呈现明显的差异性。轻旱发生频率最高可达 30.8%,且在整个流域分布都较为广泛,春冬频发的区域范围大于夏秋;中旱发生频率最高可达 25.6%,在不同季节的高频分布区域具有较大差异,春季最广泛,冬季次之,其次是夏季和秋季,较高频率的地区位于大清河山区南部和淀区平原北部;重旱发生频率最高为 15.4%,秋季分布地区最广泛,频率较高的地区集中在淀区平原北部;特旱在全年发生的频率均低于 2.5%,主要出现在大清河山区西部和淀区平原南部。

4 讨论

本文结果表明白洋淀流域 1979—2018 年年尺度上呈干旱缓解趋势,季节尺度上春季和夏季呈现弱干旱趋势,秋季和冬季呈现较为明显的湿润化趋势。此前有研究表明海河流域在 1980—2017 年干旱呈缓解趋势,春末湿润化趋势显著,夏季呈干旱趋势^[26-27],其结果与本文研究得到的结论基本一致。本研究检测表明白洋淀流域在 1981 年、1984 年、1997 年和 2001 年出现了重度干旱,而《中国气象干旱大典(河北卷)》记载显示:1981 年出现春旱和秋旱,降雨比常年减少 40%,海滦河系 600 多条支流断流;1984 年河北全省

地下水显著下降,浅层地下水比 1983 年下降 1.5 m;1997 年出现全省范围特大干旱。检测年份和年鉴记载的干旱年份基本吻合,说明基于 SPI 干旱指数可以较好地反映白洋淀流域干旱年份与干旱等级。

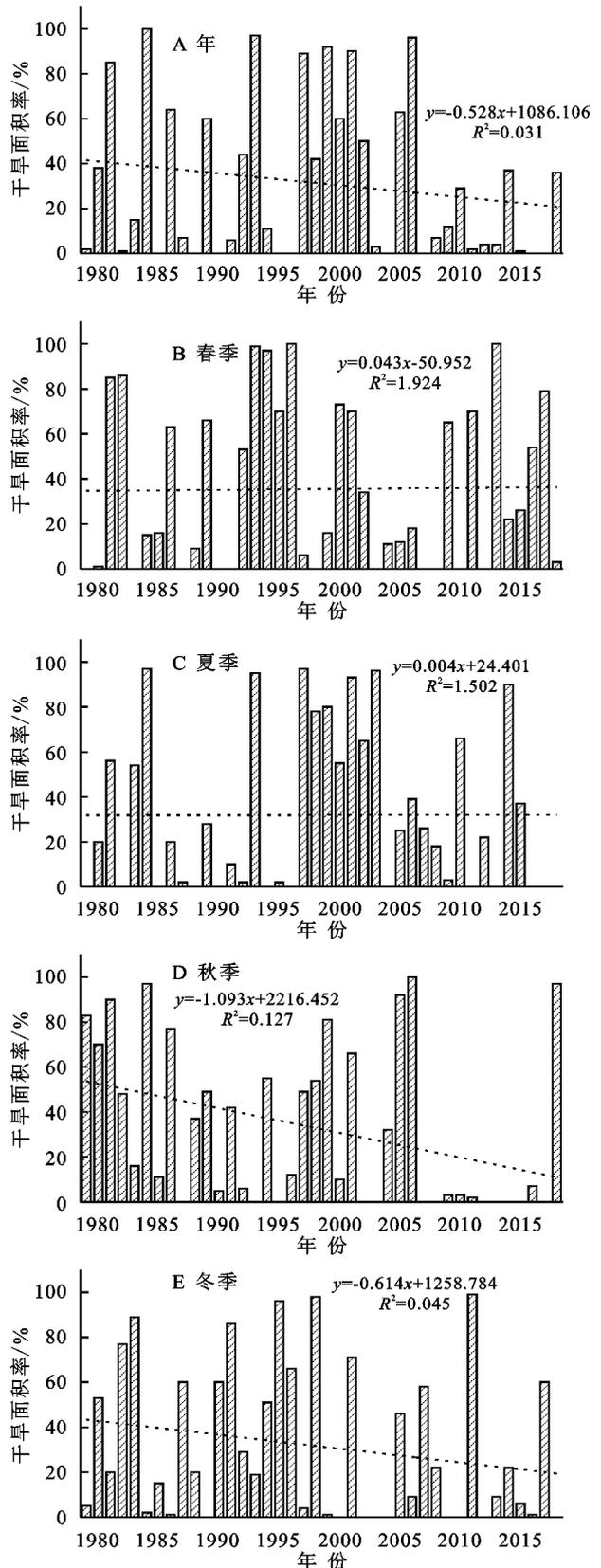


图 3 白洋淀流域年尺度和季节尺度干旱面积变化

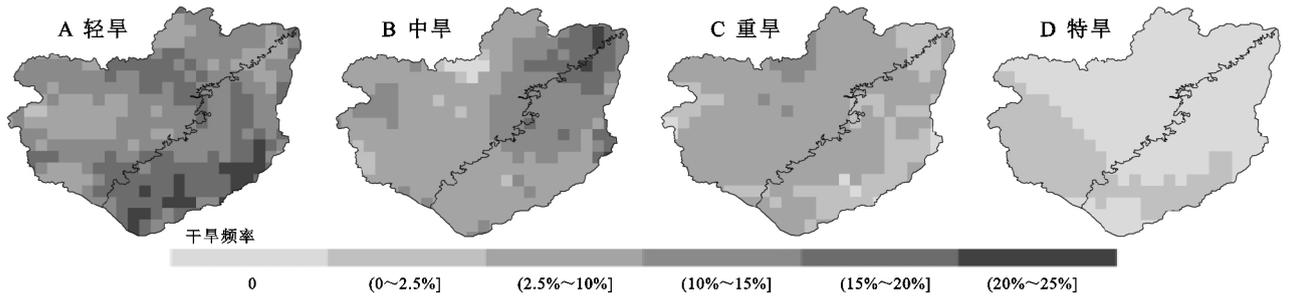


图 4 白洋淀流域年尺度干旱频率空间分布

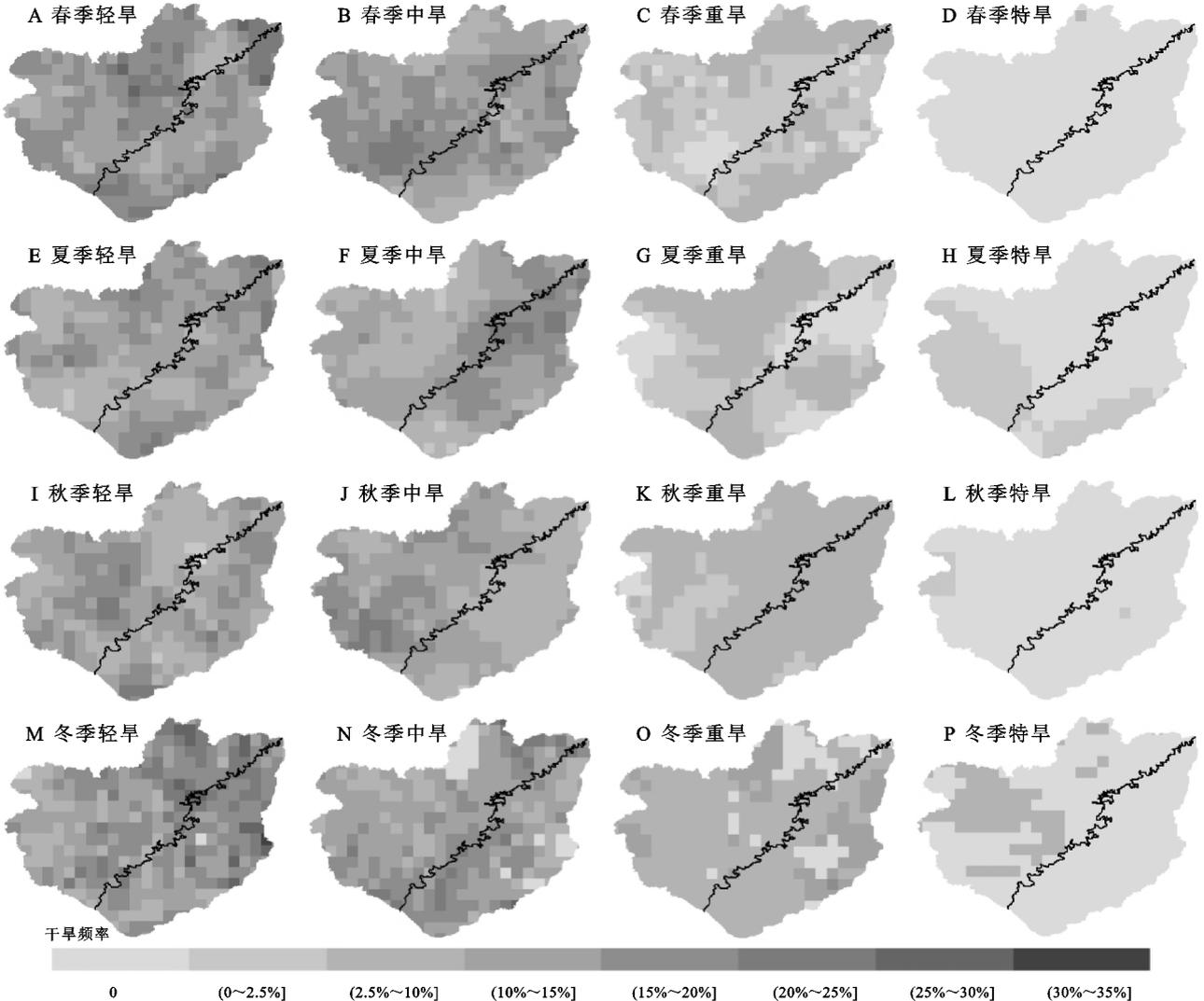


图 5 白洋淀流域季节尺度干旱频率空间分布

在季节尺度下,流域春夏季呈弱干旱趋势,秋冬季呈明显缓解趋势。分析春夏季干旱原因,一方面由于研究区位于华北平原,降雨集中分布在 7—8 月份,春季降雨量少,在蒙古大陆性气团的影响下,春季气温回升速度快,且风速较大,气候干燥,蒸发量较大^[28]。另一方面夏季研究区受蒙古高压和西太平洋副热带高压的增强及位移影响,导致水汽难以输送至流域,降水随之减少^[29]。加之近年来暖干气候逐渐发展,因此流域春、夏季干旱呈加重趋势,如 1986 年、1989—1990 年、

1992—1993 年、2007 年均出现了春夏连旱。

干旱对于白洋淀流域具有不可忽视的负面影响,由于干旱频繁发生,白洋淀在过去的几十年中,曾遭遇过数次的干涸与萎缩情况,淀区的水质和水生态趋向恶化,地下水位趋于下降^[30]。随着雄安新区的建设,流域内工业和城市用水必然会增加,干旱的频繁发生将导致地面径流减少甚至断流,会加剧地下水使用甚至超采,产生地下水漏斗等隐患危害流域内人民生命财产安全^[31]。此外,本文研究表明白洋淀流域

春夏季干旱情况趋向加重趋势,春旱对于流域内春季农作物耕种具有不利影响,而春夏连旱此种持续的大范围干旱将会影响工农业生产用水,进而成为流域内工农业的建设发展的重大阻碍。

尽管本文的研究结果显示近年来白洋淀流域的气象干旱情况呈现缓解趋势,但诸多研究表明白洋淀流域的湿地面积仍然在快速萎缩^[32],河流径流量显著减少^[33],水生态状况呈恶化趋势^[34],地下水位为多年下降状态^[35]。这说明尽管气象干旱没有明确的干旱化趋势,但是水文干旱和社会经济干旱仍旧在持续发展。因此,在研究白洋淀流域气象干旱的基础上,未来将进一步开展气象干旱向水文干旱的传播过程研究。

5 结论

(1) 研究区域发生轻旱的频次最高,其次为中旱,再后为重旱,发生频次最少的为特旱,春季和夏季干旱频次较高,冬季和秋季干旱频次较低,但是特旱集中分布在秋季和冬季。

(2) 干旱面积在整个流域占比较高,年尺度和季节尺度干旱面积占比均值均超过30%,春季流域发生干旱的面积最大;1979—2018年白洋淀流域年尺度呈微弱的湿润趋势,干旱面积呈不显著减少趋势;春季和夏季呈弱变干趋势,干旱面积不显著增加;秋季和冬季呈较为明显的湿润趋势,秋季干旱面积显著减少。

(3) 不同等级的干旱发生频率空间分布呈现明显的差异性,大清河北部山区、淀区平原南部和东南边缘是轻旱的高发区域,东北部山区向平原区过渡的丘陵区和平原区是中旱的高发地带,大清河山区北部是重旱发生频率较高的地区,特旱仅在大清河山区的西部和淀区平原南部偶有发生。

参考文献:

[1] 沈彦军,李红军,雷玉平.干旱指数应用研究综述[J].南水北调与水利科技,2013,11(4):128-133.

[2] 吴绍洪,赵东升.中国气候变化影响、风险与适应研究新进展[J].中国人口·资源与环境,2020,30(6):1-9.

[3] IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5 Degrees[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2018.

[4] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [R]. New York, USA: Cambridge University Press,2013.

[5] 白德斌,宁振平.白洋淀干涸原因浅析[J].中国防汛抗旱,2007(2):46-48.

[6] 李英华,崔保山,杨志峰.白洋淀水文特征变化对湿地生态环境的影响[J].自然资源学报,2004,19(1):62-68.

[7] 李柏贞,周广胜.干旱指标研究进展[J].生态学报,2014,34(5):1043-1052.

[8] 邹旭恺,任国玉,张强,等.基于综合气象干旱指数的中

国干旱变化趋势研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):371-378.

[9] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. Comment on “Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900—2008” by Aiguo Dai[J]. 2011,116:D19112.

[10] 卫捷,马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J].地理学报,2003,58(S1):117-124.

[11] 王澄海,王芝兰,郭毅鹏. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J].地球科学进展,2012,27(9):957-968.

[12] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.

[13] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]// Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. California, USA: American Meteorological Society, 1993.

[14] Hong W, Svoboda M D, Hayes M J, et al. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons[J]. International Journal of Climatology, 2010,27(1):65-79.

[15] Hayes M J, Svoboda M D, Wilhite D A, et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999,80(3):429-438.

[16] Ogunjo S T. Multifractal properties of meteorological drought at different time scales in a tropical location [J]. Fluctuation and Noise Letters, 2021, 20(1): 2150007.

[17] 王洁,徐宗学.白洋淀流域气温与降水量长期变化趋势及其持续性分析[J].资源科学,2009,31(9):1498-1505.

[18] 阳坤,何杰.中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)[DB/OL].国家青藏高原科学数据中心,2019. <https://data.tpdac.ac.cn/zh-hans/data>.

[19] He J, Yang K, Tang W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China [J]. Scientific Data, 2020, 7(1). DOI:10.1038/s41597-020-0369-y.

[20] 李忆平,李耀辉.气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J].干旱气象,2017,35(5):709-723.

[21] Husak G J, Michaelsen J, Funk C. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications[J]. International Journal of Climatology, 2010,27(7):935-944.

[22] 王江涛.基于华北地区气象指数 SPI 干旱时空分析[J].水土保持研究,2019,26(4):203-207.

- (*Glycine max.* (L.) Merr.) root-soil interface[J]. Soil Science Society of America Journal, 1970,34(1):154-155.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [20] White D C, Stair J O, Ringelberg D B. Quantitative comparisons of in situ microbial biodiversity by signature biomarker analysis[J]. Journal of Industrial Microbiology, 1996,17(3):185-196.
- [21] 李娇,蒋先敏,尹华军,等.不同林龄云杉人工林的根系分泌物与土壤微生物[J].应用生态学报,2014,25(2):325-332.
- [22] 李从娟,李彦,马健,等.干旱区植物根际土壤养分状况的对比研究[J].干旱区地理,2011,34(2):222-228.
- [23] 艾超,孙静文,王秀斌,等.植物根际沉积与土壤微生物关系研究进展[J].植物营养与肥料学报,2015,21(5):1343-1351.
- [24] 马祥庆,黄宝龙.人工林地力衰退研究综述[J].南京林业大学学报,1997,21(2):79-84.
- [25] 杜大俊,张秋霞,任丽红,等.马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤营养元素含量的短期影响[J].水土保持学报,2019,33(5):157-162.
- [26] 王玉哲,刘俊第,严强,等.马尾松林采伐迹地火烧黑炭对土壤活性碳氮库的影响[J].生态学报,2018,38(20):7198-7207.
- [27] 刘传和,贺涵,何秀古,等.不同连作年限菠萝园土壤差异代谢物和细菌群落结构分析[J].生物技术通报,2021,37(8):162-175.
- [28] 吴凡,李传荣,崔萍,等.不同肥力条件下的桑树根际微生物种群分析[J].生态学报,2008,28(6):2674-2681.
- [29] 刘顺,吴珍花,郭晓敏,等.不同林龄陈山红心杉土壤微生物群落结构特征[J].应用与环境生物学报,2016,22(3):510-517.
- [30] 谷晓楠,贺红土,陶岩,等.长白山土壤微生物群落结构及酶活性随海拔的分布特征与影响因子[J].生态学报,2017,37(24):8374-8384.
- [31] 刘丽,徐明恺,汪思龙,等.杉木人工林土壤质量演变过程中土壤微生物群落结构变化[J].生态学报,2013,33(15):4692-4706.
- [32] 楚海燕,李若南,李靖雯,等.中亚热带森林转换对土壤微生物群落结构的影响[J].应用与环境生物学报,2019,25(1):23-28.
- [33] 油伦成,李东坡,武志杰,等.稳定性铵态氮肥在黑土和褐土中的氮素转化特征[J].应用生态学报,2019,30(4):1079-1087.
- [34] 陆宇明,许恩兰,吴东梅,等.凋落物双倍添加和移除对米楮林土壤水解酶活性及其化学计量比的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):313-320.

(上接第 259 页)

- [23] 杨晓静,左德鹏,徐宗学.基于标准化降水指数的云南省近 55 年旱涝演变特征[J].资源科学,2014,36(3):473-480.
- [24] 张璐,朱仲元,王慧敏,等.基于 SPEI 的锡林河流域气象干旱风险分析[J].水土保持研究,2020,27(2):220-226.
- [25] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
- [26] 王卫光,黄茵,邢万秋,等.基于 SPEI 的海河流域干旱时空演变特征及环流成因分析[J].水资源保护,2020,36(3):8-13.
- [27] 范倩倩,赵安周,张安兵,等.1965—2015 年海河流域干旱时空变化特征分析[J].农业现代化研究,2019,40(3):507-517.
- [28] 王文静,延军平,刘永林,等.基于综合气象干旱指数的海河流域干旱特征分析[J].干旱区地理,2016,39(2):336-344.
- [29] 钱代丽,管兆勇,王黎娟.近 57 a 夏季西太平洋副高面积的年代际振荡及其与中国降水的联系[J].大气科学学报,2009,32(5):677-685.
- [30] 袁瑞强,龙西亭,王鹏,等.白洋淀流域地下水更新速率[J].地理科学进展,2015,34(3):381-388.
- [31] 崔水莲.海河流域干旱缺水对生态环境的影响分析(1965—1989年)[J].华北水利水电大学学报:社会科学版,2021,37(1):48-55.
- [32] 闫欣,牛振国.1990—2017 年白洋淀的时空变化特征[J].湿地科学,2019,17(4):436-444.
- [33] 赵志杰.环境变化对白洋淀流域径流的影响研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(2):58-60,63.
- [34] 胡珊珊,郑红星,刘昌明,等.气候变化和人类活动对白洋淀上游水源区径流的影响[J].地理学报,2012,67(1):62-70.
- [35] 李海涛,凤蔚,王凯霖,等.雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J].中国地质,2021,48(4):1112-1126.