

冬小麦干旱的下垫面孕灾环境研究 ——以淮河流域为例

高超^{1,2,3}, 陈财⁴, 罗纲⁴

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 浙江 宁波 315211;

2. 宁波市高等学校协同创新中心“宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心”, 浙江 宁波 315211;

3. 浙江省新型重点专业智库宁波大学东海研究院, 浙江 宁波 315211; 4. 中国科学院宁波城市环境观测研究站, 浙江 宁波 315800)

摘要: 基于 1961—2019 年淮河流域 140 个气象站点的日尺度降水数据和 2000—2016 年的月尺度的地表温度(LST)、归一化植被指数(NDVI)数据, 利用表征气象干旱的标准化降水指数(SPI)挑选确定冬小麦不同生长期的典型干旱年份; 利用表征农业干旱温度植被干旱指数(TVDI), 借助 Landsat-8 数据提取淮河流域冬小麦种植面积, 进一步深入分析格网化后的高程、坡度、水系、土壤类型、土壤相对湿度和浅层地下水埋藏深度等下垫面孕灾环境条件与冬小麦干旱之间的相互关系及其影响, 为冬小麦干旱防灾减灾研究提供理论依据和技术支持。结果表明: (1) 1961—2019 年, 冬小麦不同生育期的降水变化趋势不明显, 冬前生长期和灌浆成熟期降水呈现略微上升趋势, 各气象站点上升下降趋势均不显著。根据 SPI 确定典型干旱年份, 冬前生长期的典型干旱年份为 2010 年, 越冬期为 2011 年, 返青抽穗期为 2006 年, 灌浆成熟期为 2001 年。(2) 淮河流域农业干旱程度总体大于气象干旱, 空间分布总体一致, 但存在部分地区不一致的现象, 即冬小麦干旱还受到下垫面孕灾环境的较大影响。(3) 冬小麦干旱与水系、表层土壤相对湿度和浅层地下水埋深相关性较高, 与高程、坡度、土壤类型相关性较小。淮河流域冬小麦干旱易发生在海拔相对较高、坡度较陡、土壤类型为半水成土、远离河流、表层土壤相对湿度较低和浅层地下水埋藏深度为 >1 m 的区域, 干旱程度主要呈现沿海至内陆递增、南高北低的特征, 有必要加强此类地区防灾抗旱能力, 增加人工灌溉设施。

关键词: 气象干旱; 农业干旱; 冬小麦; 下垫面孕灾环境; 淮河流域

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0359-10

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.03.049

Study on the Hazard-formative Environment on Underlying Surface of Winter Wheat Drought — A Case Study of Huaihe River Basin, China

GAO Chao^{1,2,3}, CHEN Cai⁴, LUO Gang⁴

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211;

2. Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for land and marine spatial utilization and governance research at Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211; 3. Institute of East China Sea, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang

315211; 4. Ningbo Research Center for Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315800)

Abstract: Based on the daily scale precipitation data of 140 meteorological stations from 1961 to 2019, monthly scale Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from 2000 to 2016, the Huaihe River Basin was taken as the research area. The meteorological drought was characterized by Standardized Precipitation Index (SPI), the typical dry years were determined, according to the SPI. And the agricultural drought was characterized by Temperature Vegetation Drought Index (TVDI). Landsat 8 data was used to extract winter wheat planting area in the Huaihe River Basin, and the further in-depth analysis was made on the correlation and influence between the underlying surface hazard-formative environmental conditions, such as elevation, slope, river, soil type, soil relative humidity and shallow ground-

收稿日期: 2020-11-17

资助项目: 国家自然科学基金项目(41871024)

第一作者: 高超(1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事气候变化与水文水资源研究。E-mail: gaoqinchao1@163.com

water depth, and winter wheat drought, to provide theoretical basis and technical support for the study of winter wheat drought disaster prevention and mitigation. The results showed that: (1) From 1961 to 2019, the precipitation changing trend in different growth periods of winter wheat was not obvious, and the precipitation in pre-winter growth period and filling and mature period showed a slightly rising trend. The upward and downward trends of all meteorological stations were not significant. According to SPI, the typical dry year in the pre-winter growth period was 2010, the over-wintering period was 2011, the regreening and heading period was 2006, and the filling and mature period was 2001. (2) By comparing the proportion of meteorological drought and agricultural drought above mild drought and the spatial distribution, the degree of agricultural drought in the Huaihe River Basin was generally greater than the meteorological drought, and their spatial distributions were consistent overall, but there were some regional inconsistencies. It was necessary to further analyze the impact of underlying surface hazard-formative environment on agricultural drought. (3) Winter wheat drought was highly correlated with river, surface soil relative humidity and shallow groundwater depth, but less correlated with elevation, slope and soil type. Winter wheat agricultural drought in the Huaihe River Basin was prone to occur in areas with relatively high elevation, steep slope, semi-hydrogenous soil type, distances from rivers, low surface soil relative humidity and shallow groundwater burial depth of more than 1 m. The degree of drought increased from coastal to inland and was higher in the south and lower in the north, so it was necessary to strengthen disaster prevention and drought resistance in such areas and increase artificial irrigation facilities.

Keywords: meteorological drought; agricultural drought; winter wheat; hazard-formative environment; Huaihe River Basin

干旱是自然界常见的自然灾害,广泛影响着人类生产生活的各方面,其中对农业的影响极为显著且较为直接^[1]。干旱的主要特征表现为水量相对亏缺,土壤水分相对不足,农作物生长受限,不足以满足人的生存和经济发展的气候现象^[2]。

干旱通常被分为 4 种主要类型:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[3-4]。虽然 4 种干旱的定义不同,但所有类型的干旱都是基于降水不足造成的水分亏缺。其中气象干旱主要表现为在某时段内,整体上蒸发量大于降水量导致的收支不平衡现象,降水量低于同期历史水平^[5]。农业干旱主要表现在作物生长上,土壤水分的持续不足导致无法供给作物正常生长需求,从而表现出作物萎蔫、生长停滞甚至枯死等^[5]。国内外对于气象干旱和农业干旱的指标开展了大量研究,气象干旱方面提出单项气象干旱指数^[6]和综合气象干旱指数^[7-8],农业干旱方面运用了一系列干旱遥感监测指数^[9]进行农业干旱监测,其中 TVDI^[10]是一种通过反演土壤湿度来反映农业干旱状况的重要方法。农业干旱是气象干旱的进一步表现,农业干旱的发生主要表现在作物上,降水是影响作物生长发育的主要因素^[11],但同时作物受到其他因素的影响。

灾害主要包括致灾因子、孕灾环境和承灾体 3 个要素^[12]。从致灾因子角度,气象干旱是引发农业干旱的重要影响因素,水分支出大于水分收入使土壤含水量下降,供给作物水分不足,最终影响农作物的正

常生长发育^[13-14]。从孕灾环境角度,农业干旱的发生除受降水的主要影响外,还受到下垫面孕灾环境等多种因素的影响,而以往研究^[15]中因下垫面种类繁多以及难于量化表达使得较难探寻下垫面孕灾环境与农业干旱的关系。冬小麦作为淮河流域主要的作物类型之一,冬小麦干旱的发生强度、持续时间与当地的气候、地形、土壤、植被等下垫面孕灾环境以及人类活动等因素密切相关,其中气候因素中的降水起到重要作用,直接影响着冬小麦干旱。但不同地形则会使降水分布产生很大差异,例如平原、丘陵、山地和盆地等地发生干旱的时空分布特征有所差别。海拔高低引起温度差异,从而造成不同高度的土壤水分蒸发不同。土壤类型的不同也在一定程度影响土壤蒸发和土壤保水持水能力。例如,土层深厚疏松、质地较细、结构良好的肥沃土壤,蓄水保水能力强,冬小麦干旱发生较轻;反之,冬小麦干旱发生较重。干旱发生时,地下水会供应冬小麦生长发育的需要,在一定程度上能够缓解干旱。河流的分布同样影响着下垫面孕灾环境情况,例如,浅层地下水埋藏深度和土壤相对湿度等,靠近河流和远离河流的冬小麦生长发育也有较大区别。因此,本研究利用 SPI 表征气象干旱,利用 TVDI 表征农业干旱,根据气象干旱灾情数据来选择典型干旱年的农业干旱;利用 Landsat-8 数据提取淮河流域冬小麦种植面积,再结合下垫面数据,分析格网化后的下垫面孕灾环境和典型干旱年的冬小麦干

旱之间的相关性,为冬小麦干旱防灾减灾研究提供理论依据和技术支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

淮河流域地处我国东部,东经 111°55′—121°25′,北纬 30°55′—36°36′,流域面积约 27 万 km²(图 1)。地势整体上呈西高东低,区内地貌类型多样,流域西北部 and 东北部多为山区和丘陵,约占总面积的 1/3,其余地区大多为平原、洼地和湖泊等。淮河流域主要作物有小麦、水稻、玉米等,是国家重要的商品粮棉油基地,粮食产量约占全国总产量的 17%^[16-17]。

1.2 数据来源

1.2.1 气象数据 1961—2019 年淮河流域 140 个气象站点的逐日气温及降水量数据来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/A.0012.0001.html>)。

1.2.2 遥感数据 2000—2016 的遥感数据来源于中

国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。1 km 地表温度月合成数据的计算方法是取月平均值。500 m NDVI 月合成产品的计算方法是取月内每天最大值,重采样至 1 km。

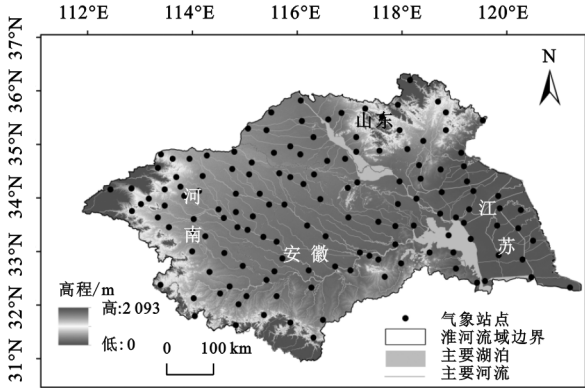


图 1 研究区概况

1.2.3 下垫面数据 下垫面数据主要包括高程、坡度、水系、土壤类型、土壤相对湿度和浅层地下水埋藏深度(表 1 和图 2)。

表 1 下垫面数据介绍

数据名称	主要特征	来源
高程	产品名称:ASTER GDEM 空间分辨率:30 m	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
坡度	坡度是基于 ASTER GDEM 数据,用 ArcGIS 中坡度工具计算得出	中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)
水系	呈现羽状、南北支流很不对称。北岸支流多而长,流经黄淮平原。南岸支流少而短,流经山地、丘陵	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
土壤类型	采用了传统的“土壤发生分类”系统,基本制图单元为亚类	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn)
土壤相对湿度	主要包括淮河流域各站点 10,20,50 cm 3 个土层土壤相对湿度的逐旬数据 ^[18]	国家气象科学数据共享服务平台(http://data.cma.cn/site/index.html)
浅层地下水	浅层地下水水位埋深数据内容主要反映了浅层淡水水位埋深分布情况	图形矢量化及数据库建设由中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成,本研究在成果的基础上进一步矢量化得出
水位埋藏深度		

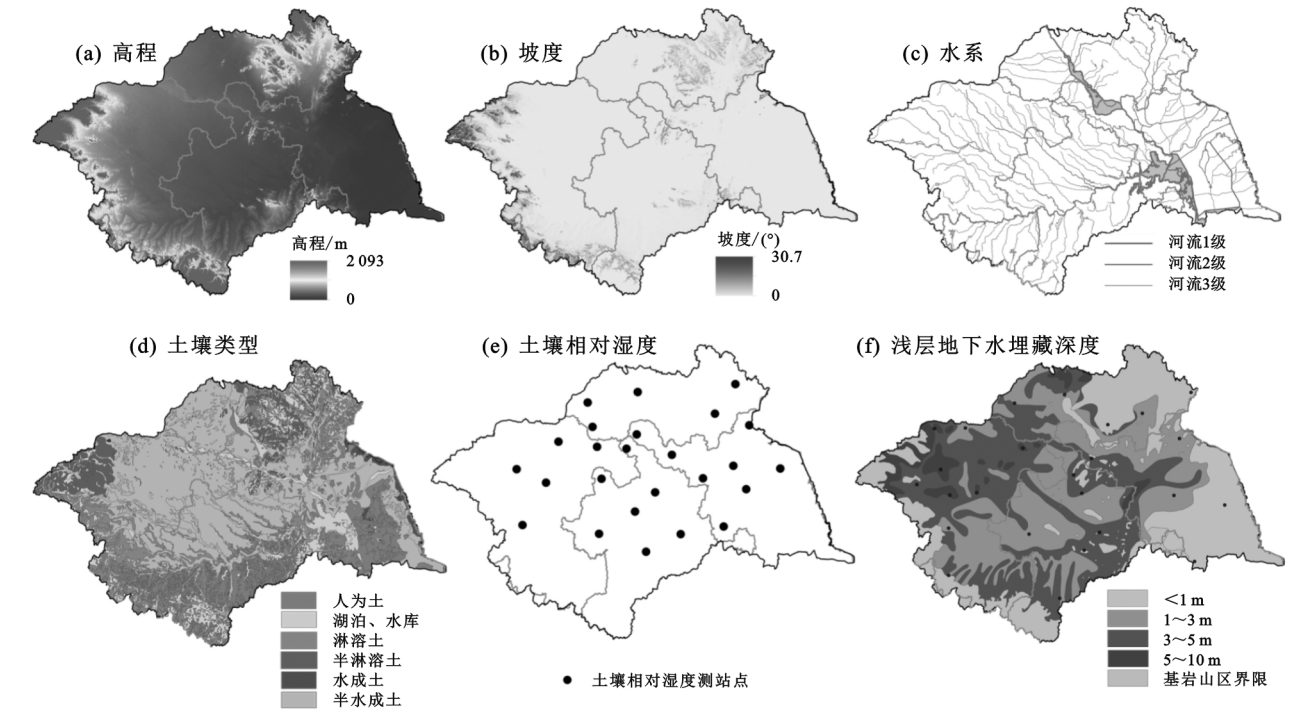


图 2 淮河流域下垫面要素

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水指数 (SPI) 标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI) 是考虑降水量的旱涝指标^[17,19],具有多时间尺度的特征,反映了不同时间尺度和地区的旱涝状况以及干旱的年际变化(表 2)。SPI 计算公式为:

$$SPI=S \frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{[(d_3t+d_2)t+d_1]t+1.0}$$
 (1)

式中: $t=\sqrt{\ln \frac{1}{G(x)^2}}$; x 为不同时间尺度的降水量; $G(x)$ 为与 x 对应的累积概率,可由 Gamma 函数概率密度积分得到; S 为概率密度正负系数,当 $G(x)>0.5$ 时, $S=1$;当 $G(x)\leq 0.5$ 时, $S=-1$ 。

表 2 SPI 干旱程度分级

SPI 值	程度
$SPI\leq -2$	极度干旱
$-2<SPI\leq -1.5$	重度干旱
$-1.5<SPI\leq -1$	轻度干旱
$-1<SPI\leq 1$	正常
$1<SPI\leq 1.5$	轻度湿润
$1.5<SPI\leq 2$	重度湿润
$2<SPI$	极度湿润

1.3.2 温度植被干旱指数 (temperature vegetation drought index, TVDI) LST 与 NDVI 之间具有明显的负相关关系,显著影响着土壤水分。在地表温度与归一化植被指数所构成的近似三角形的特征空间中,任意 1 个值对应唯一 1 组最高温与最低温,所有的最高温组成了特征空间的干边,所有的最低温组成了特征空间的湿边,干边与湿边拟合的斜率可以反映土壤水分含量^[10],表示为:

$$TVDI=\frac{T_s-T_{smin}}{T_{smax}-T_{smin}}$$
 (2)

式中: T_s 为给定像元的地表温度; T_{smax} 、 T_{smin} 分别为特征空间的干边和湿边,对 T_{smax} 、 T_{smin} 进行线性回归,回归方程为

$$T_{smin}=a_1+b_1NDVI$$
 (3)

$$T_{smax}=a_2+b_2NDVI$$
 (4)

式中: a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别为干、湿边方程的截距和斜率;NDVI 为给定像元的归一化植被指数。TVDI 干旱移度分级见表 3。

表 3 TVDI 干旱程度分级

干旱等级	干旱类型	TVDI
1	重度湿润	$0<TVDI\leq 0.2$
2	轻度湿润	$0.2<TVDI\leq 0.4$
3	正常	$0.4<TVDI\leq 0.6$
4	轻度干旱	$0.6<TVDI\leq 0.8$
5	重度干旱	$0.8<TVDI\leq 1$

1.3.3 分析方法 本研究利用最大似然分类方法对

淮河流域遥感影像进行土地利用类型分类,得出淮河流域冬小麦种植面积。采用气候倾向率对长时间序列尺度的降水和干旱特征进行趋势分析。克里金插值法的结果更符合淮河流域各气象站点空间分布状况^[20]。采用双变量空间相关性^[21]分析农业干旱和高程、坡度之间的相关性。利用 GeoDa 中的 weight 工具创建研究区空间权重文件,选择 Threshold Distance 建立空间权重矩阵,显著性 $p\leq 0.05$,可信度较高。通过 GeoDa 计算高程、坡度和 TVDI 的 Bivariate Local Moran's I (双变量局部空间相关性)值,并生成散点图和集聚图,总体相关性可根据 Moran's I 值得出,空间相关性可根据集聚类型得出。

1.3.4 冬小麦生育期划分、种植面积提取 由于淮河流域自然地理和气候条件等因素的复杂性,研究区内冬小麦不具有统一的生育期。本文参考许莹等^[22]的研究成果,在此基础上确定冬小麦生育期划分为冬前生长期(10—12 月)、越冬期(12 月至翌年 2 月)、返青抽穗期(2—5 月)和灌浆成熟期(5 月)。根据国家统计局公布的冬小麦分省的种植面积以及总面积中得出冬小麦种植面积在 2000—2017 年面积未发生大面积的变化。因此,本研究在参考淮河流域影像的云量、完整性,以及获取难易度,最终选择 2016 年和 2017 年的 Landsat-8 影像(表 4),提取淮河流域冬小麦种植面积。在精度验证方面,采用多人选取感兴趣区进行交叉验证,精度高达 95%。淮河流域冬小麦种植面积分布较广,除边缘山区未有大面积种植外,其余地势平坦区域种植面积集中且范围广,主要呈现块状分布,集中在安徽北部、江苏中北部、山东南部、河南东部等平原地区。

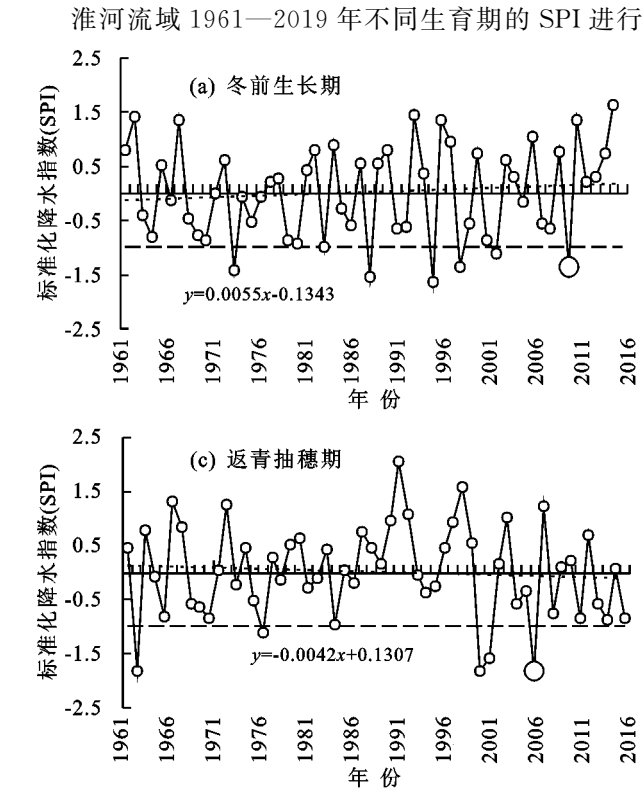
表 4 覆盖淮河流域的 Landsat-8 影像的基本信息

轨道号	时间	云量/%
119—37	2016-04-22	2.34
120—36	2016-04-29	0.16
120—37	2016-04-29	0.58
121—35	2017-04-18	8.83
121—36	2017-04-18	0.40
121—37	2017-04-23	0.07
121—38	2017-04-23	0.56
122—35	2017-04-25	0.16
122—36	2017-04-25	0.15
122—37	2017-04-25	0.03
122—38	2017-04-25	1.77
123—35	2016-04-18	0.09
123—36	2016-04-18	1.86
123—37	2016-04-18	0.26
123—38	2016-04-18	8.25
124—36	2017-04-28	0.07
124—37	2017-04-28	0.02

2 结果与分析

2.1 气象干旱和农业干旱的时空分布特征

2.1.1 气象干旱的时间变化特征及典型干旱年份挑选 根据淮河流域冬小麦不同生育期时段,以冬前生长期(11月)、越冬期(1月)、返青抽穗期(3月)、灌浆成熟期(5月)为代表,相应选择冬小麦不同生育期对应的SPI,即冬前生长期(SPI_1_11月)、越冬期(SPI_1_1月)、返青抽穗期(SPI_1_3月)、灌浆成熟期(SPI_1_5月),目的是为了和TVDI(表征农业干旱)以月为单位的时间尺度相匹配。



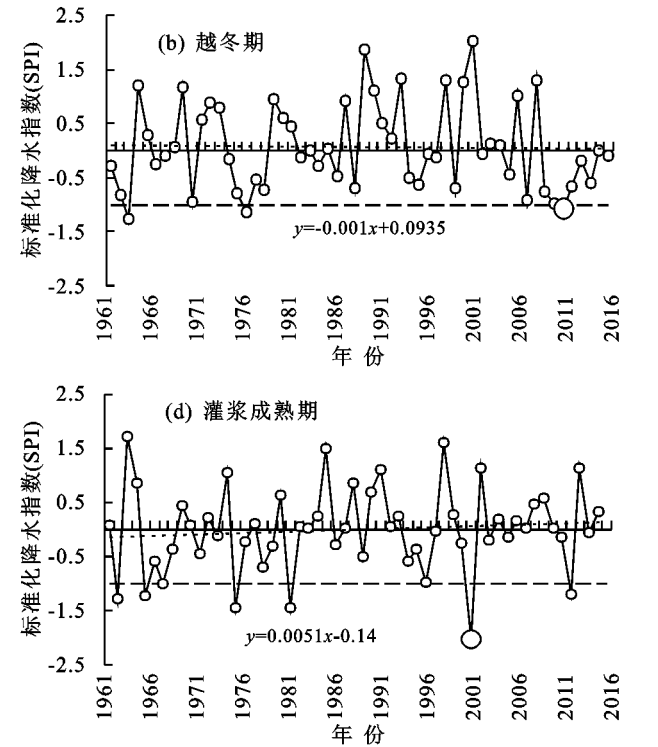
注:图中大圆圈图例为各时期典型干旱年份。

图3 冬小麦不同生育期SPI趋势特征

2.1.2 典型干旱年验证 为了验证利用SPI进行典型干旱年挑选的科学性,将淮河流域冬小麦2000—2013年不同生育期已有的10 cm处的土壤相对湿度和SPI进行趋势对比(图4),根据SPI挑选出的典型干旱年对应的土壤相对湿度同样呈现较低态势。SPI和土壤相对湿度两者之间的相关性在冬前生长期为0.82,越冬期为0.71,返青抽穗期为0.84,灌浆成熟期为0.75,相关性均较高,结果表明,SPI可用于进行典型干旱年份的挑选。

2.1.3 气象干旱和农业干旱的空间分布特征 根据图5气象站点出现气象干旱占比和出现农业干旱占比的空间插值结果发现,农业干旱程度明显大于气象干旱。空间分布上,冬前生长期和越冬期,整体呈现南部干旱程度较高且呈现纬向分布;返青抽穗期和灌

浆成熟期,气象干旱北部大于南部,而农业干旱占比较高的地区多分布在海拔较高的山地、丘陵地带。无论是干旱占比还是在空间分布上,气象干旱和农业干旱存在空间分布不一致的规律,表明农业干旱不仅受到降水因素影响,还可能受到其他因素的影响,因此需要从孕灾环境角度进一步分析下垫面与农业干旱的相关性。



浆成熟期,气象干旱北部大于南部,而农业干旱占比较高的地区多分布在海拔较高的山地、丘陵地带。无论是干旱占比还是在空间分布上,气象干旱和农业干旱存在空间分布不一致的规律,表明农业干旱不仅受到降水因素影响,还可能受到其他因素的影响,因此需要从孕灾环境角度进一步分析下垫面与农业干旱的相关性。

2.2 冬小麦干旱与下垫面孕灾环境相关性

2.2.1 典型干旱年冬小麦干旱空间分布特征 标准化降水指数(SPI)确定典型干旱年,结合冬小麦种植面积,对典型干旱年份的TVDI进行干旱空间分布提取(图6)。不同生育期的冬小麦干旱主要表现出南部较为干旱、北部较为湿润的特征。冬前生长期和越冬期均呈现南部重度干旱、轻度干旱面积明显大于北

部,空间上呈纬向分布;返青抽穗期和灌浆成熟期,冬小麦干旱面积明显少于冬前生长期和越冬期。

2.2.2 与下垫面孕灾环境的相关性

(1)与高程、坡度的相关性。对比不同生育期干旱分布状况与高程的空间相关性,不同生育期的冬小

麦干旱与高程的相关性均较小。在空间分布上,通过不同(0.05,0.01,0.001)显著性检验的区域大多分布在海拔较高或靠近沿海区域,表现出海拔越高干旱程度越高,海拔越低越湿润的特征(图 7,以灌浆成熟期为例,其他阶段均类似)。

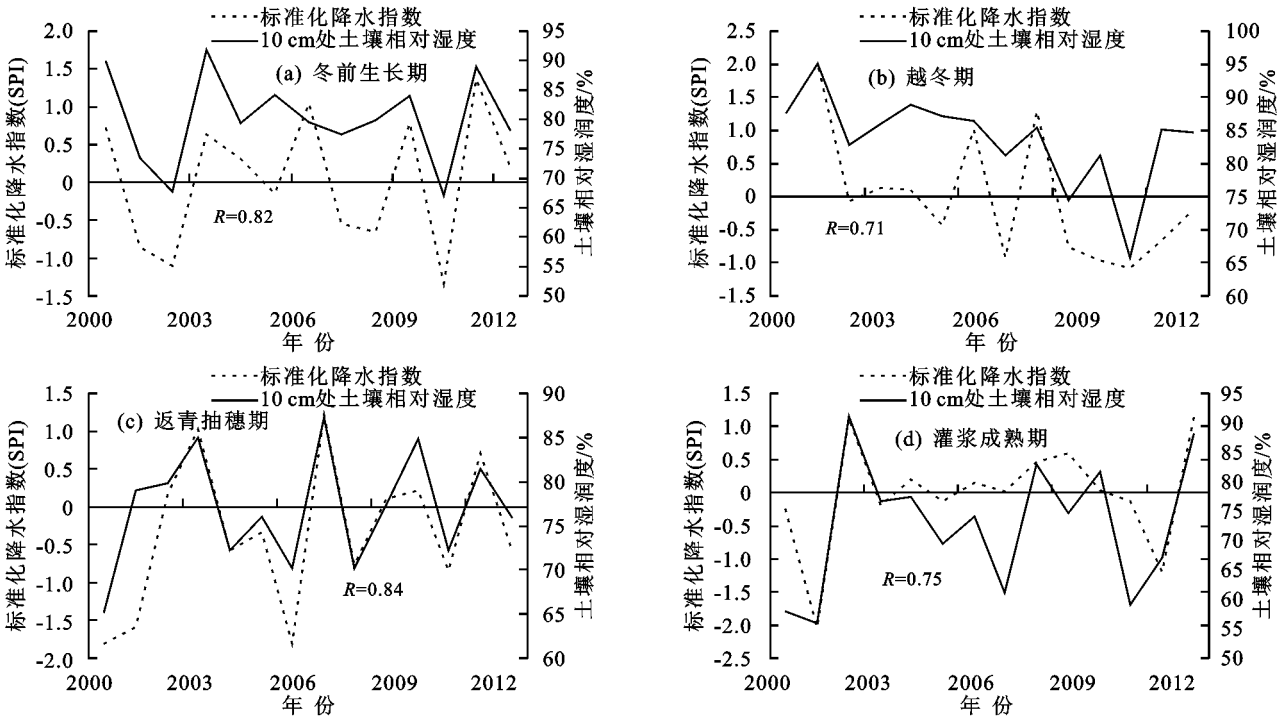


图 4 2000—2013 年 SPI 和 10 cm 处的土壤相对湿度趋势对比

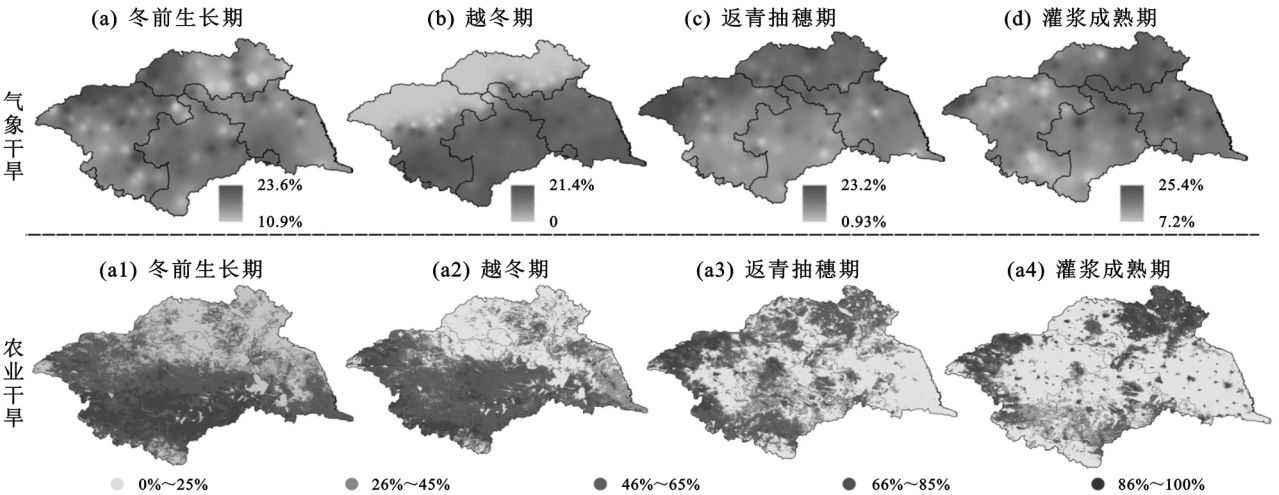


图 5 冬小麦不同生育期气象干旱和农业干旱空间对比

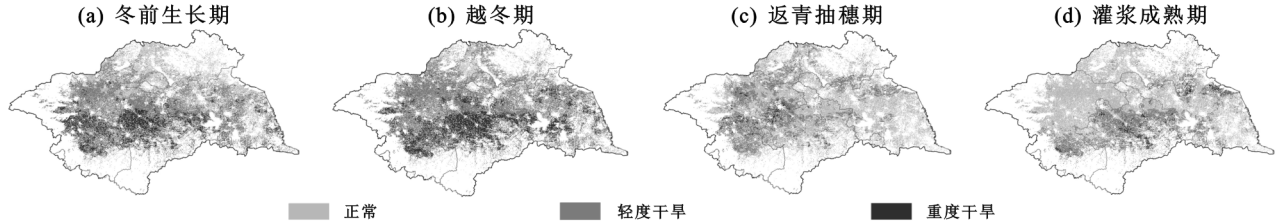


图 6 典型干旱年农业干旱空间分布

对比不同生育期干旱分布状况与坡度的空间相关性,不同生育期的冬小麦干旱与坡度的相关性均较小。在空间分布上,通过相关性 0.05 显著性检验的

点多分布在海拔较高以及沿海地区,未通过显著性检验的点占大多数,且分布在冬小麦主要种植区(图 7,以灌浆成熟期为例,其他阶段均类似)。

(2)与水系的相关性。淮河流域水系众多,根据汇支流关系将水系分为河流1级、河流2级、河流3级共3个等级。按照不同等级对河流进行缓冲区建立,并将其对应的TVDI统计结果(图8)可得:随着缓冲区距离的增大,TVDI呈现上升趋势,表明冬小

麦种植区域距离河流越远,干旱越严重。随着缓冲区距离的增大,TVDI上升趋势最大的为河流1级,斜率为0.0031,其次为河流2级和河流3级,斜率分别为0.0017和0.0010。结果表明淮河流域河流等级越高,对冬小麦干旱影响越大。

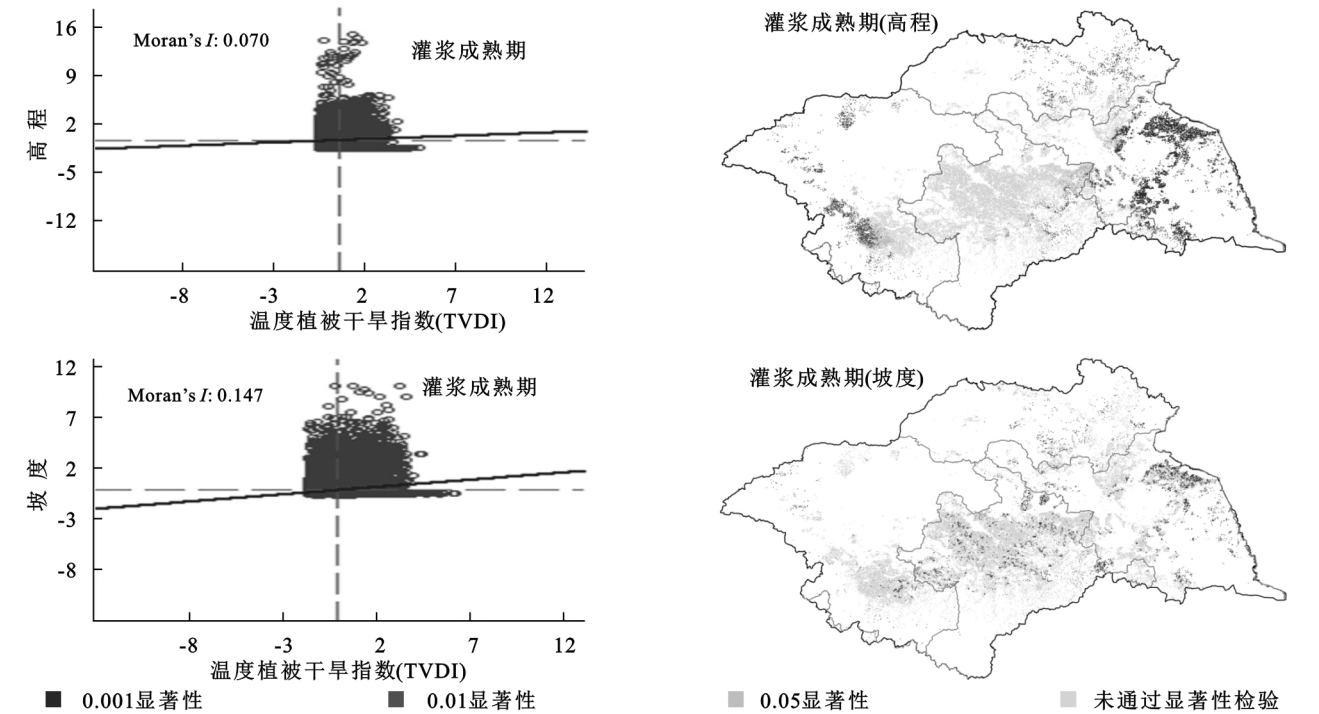


图7 不同生育期冬小麦干旱与高程、坡度的相关性

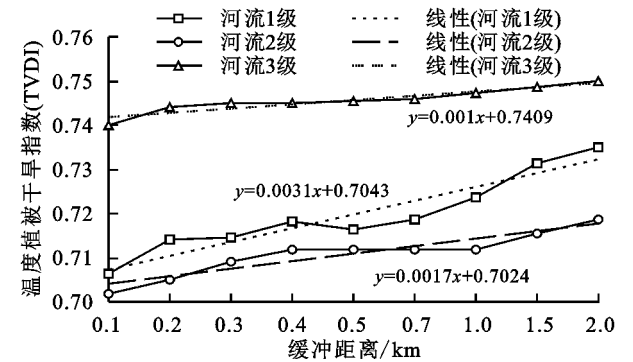


图8 不同等级河流缓冲区对应的冬小麦干旱

(3)与土壤类型的相关性。分析冬小麦不同生育期干旱与土壤类型的相关性:冬小麦在冬前生长期和越冬期,水成土发生干旱面积最大,其次为人为土和淋溶土。返青抽穗期,半水成土干旱面积最大,且大于冬前生长期和越冬期;其次为淋溶土、人为土和半淋溶土。灌浆成熟期,半水成土冬小麦干旱面积最大,其次为淋溶土、人为土和半淋溶土。综上所述,冬小麦全生育期内,发生干旱面积最大的土壤类型为半水成土,其次为人为土和淋溶土。

为了更进一步判断哪种土壤类型更易发生冬小麦干旱,对面积排名前5的土壤类型进行对应的TVDI统计,结果可知,冬前生长期和越冬期,淋溶土

发生冬小麦干旱的可能性较大(图9a和图9b);返青抽穗期,易发生冬小麦干旱的土壤类型为半水成土,与冬前生长期和越冬期的结果不一致(图9c);灌浆成熟期,易发生冬小麦干旱的土壤类型为半淋溶土(图9d)。综上所述,易发生冬小麦干旱的土壤类型并没有明显的规律,与土壤类型的性状有关。半水成土、人为土、淋溶土3种类型的土壤在某些方面较为相似,尤其是半水成土和人为土受到地下水和人为灌溉的影响,在某种程度上更难以界定。由于淮河流域多以平原为主,地势平坦,因此在土壤类型划分过程中往往存在误差。

(4)与土壤相对湿度的相关性。土壤类型与冬小麦干旱之间相关不明显,而土壤相对湿度是影响作物生长的主要因素,进一步分析冬小麦干旱与土壤相对湿度之间的关系,结果可知,总体上0—10 cm土壤相对湿度与冬小麦干旱的相关性较高,冬前生长期为-0.3,越冬期为-0.26,返青抽穗期为-0.24,灌浆成熟期为-0.51(图10)。10,20,50 cm的土壤相对湿度与冬小麦干旱之间除返青抽穗期以外,其他各生育期随着土层深度的加深相关性逐渐变小。

(5)与浅层地下水埋藏深度的相关性。土壤相对湿度与浅层地下水埋藏深度息息相关,浅层地下水埋

藏深度影响着冬小麦干旱的分布情况。淮河流域冬小麦根量主要集中在上层,根长密度、根质量密度在0—50 cm 土层分别占 57.7%和 66.7%,而在 50—100 cm 层分别占 23.4%和 18.7%^[23]。进一步研究<1 m 和>1 m(1—3 m)不同浅层地下水埋藏深度下冬小麦发生的干旱程度。冬小麦不同生育期,浅层地下水埋藏深度>1 m 区域所对应的 TVDI 值大于浅层地下水埋藏深度 1 m 以下区域,即浅层地下水埋藏深度越深,冬小麦干旱越明显(图 11)。

(6)下垫面孕灾环境下易发生冬小麦干旱程度。根据与冬小麦干旱与下垫面孕灾环境相关性,在 ArcGIS 中利用自然断点法对高程、坡度、水系、土壤相对湿度和浅层地下水埋藏深度下垫面要素进行冬小麦易干旱程度赋值,赋值后相加得出综合评价,即下垫面孕灾环境下淮河流域冬小麦易发生干旱程度。下垫面孕灾环境下易发生干旱程度总体呈现沿海至内陆递增、南高北低的特征,尤其在淮河流域的河南和安徽省境内(图 12)。

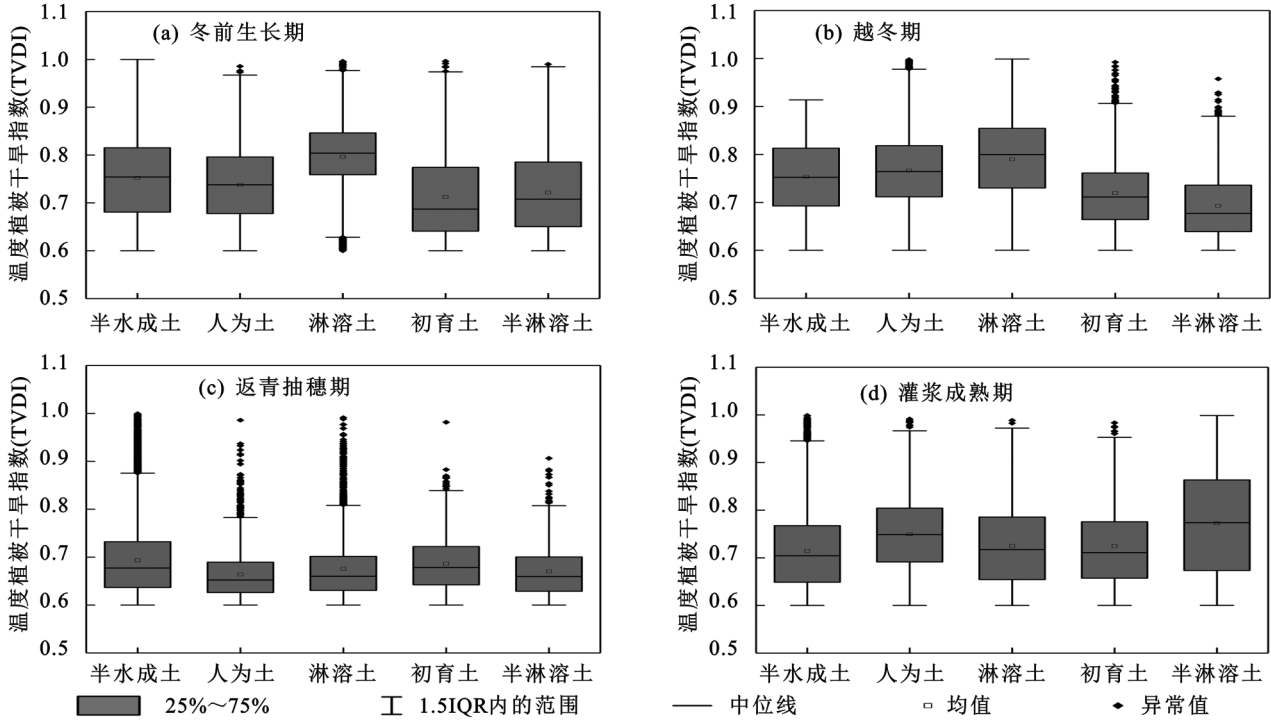


图 9 不同土壤类型对应的冬小麦干旱情况

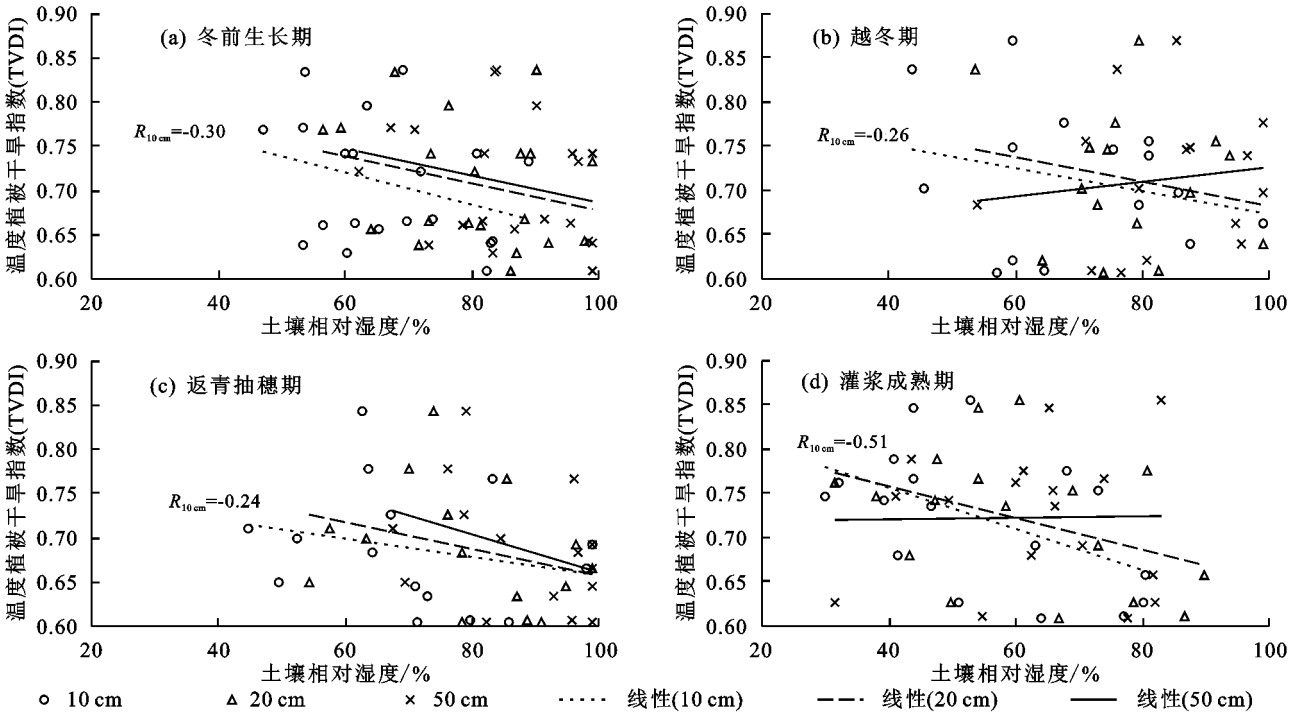


图 10 不同土层深度土壤相对湿度和冬小麦干旱的相关性

3 讨论

3.1 干旱指标及干旱空间分布特征

本研究采用前人较为常用的 SPI 表征气象干旱, TVDI 表征农业干旱, 通过不同干旱指标表征的干旱程度进一步进行时空特征对比分析, 尽管有研究^[3,24-25]表明, 用 2 套干旱指标进行对比有一定的科学依据, 但其科学性仍值得深入探讨。本研究根据前

人^[22]研究成果, 结合作物生长特性将研究区冬小麦全生育期划分为 4 个不同生育期。在此基础上, 利用遥感数据提取冬小麦种植面积, 结合指标表征的干旱空间分布特征, 进一步提取淮河流域的冬小麦干旱空间分布。在已有研究^[13,24-25]中还较少出现上述分析方法, 因此, 本研究对干旱的空间分布特征研究更具有**一定的地域和作物的针对性。

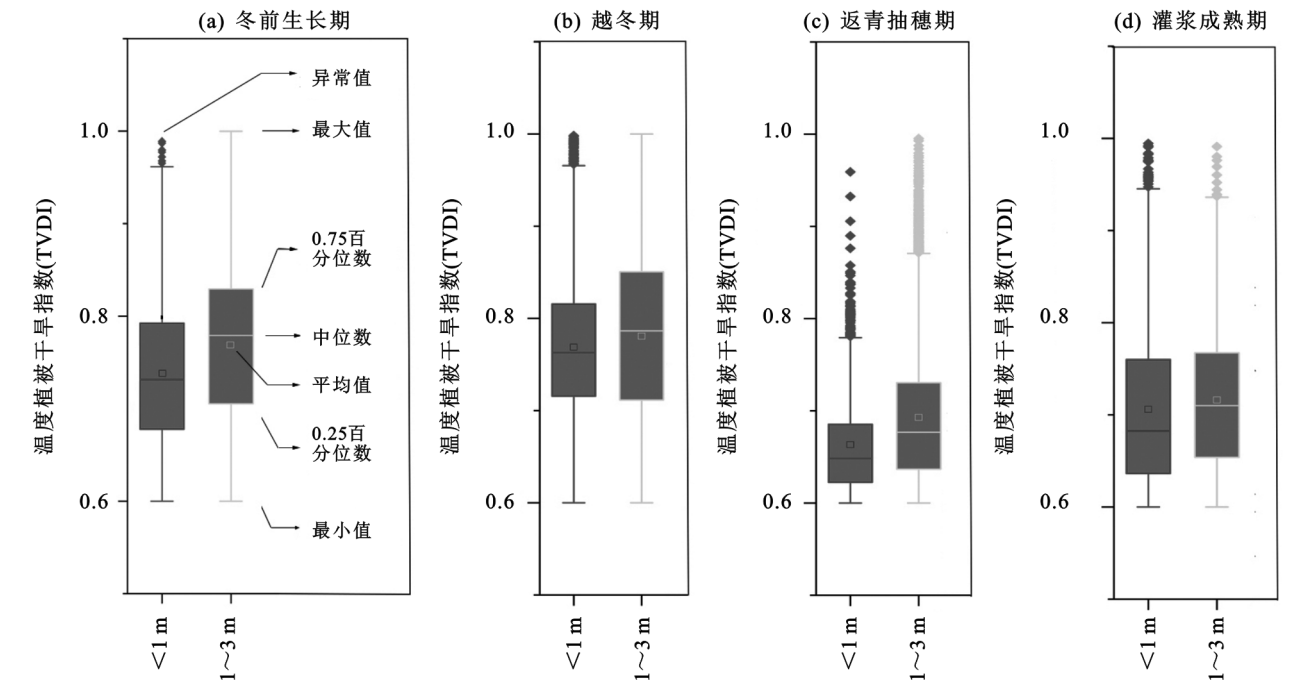


图 11 浅层地下水埋藏深度区域对应的冬小麦干旱情况

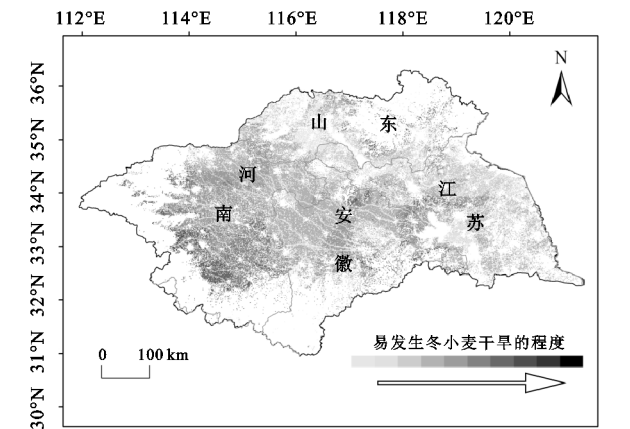


图 12 下垫面孕灾环境下易发生冬小麦干旱程度

3.2 下垫面孕灾环境

与前人^[13-14]研究成果选取气温、降水、地形、土壤相对湿度等因素相比, 本研究在下垫面孕灾环境的选取上, 还考虑了水系分布、浅层地下水埋藏深度。但影响冬小麦干旱的下垫面因素较多, 且诸多因素又无法量化表达, 例如, 人为灌溉、冬小麦品种与田间管理措施等因素对冬小麦干旱的影响; 在微观层面, 从冬小麦的水分迁移与转化角度进行田间试验来进一步探究冬小麦干旱, 解决精确测算冬小麦生长需水量和确定冬小麦干旱过程缺水环节等关键科学问题。

冬小麦干旱是由降水不足或异常减少, 从而引起水分供需矛盾, 主要受地表温度、蒸散发、土壤特性和作物的生理或生态特性的综合影响。因此, 未来的研究中需尝试更细致分析气象因子、地形地貌和土壤特性等对冬小麦干旱缺水的影响程度, 深化研究水分迁移和转化的环节, 厘清降水量、土壤含水量和地表径流量对冬小麦干旱的影响, 分析冬小麦缺水环节和干旱形成机制, 综合研判冬小麦干旱灾害风险等。

4 结论

(1) 时间上, 淮河流域在冬前生长期和越冬期降水呈上升趋势, 越冬期和灌浆成熟期呈下降趋势, 但整体变化特征不明显。根据 SPI 值确定冬小麦不同生育期的典型干旱年份, 冬前生长期的典型干旱年份为 2010 年, 越冬期为 2011 年, 返青抽穗期为 2006 年, 灌浆成熟期为 2001 年。从农业干旱对气象干旱的响应角度分析, 淮河流域农业干旱程度整体上大于气象干旱, 则表明农业干旱受其他因素的影响。

(2) 从孕灾环境即下垫面角度分析与农业干旱的相关性, 不同生育期的冬小麦干旱与高程、坡度的相关性均较小。通过显著性检验的多分布在海拔较高

以及靠近沿海区域,基本上表现出海拔越高干旱程度越高和坡度越陡干旱程度越高的特征。随着距离河流越远,干旱程度越高;等级较高的河流对冬小麦干旱的影响程度明显大于等级较低的河流。冬小麦干旱中,半水成土土壤类型分布类型最广,其次为人为土和淋溶土。冬前生长期和越冬期,淋溶土发生冬小麦干旱的可能性较大;返青抽穗期和灌浆成熟期的规律不明显。除返青抽穗期外,土层厚度为 10 cm 的土壤相对湿度与冬小麦干旱相关性最高,相关性随着土层厚度的增加呈下降趋势。浅层地下水埋藏越深的区域干旱特征越明显。下垫面孕灾环境下淮河流域易发生冬小麦干旱的地区主要呈现沿海至内陆、南高北低的特征,尤其在淮河流域的河南和安徽省境内。

参考文献:

- [1] 姜彤,李修仓,巢清尘,等.《气候变化 2014:影响、适应和脆弱性》的主要结论和新认知[J].气候变化研究进展,2014,10(3):157-166.
- [2] Chen T T, Xia G M, Liu T G, et al. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China [J]. Sustainability, 2016, 8(10): e1069.
- [3] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等.农业干旱监测研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(11):1835-1848.
- [4] 杨晓静,徐宗学,左德鹏,等.东北三省农业旱灾风险评估研究[J].地理学报,2018,73(7):1324-1337.
- [5] Tian Y, Xu Y P, Wang G Q. Agricultural drought prediction using climate indices based on Support Vector Regression in Xiangjiang River basin [J]. Science of the Total Environment, 2018, 622: 710-720.
- [6] 张瑞,吕殿青,李景保.1951—2016 年长江荆南三口地区旱涝演变与急转特征分析[J].水土保持学报,2018,32(3):132-139,145.
- [7] 王慧敏,郝祥云,朱仲元.基于综合气象干旱指数的干旱状况分析:以锡林河流域为例[J].水土保持研究,2019,26(2):326-336.
- [8] He J, Yang X H, Li J Q, et al. Spatiotemporal variation of meteorological droughts based on the daily comprehensive drought index in the Haihe River basin, China [J]. Natural Hazards, 2015, 75(S2): 199-217.
- [9] Gumma M K, Nelson A, Yamano T. Mapping drought-induced changes in rice area in India [J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(21): 8146-8173.
- [10] Zormand S, Jafari R, Koupaei S S. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands [J]. Natural Hazards, 2017, 86(2): 757-777.
- [11] 季定民,张勃,王东,等.甘肃河东玉米种植区春夏气象干旱时空变化特征及其与环流因子关系[J].自然资源学报,2015,30(9):1547-1559.
- [12] Peduzzi P. The disaster risk, global change, and sustainability nexus [J]. Sustainability, 2019, 11(4): 957-978.
- [13] Huang S Z, Huang Q, Chang J X, et al. The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: A case study in the Wei River Basin, China [J]. Agricultural Water Management, 2015, 159: 45-54.
- [14] 庞素菲,魏伟,郭泽呈,等.基于 TVDI 的甘肃省农业旱情特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(6): 1849-1860.
- [15] Bae H, Ji H, Lim Y J, et al. Characteristics of drought propagation in South Korea: Relationship between meteorological, agricultural, and hydrological droughts [J]. Natural Hazards, 2019, 99(1): 1-16.
- [16] 罗纲,阮甜,陈财,等.农业干旱与气象干旱关联性:以淮河蚌埠闸以上地区为例[J].自然资源学报,2020,35(4):977-991.
- [17] Gao C, Li X W. Precipitation thresholds of drought disaster for maize in areas in front of Bengbu Sluice, Huaihe River Basin, China [J]. Water, 2018, 10(10): e1395.
- [18] 潘汉雄,朱国锋,张昱,等.中国耕地土壤相对湿度时空分异[J].地理学报,2019,74(1):117-130.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局(中国国家标准化管理委员会).GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006:3-4.
- [20] 高超,李学文,孙艳伟,等.淮河流域夏玉米生育阶段需水量及农业干旱时空特征[J].作物学报,2019,45(2): 141-153.
- [21] 施益强,王坚,张枝萍.厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析[J].环境工程学报,2014,8(12):5406-5412.
- [22] 许莹,马晓群,王晓东,等.淮河流域冬小麦水分亏缺时空变化特征分析[J].地理科学,2013,33(9):1138-1144.
- [23] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.冬小麦根系分布规律[J].生态学杂志,2008,27(11):2024-2027.
- [24] 陈少丹,张利平,汤柔馨,等.基于 SPEI 和 TVDI 的河南省干旱时空变化分析[J].农业工程学报,2017,33(24):126-132.
- [25] 唐饶,孙睿.基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析[J].自然资源学报,2013,28(4):646-655.