

关中平原干旱遥感监测指数对比和应用研究

刘英, 鲁杨, 李遥, 岳辉

(西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘要:采用2000–2016年5月份MODIS数据,构建NIR–Red特征空间,对比分析基于该特征空间的垂直干旱指数(Perpendicular Drought Index, PDI)、改进型垂直干旱指数(Modified Perpendicular Drought Index, MPDI)、土壤湿度监测指数(Soil Moisture Monitoring Index, SMMI)及改进型土壤湿度监测指数(Modified Soil Moisture Monitoring Index, MSMMI)这四种干旱监测指数的有效性,并与实测土壤湿度进行相关性分析;最后采用精度最高的SMMI分析关中平原的旱情时空分布特征和规律。结果表明:(1)PDI、MPDI、SMMI及MSMMI均与10cm深土壤湿度存在负相关关系,可决系数 R^2 分别为0.60、0.40、0.64、0.40,表明PDI、MPDI、SMMI及MSMMI均可作为旱情监测指标,且SMMI略优于其它三种监测指数;(2)关中平原东部、中部、西部部分地区旱情严重,西南部地区旱情较轻,且旱情呈年际波动显著的特征;(3)SMMI与月平均气温呈正相关关系区域占75.66%,与月降水量呈负相关关系区域占74.34%,其中通过90%显著性检验区域分别占总面积的27.36%、17.26%,说明降雨和温度不是导致旱情变化的主要影响因子。

关键词:NIR–Red特征空间;干旱指数对比;土壤湿度监测指数;旱情监测;关中平原

中图分类号:S127 **文献标志码:**A

Comparison and application of remote sensing monitoring indexes of drought in Guanzhong Plain

LIU Ying, LU Yang, Li Yao, YUE Hui

(College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054)

Abstract: By using MODIS data from May 2000 to May 2016, constructing the NIR–Red space, and collecting the Perpendicular Drought Index (PDI), Modified Perpendicular Drought Index (MPDI), Soil Moisture Monitoring Index (SMMI) and Modified Soil Moisture Monitoring Index (MSMMI), we studied the validity of these four indexes and the correlation of them with the measured soil moisture data. Then, the spatial and temporal distribution characteristics of drought in Guanzhong plain was assessed based on SMMI that had the highest precision. The results showed that: (1) There was a negative correlation between PDI, MPDI, SMMI and MSMMI with measured soil moisture in the top 10 cm layer with R^2 , coefficient of correlation of 0.60, 0.40, 0.64, and 0.40, respectively. It was suggested that all four indexes could be used as drought indicators while SMMI was slightly better than the others. (2) The drought conditions in the eastern, central, and western regions of Guanzhong plain were more severe while soil water content was relatively higher in the southwestern area. There was a significant inter-annual fluctuation in drought of Guanzhong plain. (3) There was a positive correlation between SMMI and average monthly temperature in 75.66% of the total area but a negative correlation of SMMI with monthly precipitation in 74.34% of the area. The significance test showed that 27.36% and 17.26% of that are at $P < 0.1$ level, respectively, indicating that precipitation and temperature were not the major factors causing the changes in drought.

Keywords: NIR – Red space; comparison of several drought indexes; SMMI; drought monitoring; Guanzhong Plain

干旱是制约我国经济发展和农业生产的自然灾害之一。遥感已成为干旱监测的主要手段^[1-3],其中基于波段反射率的光谱特征空间法因原理清晰、计算简单而被广泛应用。1977 年, Richardson 和 Weigand^[4]利用 MSS 红光(Red)和近红外(NIR)波段反射率建立 NIR-Red 特征空间,提出了基于土壤背景线的垂直植被指数; Ghulam 等^[5]基于 NIR-Red 特征空间,利用特征空间中任意一点到过原点的土壤线的垂线距离大小表征土壤湿度多寡,建立了 PDI,并指出 PDI 适用于裸土或植被生长区域旱情监测;针对全植被覆盖区域, Ghulam 等^[6]引入植被覆盖度,提出了 MPDI; Qin 等^[7]利用中国北方 MODIS 数据,验证了 PDI 有效性,指出 PDI 监测旱情状况与实测情况一致; Shahabfar 等^[8-9]利用 MODIS 数据,借助 PDI 分别监测了伊朗旱情及亚洲中部和西南部水文重新划分、变化及其旱情变化状况,指出 PDI 可用来监测旱情; Chen 等^[10]基于 PDI、MPDI,验证了 GF-1 多光谱数据是否可用于监测土壤湿度,指出该数据可用于土壤湿度监测; Zhang 等^[11]、Zormand 等^[12]分别比较了 PDI、MPDI、温度植被干旱指数、条件温度指数等旱情监测指数的优劣,指出这些干旱指数各有优缺点;姚云军等^[13]利用 MODIS 短波红外第 6 和第 7 波段构建短波红外光谱特征空间,利用该特征空间任意一点到原点距离大小构建短波红外土壤湿度指数,指出该方法反演区域土壤含水量具有可靠性;刘英等^[14]基于 NIR-Red 特征空间,利用该特征空间任意一点到原点距离大小,构建不依赖土壤背景线而变化的土壤 SMMI,指出 SMMI 可监测土壤湿度,并利用该指数监测了神东矿区土壤湿度的变化情况^[15]。

国内外学者基于 NIR-Red 光谱特征空间监测土壤湿度主要有两种方法:一是利用光谱特征空间中任意一点到经过坐标原点的土壤线的垂线距离大小来表征土壤湿度多寡,如 PDI、MPDI;二是基于光谱特征空间中任一点到原点的直线距离大小来表征土壤湿度状况,如 SMMI 等。这两种监测方法原理相似,是否都具有普适性以及两者的区别和联系需要进一步验证。本文以关中平原为研究区,利用 MODIS Red 和 NIR 波段反射率数据,分别构建 PDI、SMMI、MPDI 和 MSMMI,对比分析这四种干旱监测方法的有效性、精度,并利用 SMMI 监测 2000-2016 年关中平原时空演变特征和规律,为快速准确掌握旱情发展趋势,并及时采取有效的防旱、抗旱措施提供参考。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

关中平原又称渭河平原,地处陕西省中部,位于北山和秦岭之间,海拔 325~800 m,地理坐标 33°N~37°N、106°E~111°E。关中平原西起宝鸡峡口,东到潼关港口,南接秦岭、北靠陕北高原;东西长约 360 km,面积约为 3.6 万 km²。关中平原地区属于大陆性季风气候,处于暖温带半湿润与半干旱气候的过渡地带,年均温度 6~13℃;多年平均降水量为 500~700 mm,其中 6-9 月份占 60%,多为短时暴雨,冬春降水较少;多年平均蒸发量为 1 000~1 200 mm。

1.2 数据来源与处理

遥感数据为 2000-2016 年每年的 5 月、16 d 合成的 250 m 空间分辨率的 MODIS 影像,来源于美国国家航空航天局网(<http://www.echo.nasa.gov/reverb/>)。2005 年 5 月中旬和 2010 年 5 月上旬的 10 cm 和 20 cm 农田土壤湿度旬值数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

数据预处理包括投影转换、数据合成、剪裁等。

1.3 土壤湿度遥感监测指数

1.3.1 PDI PDI 是 Ghulam 等^[5]基于植被-土壤二元组合在 NIR-Red 二维光谱特征空间中的分布规律提出的。由图 1 可知,直线 BC 为土壤线,直线 EF 为特征空间中过任意一点 E(R_{red} , R_{nir})做直线 BC 的平行线,点 E 到直线 L 的垂线距离大小可以表征地表土壤湿度的变化情况,即直线 EF 的距离越小,说明地表土壤湿度越大;反之亦然。越接近 L 线的空间越湿润,离 L 线越远的空间越干旱。其计算公式为:

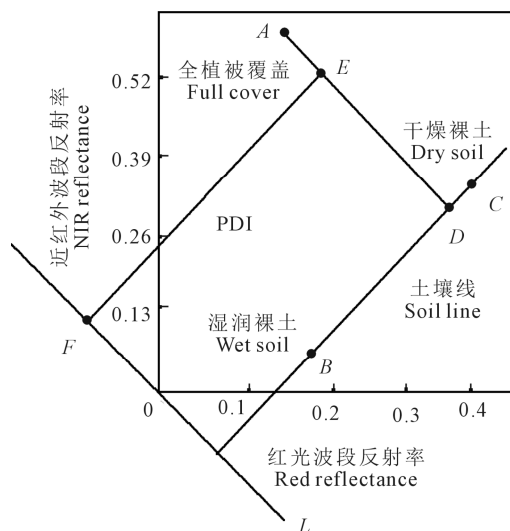


图 1 PDI 构建图

Fig.1 Scheme for PDI

$$PDI = (R_{\text{red}} + MR_{\text{nir}}) / \sqrt{(M^2 + 1)} \quad (1)$$

式中, R_{red} 、 R_{nir} 分别为红光和近红外波段的反射率, M 为土壤线 BC 的斜率。

1.3.2 SMMI SMMI 是刘英等^[14] 基于 NIR - Red 特征空间建立的土壤湿度监测指数, 该方法具有不依赖于土壤背景线而变化的优点。由图 2 可知, 直线 BC 为特征空间中的土壤线, B 、 C 分别为特征空间中的湿润裸土点和干燥裸土点, E 为空间中任意一点; 利用任意点 E 到坐标原点 O 距离的长短来表示土壤湿度的变化情况。即直线 OE 的距离越短表明土壤湿度越大, 直线 OE 的距离越长则表明土壤湿度越小, 也就是说地表越干旱。 OE 可表达为:

$$OE = \sqrt{(r_i^2 + r_j^2)} \quad (2)$$

式中, r_j 、 r_i 为 NIR - Red 光谱特征空间中红光和近红外波段的地表反射率。为了让 OE 的值位于 0 ~ 1 之间, 选择 OE/OD 的值作为土壤湿度表征指数, 由于 OD 的值为固定值 $\sqrt{2}$, 则构建的 SMMI 指数可表达为:

$$SMMI(i, j) = OE/OD = \sqrt{(r_i^2 + r_j^2)} / \sqrt{2} \quad (3)$$

1.3.3 MPDI MPDI 是 Ghulam 等^[6] 针对 PDI 在植被覆盖区监测精度会受到影响从而引入植被覆盖度 (F_v) 而提出的。MPDI 的物理意义是: 在 NIR - Red 特征空间中, 任意一点旱情都由 PDI 和垂直植被指数 (Perpendicular Vegetation Index, PVI) 两个因子共同决定, 土壤含水量越小则像元离坐标原点的距离就越远, MPDI 值越大, 旱情越严重, 反之亦然。其计算公式为:

$$MPDI = (R_{\text{red}} + M \times R_{\text{nir}} - F_v(R_{v, \text{red}} + M \times R_{v, \text{nir}})) / ((1 - F_v) \times \sqrt{(M^2 + 1)}) \quad (4)$$

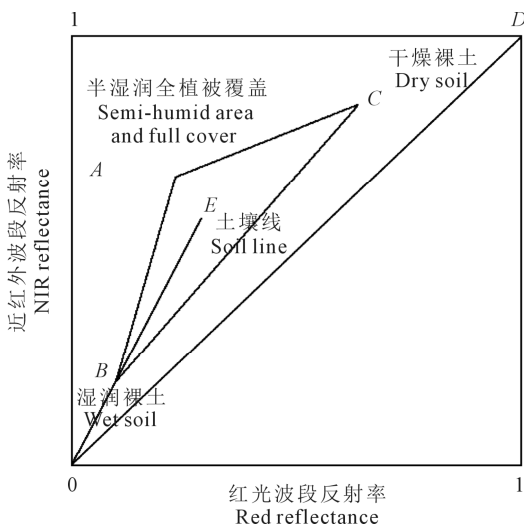


图2 SMMI 构建示意图

Fig.2 Scheme for SMMI construction

式中, R_{red} 、 R_{nir} 分别为红光和近红外波段的反射率, M 为土壤线斜率, F_v 是植被覆盖度。 $R_{v, \text{red}}$ 、 $R_{v, \text{nir}}$ 分别为植被在红光和近红外波段的反射率。其中, $R_{v, \text{red}}$ 、 $R_{v, \text{nir}}$ 可近似看成是经验值固定的参数, 分别取值 0.05 和 0.5。

1.3.4 MSMMI MSMMI 是刘英等在 SMMI 的基础上引入植被覆盖度 (F_v) 提出的。其表达式为:

$$MSMMI = 1 / \sqrt{2} (1 - F_v) \times \sqrt{(R_{\text{nir}} - F_v \times R_{v, \text{nir}})^2 + (R_{\text{red}} - F_v \times R_{v, \text{red}})^2} \quad (5)$$

式中, R_{red} 、 R_{nir} 分别为红光和近红外波段的反射率, M 为土壤线斜率, F_v 是植被覆盖度。 $R_{v, \text{red}}$ 、 $R_{v, \text{nir}}$ 分别为植被在红光和近红外波段的反射率。其中, $R_{v, \text{red}}$ 、 $R_{v, \text{nir}}$ 可近似看成是经验值固定的参数, 分别取值 0.05 和 0.5。

2 结果与分析

2.1 土壤湿度遥感监测指数精度验证

分别利用中国气象数据网下载的 2005 年 5 月中旬和 2010 年 5 月上旬 10 cm 和 20 cm 的农田土壤湿度旬值数据来验证四种土壤湿度监测方法的有效性。以土壤相对湿度数据为纵轴, PDI、MPDI、SMMI、MSMMI 分别为横轴, 构建不同深度土壤相对湿度与四种指数的相关性图 (图 3), 并计算其可决系数 (表 1)。从图 1 和表 1 可知, 四种土壤湿度监测指数均与不同深度土壤湿度呈负相关关系, 且均通过了 $P < 0.1$ 的显著性检验, 表明四种指数均可用于监测土壤湿度状况, 且 SMMI 和 PDI 两种指数的监测效果要优于 MPDI 和 MSMMI 的监测效果, 且四种指数监测 10 cm 深土壤湿度效果优于 20 cm。

2.2 关中平原地区旱情时空分布特征分析

鉴于四种土壤湿度监测指数对干旱程度划分标准不一致, 因此需要对四种指数分别进行尺度化, 使其值位于 [0, 1] 之间^[15]。以 SMMI 为例, 尺度化 S-SMMI 公式如下:

$$S-SMMI = (SMMI - SMMI_{\min}) / (SMMI_{\max} - SMMI_{\min}) \quad (6)$$

式中, $SMMI_{\min}$ 为 SMMI 累计频率置信度为 1% 时所对应的值; $SMMI_{\max}$ 为 SMMI 累计频率置信度为 99% 时所对应的值。

依据一定标准对土壤湿度进行等级划分: ① 0 ~ 0.2 为极湿润; ② 0.2 ~ 0.4 为湿润; ③ 0.4 ~ 0.6 为正常; ④ 0.6 ~ 0.8 为干旱; ⑤ 0.8 ~ 1 为极干旱。由表 1 可知, SMMI 与实测土壤湿度的相关性系数最高, 因

表 1 2005 年和 2010 年实测土壤湿度与
四种指数间可决系数 (R^2)

Table 1 Coefficients of correlation between soil moisture
and four indexes in 2005 and 2010

土壤湿度监测指数 Soil moisture detection index	2005		2010	
	10 cm	20 cm	10 cm	20 cm
PDI	0.6031	0.1806	0.4818	0.1823
MPDI	0.4047	0.1119	0.2771	0.1213
SMMI	0.6378	0.1959	0.5420	0.2109
MSMMI	0.4045	0.1118	0.2807	0.1239

此利用 SMMI 对关中平原地区长时间序列旱情进行监测(图 4)。

由图 4 可知,关中平原东北部、东部、中部旱情较为严重,西南部、南部、西部部分地区旱情较轻。关中平原南部以秦岭为延伸的细带状分布的区域土壤湿度最高;北部、西部、东部边缘地带零星分布着湿润区域,这是因为秦岭是关中平原植被覆盖度最高的区域,边缘地带也多有山脉环绕,土壤含水量及持水能力较高,旱情较少发生。关中平原的岐山县、扶风县等西部地区及蒲城县、澄城县等东部地区旱情较为严重,极湿润、湿润及正常区域分布其中,这是因为平原西部及东部地区多为耕地及建筑区域,地表植被覆盖度较低及不断发生变化,因而土壤湿度较低。从旱情发生频率来说,关中平原东部的富平县、临渭区以及西部的岐山县、扶风县等是极度干旱多发区,17 年间有超过一半的年份为

极干旱。位于关中平原西南角的风县和太白县是旱情低发区,其中太白县 17 年间基本没有旱情发生,这主要是由于太白县和凤县处于秦岭地带,地表植被覆盖度高,土壤含水量以及储水能力高。

对比不同年份干旱面积比例,局部极干旱、大面积干旱主要发生在 2000 年 5 月、2001 年 5 月、2003-2005 年 5 月、2007 年 5 月、2009 年 5 月、2010 年 5 月、2014 年 5 月、2016 年 5 月,其中旱情最严重的为 2004 年 5 月,受旱总面积比例高达 61.53%;极干旱情况最严重的为 2010 年 5 月,达到了 22.86%;2006 年 5 月、2008 年 5 月、2011 年-2013 年 5 月、2015 年 5 月旱情状况有所缓解,其中 2002 年 5 月基本上没有旱情发生。

2.3 影响因素分析

影响旱情的因素有自然、人文等因素,本文主要分析月平均气温和月降水量两个气象因素与旱情之间的关系。利用克里金插值法得到 SMMI 与月平均气温、月降水量的相关系数大小,通过查寻相关性系数临界表,当 $P>0.05$ 时,临界值为 0.497,当 $P>0.1$ 时,临界值为 0.426,因此将相关系数等级划分为:① <-0.497 ;② $-0.497\sim-0.426$;③ $-0.426\sim 0$;④ $0\sim 0.426$;⑤ $0.426\sim 0.497$;⑥ >0.497 。

由图 5a 和表 2 可知,SMMI 与月降雨量相关系数为负的区域所占比例为 74.34%,说明降水量越大,土壤湿度越高,旱情越轻;反之亦然。其中,关中

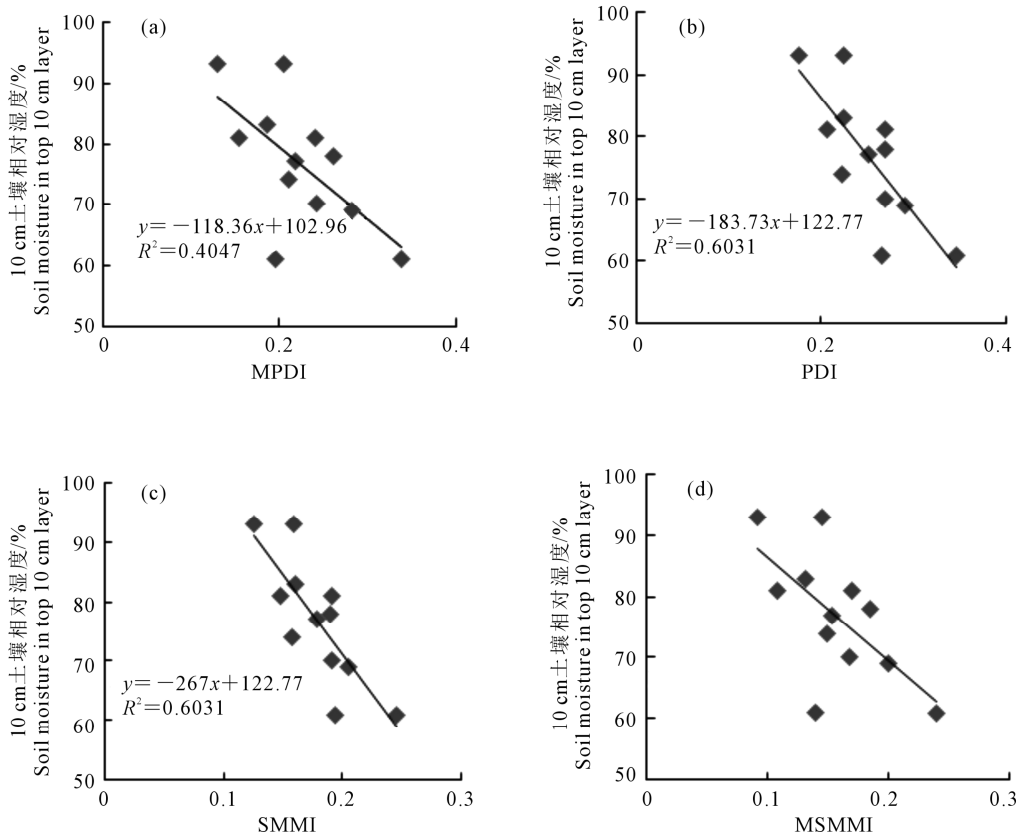


图 3 2005 年 5 月中旬 10 cm 深土壤湿度与 MPDI、PDI、SMMI、MSMMI 相关性

Fig.3 The correlation between soil moisture and MPDI, PDI, SMMI and MSMMI in top 10 cm layer in the mid-May of 2005

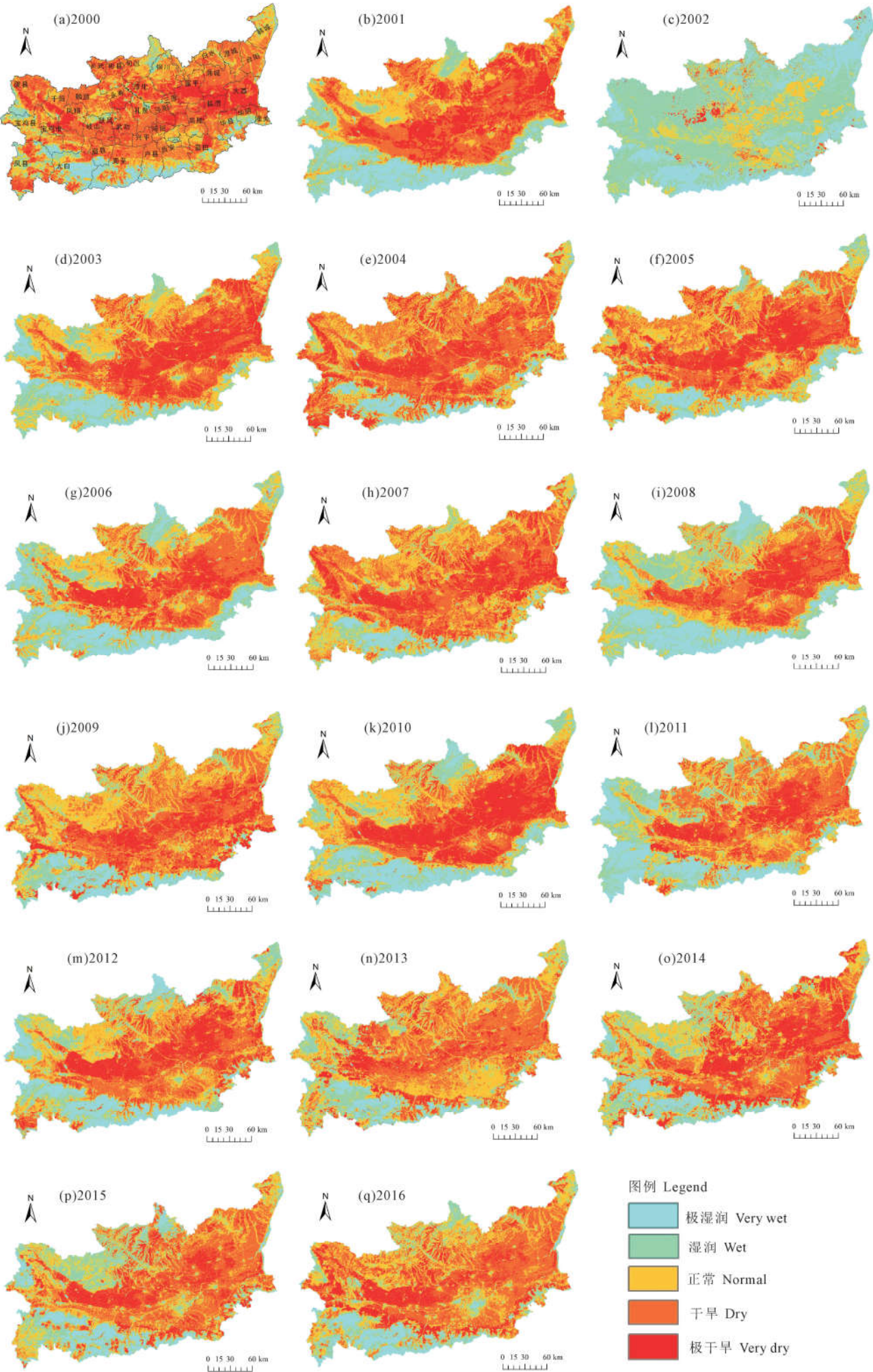


图 4 2000–2016 年干旱等级分布图

Fig.4 Drought distribution map during 2000–2016

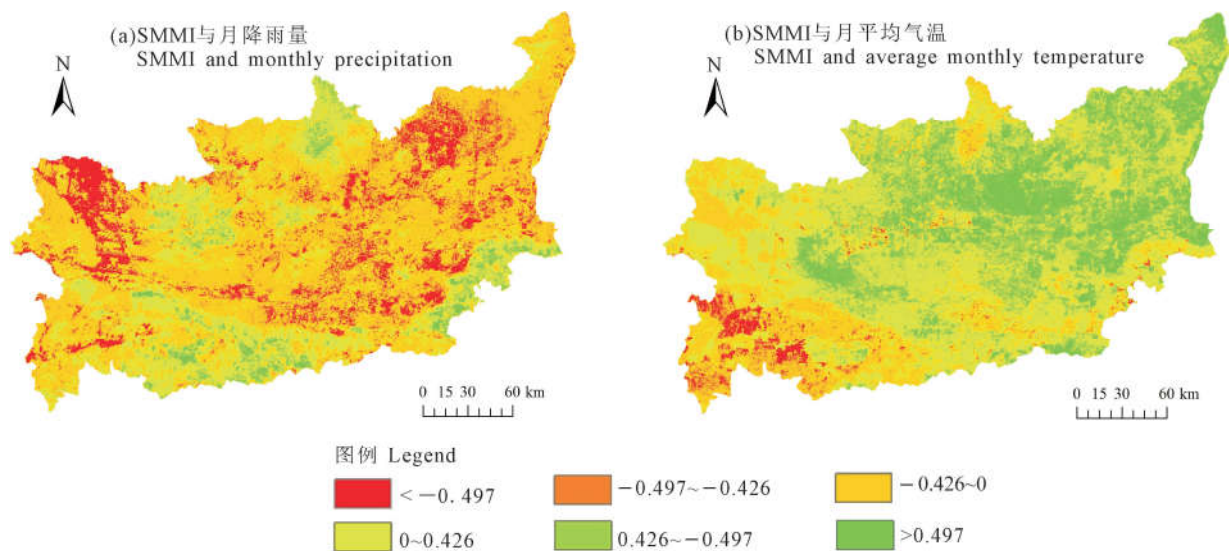


图 5 SMMI 与气象因子相关性系数图

Fig.5 Coefficient of correlation between SMMI and meteorological factors

表 2 2000–2016 年 SMMI 与月降水量、月平均气温的相关系数等级分布/%

Table 2 The correlation coefficient of SMMI and monthly precipitation and average monthly temperature in 2000–2016 years

相关系数等级 Relational coefficient level	SMMI 与月 降水量分布 SMMI and monthly precipitation distribution	SMMI 与月平 均气温分布 SMMI and average monthly temperature distribution
<-0.497	9.83	1.76
-0.497~-0.426	7.43	1.72
-0.426~0	57.08	20.86
0~0.426	22.12	48.30
0.426~0.497	1.69	10.58
>0.497	1.85	16.78

及受旱面积进行了动态监测,并对四种指数的应用性、有效性进行了评价。主要结论为:(1)从四种指数与实测土壤湿度相关性来看,SMMI 监测效果最好,PDI 略低于 SMMI,MPDI 和 MSMMI 的监测效果基本相同但都低于 SMMI 和 PDI;四种指数监测 10 cm 深土壤湿度效果优于 20 cm。(2)空间上,关中平原东部、中部、西部部分地区旱情严重,西南部旱情较轻;时间及旱情发生频率上,关中平原地区旱情呈以 2~3 a 的间隔年际波动显著的特征,且关中平原东部的富平县、临渭区以及西部的岐山县、扶风县等是重旱的多发区,位于平原西南角的风县和太白县是旱情低发区。(3)SMMI 与月平均气温两者呈正相关关系的面积占 75.66%,主要集中在岐山县、扶风县等西部地区和淳化县、富平县等平原东北部地区;SMMI 与月降水量呈负相关关系的面积占 74.34%,主要分布于陇县、千阳县等西北部地区和白水县、澄城县等平原东北部地区。

农业干旱是造成农业减产的最大影响因素之一,从成因及变化趋势上来看,受多种因素的制约,这些因素既包括农作物本身对干旱的耐受性,也包括周边环境对干旱的耦合性^[16–19]。因此,在干旱监测中可根据作物不同生长期及不同下垫面环境具体分析^[20–21]。关中平原下垫面复杂,既有平原也有山区,农作物生长受到气候、海拔、温度、降雨等多种因子的影响,因此旱情分区可能出现偏差,另外由于地面监测站的不连续和点数据的影响,在精度验证上以点带面误差难以避免,因此在未来监测验证中需要寻求误差较小的实测点来验证。同时,根

平原陇县、千阳县等西北部地区和白水县、澄城县等平原东北部地区的干旱情况受降水量的影响呈正相关关系,且通过 $P<0.1$ 显著性检验。由图 5b 和表 2 可知,SMMI 与月平均气温呈正相关关系区域所占比例为 75.66%,表明气温越高,旱情越严重;反之亦然。其中,关中平原岐山县、扶风县等中部地区和淳化县、富平县等平原东北部地区的干旱情况受气温的影响呈负相关关系,且通过了 $P<0.1$ 显著性检验。总体上,关中平原旱情与降雨量呈负相关关系,与温度呈正相关关系,但通过 90% 显著性检验区域分别仅占总面积的 27.36%、17.26%,说明降雨和温度不是旱情变化主导因子。

3 结论与讨论

以关中平原为研究区,基于 MODIS 数据采用四种不同的土壤湿度监测指数对平原的旱情状况以

据土地利用类型、海拔、水网分布等具体分析下垫面环境状况,可以有效提高监测精度。也有学者认为,集成多种监测指数的旱情预报系统是未来的主流发展方向^[22-23]。在未来工作中可以尝试基于多源多传感器数据联合集成旱情监测指数的农业干旱监测和预报方法的构建和应用。

参考文献:

- [1] Liu Y, Wu L X, Yue H. Biparabolic NDVI-Ts space and soil moisture remote sensing in an arid and semi arid area [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2015, 41(3):159-169.
- [2] 孙灏,陈云浩,孙洪泉.典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J].农业工程学报,2012, 28(14):147-154.
- [3] 蒋友严,韩涛,徐燕,等.基于多源卫星数据的3种干旱遥感监测效果比较[J].干旱地区农业研究,2014,32(2):47-51.
- [4] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12):1541-1552.
- [5] Ghulam A, Qin Q M, Zhan Z M. Designing of the perpendicular drought index [J]. Environmental Geology, 2007, 52(6):1045-1052.
- [6] Ghulam A, Qin Q M, Teyip T, et al. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2007, 62(2):150-164.
- [7] Qin Q M, Ghulam A, Zhu L, et al. Evaluation of MODIS derived perpendicular drought index for estimation of surface dryness over northwestern China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(7):1983-1995.
- [8] Shahabfar A, Ghulam A, Eitzinger J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2012, 18(1):119-127.
- [9] Shahabfar A, Ghulam A, Conrad C. Understanding hydrological repartitioning and shifts in drought regimes in Central and South-West Asia using MODIS derived perpendicular drought index and TRMM data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(3):983-993.
- [10] Chen N C, Li J Z, Zhang X. Quantitative evaluation of observation capability of GF-1 wide field of view sensors for soil moisture inversion [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1):199-203.
- [11] Zhang L F, Jiao W Z, Zhang H M, et al. Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 190:96-106.
- [12] 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, 86:1-21.
- [13] 姚云军,秦其明,赵少华.基于MODIS短波红外光谱特征的土壤含水量反演[J].红外与毫米波学报,2011,30(1):9-14.
- [14] 刘英,吴立新,马保东.基于TM/ETM+光谱特征空间的土壤湿度遥感监测[J].中国矿业大学学报,2013,42(2):296-301.
- [15] 刘英,吴立新,岳辉,等.基于尺度化SMMI的神东矿区土壤湿度变化遥感分析[J].科技导报,2016,34(3):78-84.
- [16] 王鹏新,孙威.基于植被指数和地表温度的干旱监测方法的对比分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):319-323.
- [17] 张学艺,李剑萍,秦其明,等.几种干旱监测模型在宁夏的对比应用[J].农业工程学报,2009,25(8):18-23.
- [18] 杨绍镠,闫娜娜,吴炳方.农业干旱遥感监测研究进展[J].遥感信息,2010,(1):103-109.
- [19] 孙丽,裴志远,马尚杰,等.基于多种卫星的县级尺度干旱监测指数比较——以河北玉田县为例[J].地理与地理信息科学,2014,30(4):46-50.
- [20] 宋扬,房世波,卫亚星.农业干旱遥感监测指数及其适用性研究进展[J].科技导报,2016,34(5):45-52.
- [21] Sun L, Wu Q, Pei Z, et al. Study on drought index in major planting area of winter wheat of China[J]. Sensor Letters, 2012, 10(1):453-458.
- [22] 李菁,王连喜,沈澄,等.几种干旱遥感监测模型在陕北地区的对比和应用[J].中国农业气象,2014,35(1):97-102.
- [23] 杜灵通,田庆久,王磊,等.基于多源遥感数据的综合干旱监测模型构建[J].农业工程学报,2014,30(9):126-132.