

# 基于SWAT模型的渭河流域干旱时空分布

赵安周<sup>1,2,3</sup>, 刘宪锋<sup>1,2</sup>, 朱秀芳<sup>1,2\*</sup>, 潘耀忠<sup>1,2</sup>, 李宜展<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学资源学院, 北京 100875;  
3. 河北工程大学资源学院, 河北 邯郸 056038)

**摘要:**以渭河流域为例,从流域水文循环的角度出发,在SWAT(Soil and Water Assessment Tool)分布式水文模型和Palmer干旱指数(Palmer Drought Severity Index)原理的基础上提出了干旱分析模型SWAT-PDSI,对渭河流域干旱的时空演变规律和发生频率进行了分析。研究表明:①经率定和验证的SWAT模型能够较好地模拟渭河流域的水文变化过程;②利用SWAT-PDSI对典型干旱事件(1995年干旱)的评估结果显示,该模型能较好地反映渭河流域干旱的时空差异和变化规律;③渭河流域、渭河干流和泾河流域均表现为变干的趋势,而北洛河流域表现为变湿的趋势,但均未通过95%的置信水平检验;④渭河流域多数子流域的SWAT-PDSI多年平均值处于-1~1,说明该流域多数地区处于正常状态;⑤渭河流域北部的北洛河流域和泾河流域的上游地区易发生干旱,发生中等以上、严重以上和极端干旱事件的频率最高。

**关键词:**SWAT模型;PDSI;干旱评价;渭河流域

## 1 引言

干旱是一种严重的自然灾害,也是最复杂、对人类危害较大的一种自然灾害,严重阻碍了人类社会经济的可持续发展,分析干旱发生的时空分布规律和发生频率对于流域社会经济的发展具有重要意义(Dai et al, 2004; He et al, 2011; 韩兰英等, 2014)。然而,干旱的形成是一个缓慢的过程,其影响因素众多,不仅与降水有关,还与地区的温度、土壤类型、作物类型以及水资源开采等众多因素密切相关(Agboma et al, 2009; Al-Qinna et al, 2011)。而目前对于干旱的评估多采用干旱形成的某一因素或旱情表现的某一特征,很难从客观上反映干旱形成的复杂性和影响的广泛性,且对旱情的地区差异、时间演变等过程刻画不足(许继军等, 2010)。

目前已有许多干旱评价方法被用于评价区域

干湿特征,其中PDSI(Palmer Drought Severity Index)自1965年由Palmer建立以来,由于其在不同地区之间的良好可比性,已被广泛用来评价全球多个国家和地区的干旱事件以及干旱发生的频率(Palmer, 1965; 张永等, 2007; Wu et al, 2010; Hua et al, 2011; 陈峰等, 2011)。该指数不仅可以用来表示流域或地区的干湿程度,而且可以直接比较不同地区之间的水分条件差异。然而,PDSI通常采用传统的两层土壤模型来计算水量平衡,并没有考虑土壤的空间异质性、地表覆盖类型以及地形条件等下垫面性质对流域水文过程的影响(Dai et al, 2004; Zhang et al, 2013);同时,PDSI的计算往往依赖于气象站点的空间分布以及降水、气温、土壤含水量等长时间序列数据,而中国的许多地区气象站点分布不均且无法获取大尺度的、长时间序列的土壤含水量等观测数据,因此以往的一些研究往往采用单个站点

收稿日期:2015-02;修订日期:2015-04。

基金项目:国家自然科学基金青年项目(41401479);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130003120041);北京师范大学自主科研基金项目(2013YB74)。

作者简介:赵安周(1985-),男,河北邯郸人,博士,主要研究方向为水资源对气候变化和土地利用的响应及其干旱评价,  
E-mail: zhaoanzhou@126.com。

通讯作者:朱秀芳(1983-),女,浙江天台人,副教授,主要研究方向为土地利用/覆盖和气候变化的响应关系,  
E-mail: zhuxiufang@bnu.edu.cn。

引用格式:赵安周, 刘宪锋, 朱秀芳, 等. 2015. 基于SWAT模型的渭河流域干旱时空分布[J]. 地理科学进展, 34(9): 1156-1166. [Zhao A Z, Liu X F, Zhu X F, et al. 2015. Spatiotemporal patterns of droughts based on SWAT model for the Weihe River Basin[J]. Progress in Geography, 34(9): 1156-1166.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2015.09.008

的土壤含水量数据来代替整个区域,限制了PDSI指数的估算精度(徐宗学等, 2010; 陈昱潼等, 2014)。SWAT分布式水文模型能弥补这一缺陷,它通过考虑下垫面的土地利用/覆盖、土壤条件等,进行流域水文过程模拟,进而得到大尺度区域各个子流域的地表径流、潜在蒸散发、实际蒸散发、土壤水等计算PDSI所需要的水文气象循环要素(Xu et al, 2009)。因此,与传统的两层土壤模型相比,利用SWAT模型模拟的水文要素计算PDSI可得到更精确的结果,从而为干旱发生频率及其时空分布分析提供新的方法思路和数据基础(Yan et al, 2013)。

鉴于此,本文以中国西北地区湿润和干旱区过渡地带的渭河流域为例,从水文循环视角出发,综合利用SWAT分布式水文模型和Palmer干旱模型,构建渭河流域干旱评价指标SWAT-PDSI,并对流域干旱频率的变化及其时空分布特征进行全面分析,以期干旱指数计算方法提出新的思路,同时也为评估渭河流域干旱的演变规律提供科学依据。

## 2 研究区概况

渭河发源于甘肃鸟鼠山,流经天水、宝鸡、咸阳、西安等地区,在陕西省潼关县汇入黄河,全长818 km,是黄河的第一大支流(图1)。该流域界于 $104^{\circ}00' \sim 110^{\circ}20' \text{E}$ ,  $33^{\circ}50' \sim 37^{\circ}18' \text{N}$ 之间,流域面积 $134800 \text{ km}^2$ ,海拔高度319~3929 m,泾河和北洛河为其两个主要支流。整个流域地势西高东低,北部为黄土高原,南部为秦岭山脉。渭河流域属大陆性气候,冬季寒冷少雨,夏季炎热多雨,年平均气温为

$7.8 \sim 13.5^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为500~800 mm,年降水量的65%集中在6-10月,蒸发较为强烈,陆面蒸发量为500 mm,水面蒸发量为660~1600 mm(He et al, 2009; 左德鹏等, 2011)。

## 3 数据和方法

### 3.1 数据来源

气象数据为渭河流域及其周边22个气象站点1970-2012年的逐日降水、最高/最低气温、相对湿度、风速数据,以上数据来源于中国气象科学数据共享服务网;DEM数据( $90 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ )、土地利用/覆盖数据(1:1000000)和土壤数据(1:1000000)分别来源于国际科学数据共享平台、寒区旱区科学数据中心以及和谐世界土壤数据库。另外,用于模型率定和验证的华县、咸阳、林家村和魏家堡4个水文站的月径流数据来源于黄河水利委员会和中华人民共和国水文年鉴,时间段为1970-1990年。

### 3.2 研究方法

#### 3.2.1 SWAT模型

SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是一个分布式水文模型,是美国农业部农业研究局在CREAMS(Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)和SWRRB(Simulator for Water Resources in Rural Basins)模型的基础上发展起来的(Neitsch et al, 2011)。该模型可以依据DEM数据、土地利用数据、土壤数据等将研究区域划分为多个只包含一种土地利用类型和土壤类型的水文响应单元(HRU)。由于该模型可模拟流域水循环中几乎所有的水文过程,因此在全球许多国家和地区得到了广泛的应用(冯夏清等, 2010; Chen et al, 2013; Naramngam et al, 2013)。

#### 3.2.2 模型评价指标

模型的率定和验证采用SWAT-CUP的SUFI-2算法(Abbaspour, 2007)。同时,本文采用决定系数 $R^2$ 、Nash-Sutcliffe效率系数( $E_{\text{NS}}$ )和相对误差( $Re$ )来评价SWAT模型的适用性,具体的计算公式参照Freer等(1996)、Krause等(2005)已有文献。

其中, $R^2$ 表示模拟值与实测值变化趋势的一致性,其值越接近1,表明模拟值与实测值趋势越吻合,通常将 $R^2 > 0.6$ 作为实测值和模拟值相关程度的

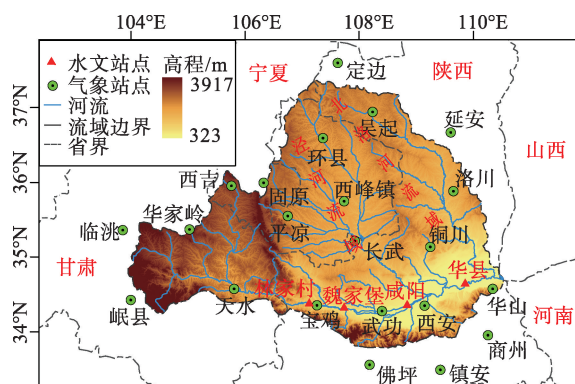


图1 渭河流域位置和气象站点、水文站点分布

Fig.1 Study area and distribution of meteorological and hydrological stations

标准。 $E_{NS}$ 表示实测值与模拟值的偏离程度,值越接近1,表明模拟值和实测值的偏离程度越小;当 $E_{NS} \leq 0.36$ 时,认为模拟效果不好;当 $0.36 < E_{NS} < 0.75$ 时,认为模拟效果令人满意;当 $E_{NS} \geq 0.75$ 时,认为模拟的结果好(Motovilov et al, 1999; Geza et al, 2008)。

### 3.2.3 基于SWAT模拟结果的PDSI干旱模式的构建

#### (1) 水量平衡各分量的计算

由于临洮、岷县等9个气象站点位于流域外,因此利用处于渭河流域内的天水、平凉、西吉、宝鸡、长武、西峰、武功、西安、铜川、环县、华县、洛川、吴起等13个气象站点所在子流域的气象水文参数计算水量平衡所需要的水文帐,其所需参数的来源及其具体的计算过程如表1所示。

#### (2) 水分距平指数的计算

根据Palmer原理,利用表1中的潜在蒸散发、实际蒸散发等水文要素计算蒸散系数、补水系数、径流系数、失水系数以及气候特征系数,然后计算得到适宜蒸散发、气候适宜补水量、气候适宜径流量、气候适宜失水量及气候适宜降水量,具体的计算方法可参考相关文献(Palmer, 1965; 史晓亮, 2013)。

根据实际降水量( $P$ )减去适宜降水量( $\hat{P}$ )得到水分距平( $d$ ),进而将水分距平值和气候特征系数( $k^*$ )相乘得到水分距平指数( $Z$ ),具体计算公式为:

$$d = P - \hat{P} \quad (1)$$

$$Z = d \times k^* \quad (2)$$

表1 水量平衡所需水文帐的计算过程

Tab.1 Calculation equation of each water budget item

水文要素	来源及计算公式
$PET_i$ (第 <i>i</i> 个月的潜在蒸散发)	由SWAT模型直接输出
$ET_i$ (第 <i>i</i> 个月的实际蒸散发)	由SWAT模型直接输出
$SW_{i-1}$ (月初土壤含水量)	由SWAT模型直接输出
$SW_i$ (月初末土壤含水量)	由SWAT模型直接输出
$RO_i$ (实际地表径流)	由SWAT模型直接输出
$AWC_i$ (田间有效持水量)	参考联合国粮农组织(FAO)和维也国际应用系统研究所(IIASA)构建的世界和谐土壤属性数据库得到
$PR_i$ (可能补水量)	$PR_i = AWC - SW_{i-1}$
$R_i$ (实际补水量)	$R_i = \max(0, (SW_i - SW_{i-1}))$
$PRO_i$ (可能径流量)	$PRO_i = AWC - PR_i = SW_i$
$L_i$ (实际失水量)	$L_i = \max(0, (SW_{i-1} - SW_i))$
$PL_i$ (可能失水量)	$PL_i = \min(PET_i, SW_{i-1})$

式中:水分距平指数 $Z$ 表示流域水分的亏缺情况,若 $Z < 0$ ,表明流域处于干旱状态,反之表明流域处于湿润状态。

#### (3) 干旱指标的初步确定

由于上述得到的水分距平指数 $Z$ 并未考虑对旱情持续时间的影响因子,因此不适合直接用于评价干旱,需要确定一个指标来明确干旱程度与水分距平、干旱持续时间之间的关系(许继军等, 2010)。为进一步定量描述某个地区或流域的干湿程度,Palmer制定了指数值( $x$ )来定量描述干湿等级(表2)。

对流域内13个气象站点逐月的水分距平指数 $Z$ 进行计算,假设这些干旱持续的时间为极端干旱( $x_i = -4$ ),同时 $x_i = -3, -2$ 和 $-1$ 分别表示严重、中等和轻微干旱,由此可确定干旱指标 $x$ 与水分距平值 $Z$ 和持续时间 $t$ 之间的函数关系,计算公式为:

$$x_i = \sum_{t=1}^i Z_t / (13.303t + 24.988) \quad (3)$$

#### (4) 建立Palmer指数干旱计算公式

$$x_i = \frac{Z_i}{38.291} + 0.653x_{i-1} \quad (4)$$

#### (5) 修订Palmer指数干旱计算公式

式(4)根据流域内的13个气象站点所在的子流域建立,并不一定适用于其他的子流域,通过调整权重因子后,修订后的渭河流域干旱基本模式的计算公式如下:

$$Z_i = K \times d_i \quad (5)$$

$$K = \frac{169.59}{\sum_{i=1}^{12} DK'} K' \quad (6)$$

$$K' = 1.672 \lg \left( \frac{\overline{PE} + \bar{R} + \overline{RO}}{(\bar{P} + \bar{L})/D} \right) + 3.858 \quad (7)$$

式中: $K$ 为调整后的权重因子, $K'$ 为 $k^*$ 的估计值, $\bar{D}$ 为 $d$ 的绝对值平均; $\frac{\overline{PE} + \bar{R} + \overline{RO}}{(\bar{P} + \bar{L})}$ 为一个地区某个

月份平均水分需求与水分供给的比值; $\overline{PE}$ 、 $\bar{R}$ 、

表2 PDSI干湿等级划分

Tab.2 Dryness / wetness classification of PDSI

指数值( $x$ )	等级划分	指数值( $x$ )	等级划分
$\geq 4$	极端湿润	$-1 \sim -1.99$	轻微干旱
$3.00 \sim 3.99$	严重湿润	$-2.00 \sim -2.99$	中等干旱
$2.00 \sim 2.99$	中等湿润	$-3.00 \sim -3.99$	严重干旱
$1.00 \sim 1.99$	轻微湿润	$\leq -4$	极端干旱
$-0.99 \sim -0.99$	正常		



$\overline{RO}$ 、 $\overline{P}$  和  $\overline{L}$  分别为多年月平均潜在蒸散发、实际补水量、径流、降水量和实际失水量。

式(4)和(5)即为本文基于 SWAT 模型的输出结果和 Palmer 干旱模式原理建立的 SWAT-PDSI 干旱评估模型的数学表达式。

4 结果与分析

4.1 SWAT 模型在渭河流域径流模拟中的适用性

渭河流域月径流模拟的水文过程、精度评价指标的分析结果如图 2 和表 3 所示。从精度评价指标

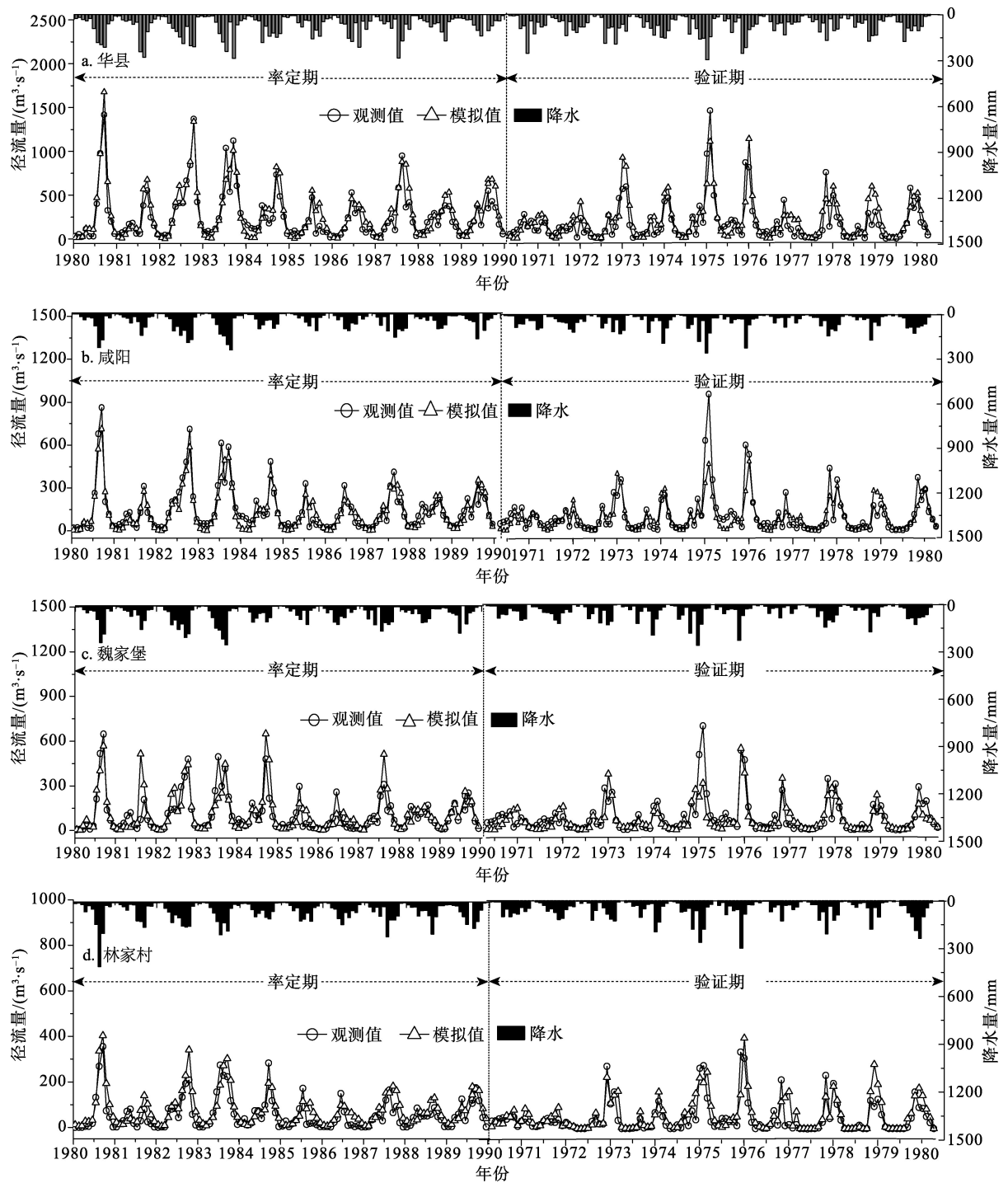


图2 渭河流域4个水文站点月径流的率定期和验证期的模拟结果

Fig.2 Results of the observed and simulated discharges of four main hydrometric stations located in the Weihe River Basin during the calibration and validation period



表3 渭河流域4个水文站月径流模拟评价指标  
Tab.3 Results of monthly runoff simulation of four main hydrometric stations

	率定期			验证期		
	Re/%	R <sup>2</sup>	E <sub>NS</sub>	Re/%	R <sup>2</sup>	E <sub>NS</sub>
华县站	10.07	0.85	0.83	12.38	0.68	0.70
咸阳站	-9.09	0.86	0.82	-11.70	0.68	0.67
魏家堡	12.65	0.67	0.60	-15.74	0.61	0.65
林家村	16.19	0.75	0.61	34.26	0.65	0.45

看,上游魏家堡站和林家村站在率定期(1981-1990年)的 $Re$ 分别为12.65%和16.19%,验证期(1971-1980年) $Re$ 分别为-15.74%和34.26%;下游和中游的华县站和咸阳站在率定期(1981-1990年)的 $Re$ 分别为10.07%和-9.09%,验证期间(1971-1980年)的 $Re$ 分别为12.38%和-11.70%;4个站点在率定期和验证期的 $R^2$ 都大于0.60, $E_{NS}$ 系数除了在验证期的林家村站外,其他站点的值均大于0.60, $Re$ 除了验证期的林家村站为34.26%,其余均小于20%,表明模拟的效果较好。林家村站位于宝鸡峡附近,受农业灌溉用水的影响, $Re$ 值较大,模拟的精度较差;华县站和咸阳站的 $R^2$ 和 $E_{NS}$ 的值都较大,率定期的值在0.80以上,验证期的值也接近0.70, $Re$ 较小,模拟的精度较高。从评价指标的值和月径流模拟结果来看,4个水文站的径流模拟精度都较高,可以描述模拟时段渭河流域的径流变化过程。

## 4.2 干旱评价指标的验证

### 4.2.1 干旱事件过程的验证

利用式(4)和(5)计算得到渭河流域1972-2012

年逐月的干旱指标SWAT-PDSI,同时采用Zhao等(2010)计算的1979-2008年生长季的PDSI指数对其进行验证,进而评价本文所构建干旱指数的合理性(图3)。从图中可以看出,本文构建的SWAT-PDSI值在1979-2008年的变化趋势与Zhao等(2010)计算的PDSI的变化趋势基本相同,二者的决定系数 $R^2=0.61$ ,表明本文建立的SWAT-PDSI可以基本反映渭河流域干旱的时间变化趋势。

### 4.2.2 典型干旱年份旱情发展的空间分布验证

为进一步验证基于SWAT模型建立的干旱评价指标在空间上的合理性,本文选取典型的干旱年份来分析渭河流域干旱发生的空间演变特征。相关文献中记载(杨新等,1997;余优森等,1997),渭河流域在1995年出现了一场特大干旱,关中地区和渭北地区的23个县降水量较常年偏少50%~70%,陇东、天水地区的降水也较往年为少,流域的夏秋粮食作物减产。由于冬季、春季降水偏少,陕西、甘肃的大部分地区春季土壤相对湿度只有50%左右,到5月底,旱情进一步发展,陕北地区的冬小麦生长受到抑制;6月份的土壤相对湿度仅仅为20%~30%,多数地区春夏播种困难;7月中旬-8月,降水逐渐偏多,陕北地区的旱情得到缓解,但是关中地区的旱情依然存在,这一情况持续到秋季;9-11月的秋旱不仅使得玉米等秋粮的生长受到抑制,而且对关中地区冬小麦的播种造成了极大的影响。

本文采用SWAT模型构建的干旱评价指标对渭河流域1995年期间的干旱的空间发展模式进行了评价(图4)。从图中可以看出,从3月开始,渭河

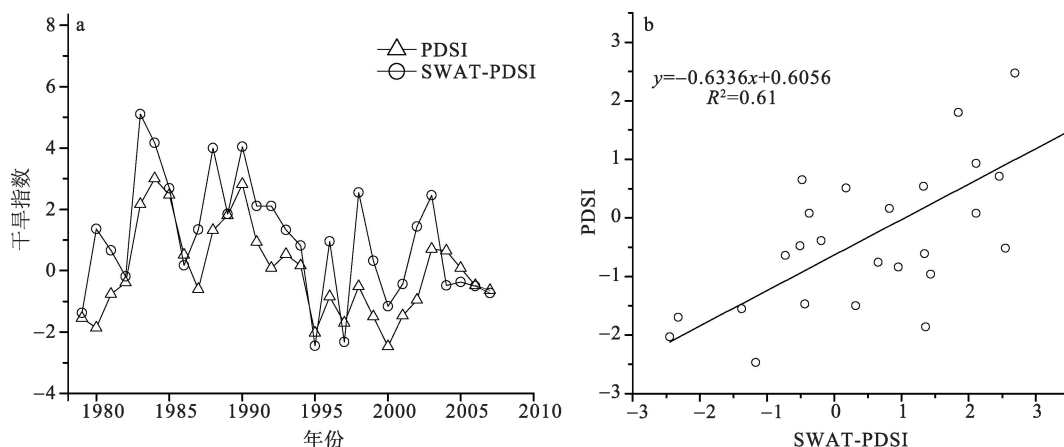


图3 1979-2008年渭河流域SWAT-PDSI和生长季的PDSI的历年变化与散点图

Fig.3 Trend of SWAT-PDSI, and annual average PDSI scatter diagram in the growing season in the Weihe River Basin, 1979-2008

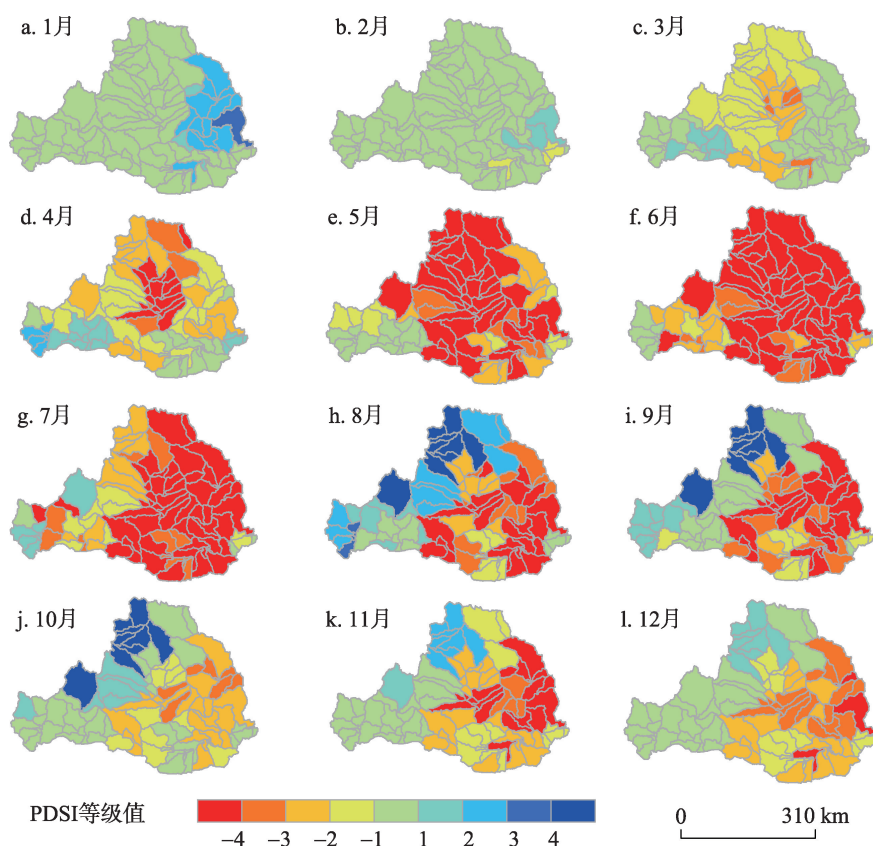


图4 基于 SWAT-PDSI 的渭河流域 1995 年干旱逐月演变过程

Fig.4 Monthly distribution of drought grades based on SWAT-PDSI in the Weihe River Basin in 1995

流域的中部地区开始出现干旱,多数子流域为轻度 and 中度干旱;4月干旱的范围和强度开始扩大,流域的下游地区为轻微干旱和中等干旱,中游的西峰市附近地区开始出现极端干旱;5-7月,整个流域除了上游个别子流域外,都发生了不同程度的干旱事件,中下游大片地区已经发展到严重干旱;8-9月,干旱程度有所缓解,流域西北部地区的旱情得到缓解,但关中平原地区的旱情仍在持续;10-12月,干旱程度较前几个月得到了一定程度的缓解,但流域下游的大片地区仍处于中等干旱,尤其是11月,渭南、铜川附近的地区处于严重甚至极端干旱。总体来看,基于 SWAT 模型建立的干旱评价指标的空间分布与上述已有文献记载的渭河流域实际的旱情结果相符。

### 4.3 渭河流域干旱时空变化特征

#### 4.3.1 干旱指数的时间变化

1972-2012 年渭河流域及其子流域的 SWAT-PDSI 逐年变化趋势见图 5。从图 5 中可见,渭河流域、渭河干流和泾河流域的 SWAT-PDSI 均呈下降趋势,降速分别为  $-0.26/10\text{ a}$ 、 $-0.32/10\text{ a}$  和  $-0.21/10\text{ a}$ ,表

明以上区域表现为变干趋势;采用 Mann-Kendall 检验方法对其进行检验(Tesemma et al, 2010),得到其统计值  $Z$  分别为  $-1.433$ 、 $-1.736$  和  $-0.874$ ,均未通过 95%置信水平检验。相反,北洛河流域的 SWAT-PDSI 的统计值  $Z$  为  $0.058$ ,呈不显著增加的趋势,增速为  $0.008/10\text{ a}$ 。

渭河流域及其支流的干旱等级统计结果见表 4。从表 4 可见,泾河流域的干旱发生频率最高;渭河干流发生干旱的频率最低,其原因可能存在于以下两个方面:①从地形角度来看,泾河流域的地貌类型以黄土地貌为主,该流域为整个渭河流域水土流失最严重的地区,同时也是黄河泥沙的主要来源地;②从气候角度来看,泾河流域为半湿润一半干旱的过渡地带,降水主要集中在夏季且暴雨较多,并不易储存。

#### 4.3.2 干旱指数的空间变化

1972-2012 年渭河流域 SWAT-PDSI 的空间分布如图 6 所示。从图中可以看出,多数子流域干旱指标的值处于  $-1\sim 1$ ,表明渭河流域多数地区处于正常状态。从其空间变化趋势来看,渭河流域整体上经

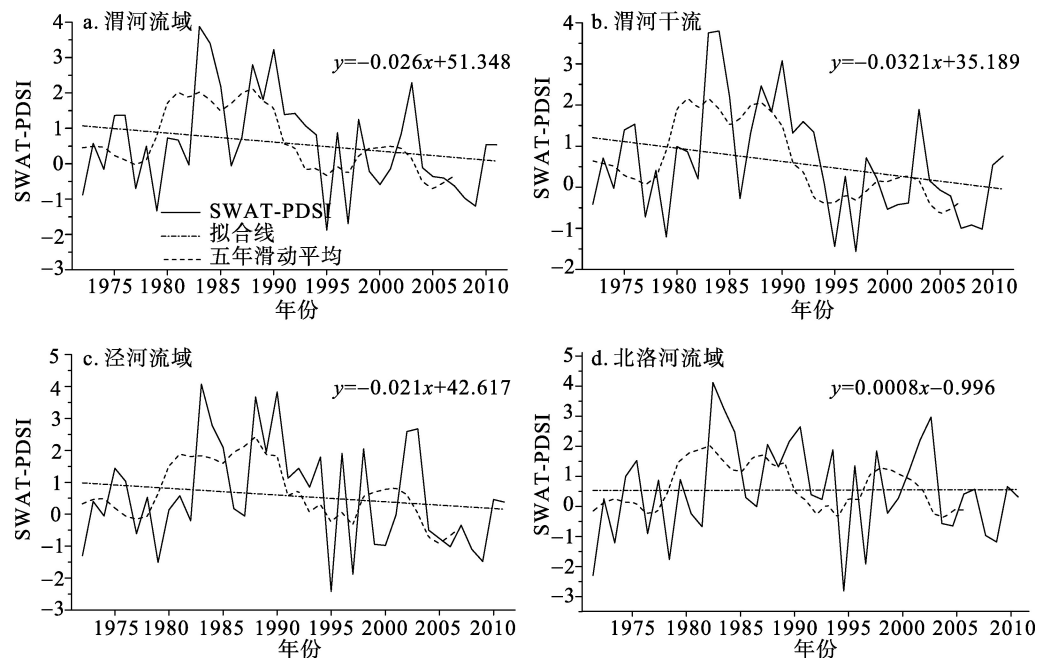


图5 1972-2012年渭河流域、渭河干流、泾河流域和北洛河流域 SWAT-PDSI 逐年变化趋势

Fig.5 Yearly variations of SWAT-PDSI in the Weihe River Basin, Weihe River mainstream, Jinghe River Basin, and Beiluohe River Basin, 1972-2012

表4 渭河流域及支流月干旱等级

Tab.4 The number and percentage of months with different drought grades in the Weihe River Basin, Weihe River mainstream, Jinghe River Basin, and Beiluohe River Basin

	轻微干旱		中等干旱		严重干旱		极端干旱	
	月数	频率/%	月数	频率/%	月数	频率/%	月数	频率/%
渭河流域	65	13.89	19	4.06	8	1.71	6	1.28
渭河干流	58	12.39	19	4.06	7	1.50	4	0.86
泾河流域	70	14.96	25	5.34	12	2.56	11	2.35
北洛河流域	53	11.33	30	6.41	10	2.14	4	0.85

历了由“干—湿—干”的变化趋势,其中1972-1979年,东部北洛河流域和干流的下游地区子流域的值小于0;而1980-1999年,东部地区的子流域变得较为湿润;进入21世纪,这些子流域又呈现变干趋势。同时,泾河流域和干流的上游地区大部分子流域在2000-2012年间也有变干的趋势。从整个流域来看,流域的北部较南部更为干旱,这种现象在2000-2012年间更为明显。这主要是因为流域的北部为黄土高原地区,降水较南部少,加之日照充足造成蒸散发较大;该地区的土壤类型主要为黄绵土,质地较粗,植被稀少,保水能力较差,导致其抵御干旱的能力较弱,易发生干旱事件。

为进一步研究渭河流域干旱发生的规律,对1972-2012年渭河流域不同等级干旱发生频率的空

间分布进行了分析(图7)。从图中可以得知,整个渭河流域大部分地区轻微以上干旱发生的频率基本都在16%以上,其中渭河干流上游和北洛河下游为25%~30%,北洛河流域和泾河流域上游甚至超过了30%(图7a);中等以上干旱分布频率,北洛河和泾河上游最高(>18%),北部的定西地区和东南部西安、咸阳等地区最低(<11%),其他地区基本处于11%~14%(图7b);严重以上干旱发生的频率明显降低,均处于11%以下,其中,北洛河流域中上游相对较高(>8%),其次为泾河流域的中下游地区,处于6%~8%,渭河干流、北洛河下游地区最低,基本处于6%以下(图7c);对于极端干旱来说,整个流域发生频率都较低,其中北洛河流域和泾河流域上游的一些地区大于4%,其他地区都在4%以下(图7d)。



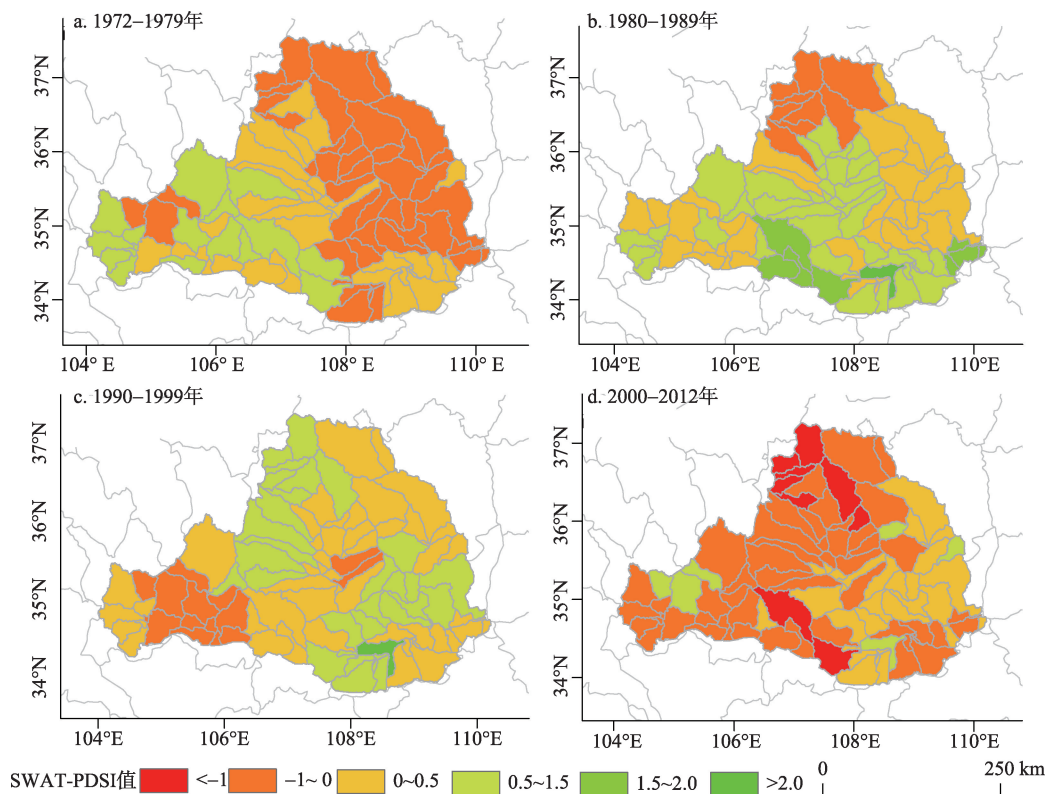


图6 1972-2012年渭河流域SWAT-PDSI空间分布

Fig.6 Spatial distribution of drought based on SWAT-PDSI in the Weihe River Basin, 1972-2012

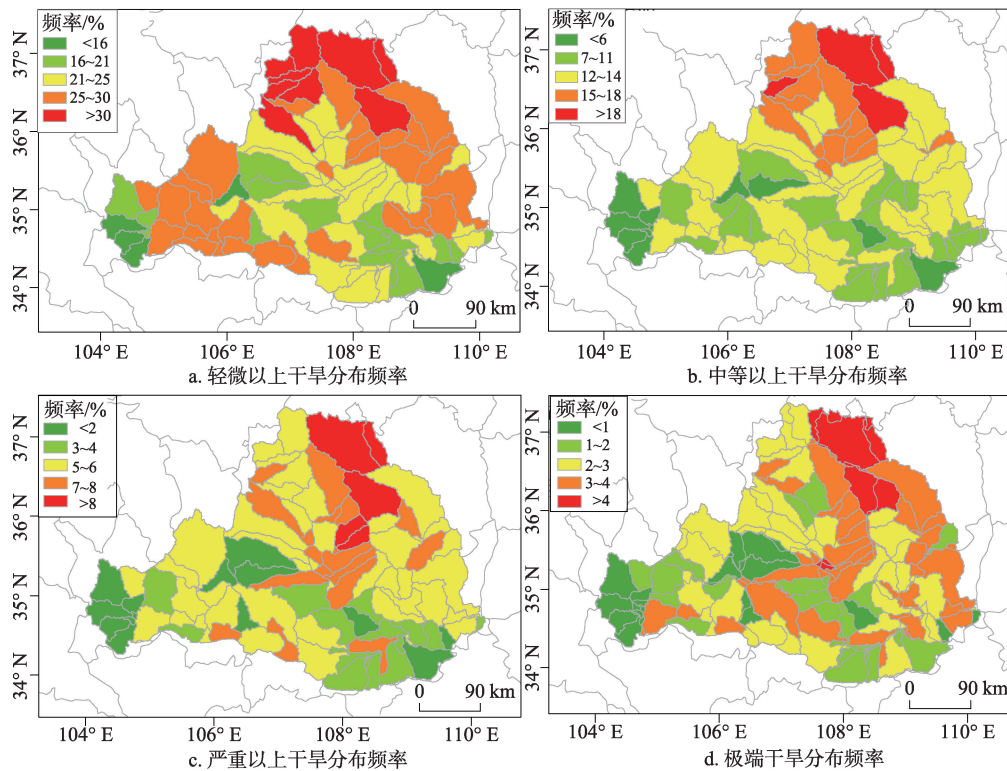


图7 渭河流域轻微以上干旱、中等以上干旱、严重以上干旱和极端干旱发生频率空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the frequency of droughts above the mild, moderate, severe, and extreme levels in the Weihe River Basin

## 5 结论与讨论

本文在 SWAT 分布式水文模型和 Palmer 干旱指数原理的基础上,从水量平衡的角度出发,构建了渭河流域的干旱评价指标 SWAT-PDSI,并对其干旱时空分布演变规律和发生频率进行了分析,得到以下结论:

(1) 渭河流域4个典型水文站点(华县、咸阳、林家村和魏家堡)月径流的模拟值与实测值总体的拟合程度较好。上游的林家村和魏家堡站受宝鸡峡影响不确定性较大,决定系数 $R^2$ 和 $E_{ns}$ 的值较其他两个站点低, $Re$ 的值较其他两个站点高;华县站与咸阳站率定期的 $R^2$ 和 $E_{ns}$ 的值均大于0.8,验证期也在0.70左右, $Re$ 值较小,表明模型月径流模拟的精度较高。

(2) 基于 SWAT 分布式水文模型构建的干旱评价指标 SWAT-PDSI 对渭河流域典型干旱年份(1995)干旱事件的评估,与已有的PDSI数据和文献资料相符合,表明本文所构建的 SWAT-PDSI 可以较好地反映渭河流域干旱时空差异和变化规律。

(3) 从时间角度来看,渭河流域、渭河干流和泾河流域的 SWAT-PDSI 的变化率分别为 $-0.26/10\text{ a}$ 、 $-0.32/10\text{ a}$ 和 $-0.21/10\text{ a}$ ,表现为变干趋势;北洛河流域的 SWAT-PDSI 的变化率为 $0.008/10\text{ a}$ ,表现为变湿趋势,但是均未通过95%置信水平检验;从空间尺度来看,多数子流域的干旱指标 SWAT-PDSI 的多年平均值基本处于 $-1\sim 1$ ,表明渭河流域多数地区处于正常状态。

(4) 从渭河流域干旱发生频率的空间分布来看,北洛河流域和泾河流域的上游地区易发生干旱,且发生中等以上、严重以上和极端干旱事件的频率最高。

目前,许多学者采用 PDSI 数据和水文模型分析了全球等大尺度的干旱变化趋势,如 Dai(2011)利用 1850-2010 年的降水和气温数据建立了全球陆地 $2.5^\circ$ 分辨率的月平均 PDSI 数据集,该数据集为全球气候变暖导致干旱增加提供了依据;Wang 等(2011)通过耦合陆面模型计算的土壤含水量重建了美国和中国干旱事件;Narasimhan 等(2005)利用 SWAT 模型输出的潜在蒸散发、实际蒸散发和土壤含水量等,构建了以周为时间尺度的 SMDI 和 ETDI 干旱指数。与前人的研究成果相比,本文所构建的渭河流域干旱指数采用具有物理机制的 SWAT 水

文模型取代两层土壤模型来计算水量平衡,扩大了其应用范围,同时 SWAT-PDSI 的构建还涉及到降水、潜在蒸散发、实际蒸散发、地表径流、土壤含水量等更多与干旱相关的气象水文参数。但本文也存在一定的不确定性,如建立的 SWAT-PDSI 仅反映了自然条件下干旱的发生发展过程,对水库、灌溉等人为影响因素并没有考虑,而干旱事件(尤其是农业干旱)是自然变异和人类活动共同作用的结果,因此综合考虑自然和人为因素对农业干旱的作用具有重要的探索价值,值得进一步关注。

## 参考文献(References)

- 陈峰,袁玉江,魏文寿,等. 2011. 腾格里沙漠南缘近315年5-6月PDSI指数变化[J]. 地理科学, 31(4): 434-439. [Chen F, Yuan Y J, Wei W S, et al. Reconstruction of May-June Palmer Drought Severity Index at south margin of Tengger Desert, China since A.D. 1691[J]. Scientia Geographica Sinica, 31(4): 434-439.]
- 陈昱潼,畅建霞,黄生志,等. 2014. 基于PDSI的渭河流域干旱变化特征[J]. 自然灾害学报, 23(5): 29-37. [Chen Y T, Chang J X, Huang S Z, et al. 2014. Variation characteristics of drought in Weihe River Basin based on Palmer Drought Severity Index[J]. Journal of Natural Disasters, 23(5): 29-37.]
- 冯夏清,章光新,尹雄锐. 2010. 基于SWAT模型的乌裕尔河流域气候变化的水文响应[J]. 地理科学进展, 29(7): 827-832. [Feng X Q, Zhang G X, Yi X R. Study on the hydrological response to climate change in Wuyur River Basin based on the SWAT model[J]. Progress in Geography, 29(7): 827-832.]
- 韩兰英,张强,姚玉璧,等. 2014. 近60年中国西南地区干旱灾害规律与成因[J]. 地理学报, 69(5): 632-639. [Han L Y, Zhang Q, Yao Y B, et al. 2014. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years[J]. Acta Geographica Sinica, 69(5): 632-639.]
- 史晓亮. 2013. 基于SWAT模型的滦河流域分布式水文模拟与干旱评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学. [Shi X L. 2013. Study on distributed hydrological simulation and drought evaluation method in Luanhe River Basin based on SWAT model[D]. Beijing, China: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 徐宗学,程磊. 2010. 分布式水文模型研究与应用进展[J]. 水利学报, 41(9): 1009-1017. [Xu Z X, Chen L. 2010. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 41(9): 1009-1017.]

- 许继军, 杨大文. 2010. 基于分布式水文模拟的干旱评估预报模型研究[J]. 水利学报, 41(6): 739-747. [Xu J J, Yang D W. 2010. New model for drought estimation and prediction based on distributed hydrological simulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 41(6): 739-747.]
- 杨新, 李士高. 1997. 1995 年陕西特大干旱[J]. 灾害学, 12(1): 77-79. [Yang X, Li S G. 1997. The heaviest drought in Shaanxi Province in 1995[J]. Journal of Catastrophology, 12(1): 77-79.]
- 余优森, 张平兰, 万信, 等. 1997. 1995 年甘肃农业土壤干旱及其对产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 15(3): 27-32. [Yu Y S, Zhang P L, Wang X, et al. 1997. Farming soil drought and its effect on crop yield in Gansu in 1995[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 15(3): 27-32.]
- 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 2007. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布: 基于 PDSI 数据[J]. 地理学报, 62(11): 1142-1152. [Zhang Y, Chen F H, Gou X H, et al. 2007. The temporal and spatial distribution of seasonal dry-wet changes over the Northwestern China: based on PDSI. Acta Geographica Sinica, 62(11): 1142-1152.]
- 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 2011. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 22(4): 455-461. [Zuo D P, Xu Z X, Li J Y, et al. 2011. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River Basin under future climate change[J]. Advance in Water Science, 22(4): 455-461.]
- Abbaspour K C. 2007. User manual for SWAT-CUP, SWAT calibration and uncertainty analysis programs[Z]. Duebendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.
- Agboma C O, Yirdaw S Z, Snelgrove K R. 2009. Intercomparison of the total storage deficit index (TSDI) over two Canadian Prairie catchments[J]. Journal of Hydrology, 374 (3-4): 351-359.
- Al-Qinna M I, Hammouri N A, Obeidat M M, et al. 2011. Drought analysis in Jordan under current and future climates[J]. Climatic Change, 106(3): 421-440.
- Chen S, Li R. 2013. Assessment of surface water resources and evapotranspiration in the Haihe River basin of China using SWAT model[J]. Hydrological Processes, 27(8): 1200-1222.
- Dai A G. 2011. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index during 1900-2008[J]. Journal of Geophysical Research, 116(D12): D12115, doi: 10.1029/2010JD015541.
- Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. 2004. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Journal of Hydrometeorology, 5(6): 1117-1130.
- Freer J, Beven K, Ambrose B. 1996. Bayesian estimation of uncertainty in runoff prediction and the value of data: an application of the GLUE approach[J]. Water Resources Research, 32(7): 2161-2173.
- Geza M, Mcrcay J E. 2008. Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions [J]. Journal of Environmental Management, 88(3): 393-406.
- He B, Lü A F, Wu J J, et al. 2011. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 21(2): 235-249.
- He H M, Zhang Q F, Zhou J, et al. 2009. Coupling climate change with hydrological dynamic in Qinling Mountains, China[J]. Climatic Change, 94(3): 409-427.
- Hua L J, Ma Z G, Zhong L H. 2011. A comparative analysis of primary and extreme characteristics of dry or wet status between Asia and North America[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 28(2): 352-362.
- Krause P, Boyle D P, Båse F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment[J]. Advances in Geosciences, European Geosciences Union (EGU), 5: 89-97.
- Motovilov Y G, Gottschalk L, Engeland K, et al. 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 98-99: 257-277.
- Naramngam S, Tong S T Y. 2013. Environmental and economic implications of various conservative agricultural practices in the Upper Little Miami River Basin[J]. Agricultural Water Management, 119: 65-79.
- Narasimhan B, Srinivasan R. 2005. Development and evaluation of Soil Moisture Deficit Index (SMDI) and Evapotranspiration Deficit Index (ETDI) for agricultural drought monitoring[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 133(1-4): 69-88.
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, et al. 2011. Soil and water assessment tool: theoretical documentation version 2009[R]. Texas water resources institute technical report No 365. College Station, TX: Texas A&M University System.
- Palmer W C. 1965. Meteorological drought[R]. Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Tesemma Z K, Mohamed Y A, Steenhuis T S. 2010. Trends in rainfall and runoff in the Blue Nile Basin: 1964-2003[J].



- Hydrological Processes, 24(25): 3747-3758.
- Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil moisture drought in China, 1950-2006[J]. *Journal of Climate*, 24(13): 3257-3271.
- Wu P T, Jin J M, Zhao X N. 2010. Impact of climate change and irrigation technology advancement on agricultural water use in China[J]. *Climatic Change*, 100(3): 797-805.
- Xu Z X, Pang J P, Liu C M, et al. 2009. Assessment of runoff and sediment yield in the Miyun Reservoir catchment by using SWAT model[J]. *Hydrological Processes*, 23(25): 3619-3630.
- Yan D H, Shi X L, Yang Z Y, et al. 2013. Modified palmer drought severity index based on distributed hydrological simulation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, doi: 10.1155/2013/327374.
- Zhang B Q, Wu P T, Zhao X N, et al. 2013. A drought hazard assessment index based on the VIC-PDSI model and its application on the Loess Plateau, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 114(1): 125-138.
- Zhao M S, Running S W. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. *Science*, 329: 940-943.

## Spatiotemporal patterns of droughts based on SWAT model for the Weihe River Basin

ZHAO Anzhou<sup>1,2,3</sup>, LIU Xianfeng<sup>1,2</sup>, ZHU Xiufang<sup>1,2\*</sup>, PAN Yaozhong<sup>1,2</sup>, LI Yizhan<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resources, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

**Abstract:** Drought is a complex natural hazard that is difficult to define and assess. By considering the hydrological cycle of river basins, a drought evaluation model SWAT-PDSI was constructed based on the Palmer Drought Severity Index(PDSI) and simulated results of SWAT (Soil and Water Assessment Tool) in the Weihe River Basin. Moreover, characteristics of the spatiotemporal distribution and frequency of drought hazard in the basin were analyzed. Results showed that: (1) The calibrated and validated SWAT model can be used to predict the hydrological process in the Weihe River Basin since it results in similar simulated trend of change as the observed data; (2) The SWAT-PDSI model based on SWAT and PDSI well describes the characteristics of drought in the Weihe River Basin as verified by the drought indices in 1995; (3) Temporally, the Weihe River Basin, Weihe River mainstream, and Jinghe River Basin showed a drying trend and the Beiluohe River Basin showed a wetter trend, but these were not statistically significant at the 0.05 confidence level; (4) Spatially, the annual average of SWAT-PDSI was between -1 and 1 in most subbasins; (5) High frequency drought areas were mainly distributed in the upstream of the Beiluohe River Basin and the Jinghe River Basin.

**Key words:** SWAT model; PDSI; drought assessment; the Weihe River Basin