

资水流域短期/长期综合干旱指数的构建与应用

虞美秀^{1,2}, 刘小龙^{1,2}, 邱巍³, 刘倪⁴, 李琼芳¹

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
3. 长江水利委员会水文下游局大通水文站, 安徽 池州 247126; 4. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230061)

摘要: 干旱评估作为干旱灾害监测与防御的一个重要方面,如何准确评价并预测研究区域的旱情是当前研究的热点和难点。基于资水罗家庙以上流域的水文、气象资料,分别计算具有不同时间尺度的干旱指数值,利用主成分分析方法,分别研制基于水文模型的短期/长期综合干旱指数并探讨了其在资水流域的适用性。研究表明:短期综合干旱指数和长期干旱指数均能很好识别并评价资水流域的历史干旱。研究成果可为长江流域及其他流域建立和健全干旱监测与预警系统提供重要参考。

关键词: 短期/长期; 综合干旱指数; 标准化径流指数; 资水流域

中图分类号: X43 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)03-0065-07

Development and application of composited drought index in short and long term at Zishui River basin

YU Meixiu^{1,2}, LIU Xiaolong^{1,2}, QIU Wei³, LIU Ni⁴, LI Qiongfang¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Datong Hydrological Station of Downstream Hydrological Bureau of Changjiang Water Resources Committee, Chizhou 247126, China; 4. Anhui Meteorological Observatory Station, Hefei 230061, China)

Abstract: The drought evaluation is taken as an important step of drought disaster monitoring and defense. How to accurately assess and predict drought conditions is the hot and difficult point of current research in study area. Based on the hydrological and meteorological data in the upstream of Luojiangmiao of Zishui river basin, the paper computed the drought indexes of different time scales, and then constructed the short term/long term composited drought index by using the principal component analysis method. The result revealed that the short and long term composited drought index can best recognize the history drought of Zishui river basin. The result may provide the important reference for the construction of drought disaster monitoring and defense system in Yangtze river and other basins.

Key words: short and long term; composited drought index; SSI; Zishui basin

干旱灾害是千百年来一直困扰人类生存的重大难题。尤其是近半个世纪以来,在全球气候变暖的大背景下,中国面临的干旱灾害形势越来越严峻^[1-6]。因此在《国家中长期科学和技术发展规划纲要》中,国家明确将干旱等重大自然灾害的监测与防御作为涉及国家公共安全领域的优先支持主题。鉴于目前大部分干旱指数应用本身的局限性^[6-7]:无法推广,能否找到一实用性好、易理解、具

有时效性、普适性强、适合评价中国各大区域或流域干旱的指数成为当前研究的热点和重点。研究以长江流域的资水罗家庙水文站以上流域为研究对象,基于长系列气象和水文资料,利用水文模型平台,构建资水流域基于水文模型的具有实用性、易理解性、时效性、普适性的并可能在中国范围全面推广应用的综合干旱指数。研究结果可为建立全国干旱预测预警系统提供重要的科学参考。

收稿日期:2014-11-27; 修回日期:2015-04-08

基金项目:国家科技支撑计划课题(2013BAB05B03);国家自然科学基金面上项目(41171220);水利部公益性行业科研专项项目(201301080)

作者简介:虞美秀(1985-),女,浙江临海人,博士,讲师,主要从事水文水资源研究。

1 短期/长期综合干旱指数的构建

1.1 短期/长期综合干旱指数的构建思路

我国当前构建的综合干旱指数基本上基于30或90 d时间尺度构建,且仅有一个时间尺度,适用于短期干旱的监测与评价,无法了解研究区历时较长的干旱事件的发展趋势。

基于上述原因,以及干旱历时、干旱强度及干旱类型等差异性,本研究决定分别构建短期综合干旱指数和长期综合干旱指数来分析和评价研究区的旱情。通过短期综合干旱指数可以监测旱情的相对实时变化,而通过长期综合干旱指数值则可以研究旱情的变化发展趋势。

1.2 综合干旱指数的构建原理

基于水量平衡中的主要变量,如降水、蒸发、径流、土壤含水量等计算得到改进的帕默尔干旱指数(scPDSI)^[8]、水分距平指数(ZIND)、标准化降水蒸散发干旱指数(SPEI)(1、3、6、12、18、24个月)^[9]、土壤相对湿度指数(SMI)、帕默尔水文干旱指数(PHDI)、标准化径流干旱指数(SSI)^[10]等干旱指数,同时鉴于干旱指数应用广泛性和实用性、资料可获得性以及不同干旱指数时间尺度不同等考虑,选用改进的帕默尔干旱指数(scPDSI)、水分距平指数(ZIND)、标准化降水蒸散发干旱指数(SPEI)(1、3个月)、土壤相对湿度指数(SMI)等5个干旱指数进行主成分分析,构建以月为时间步长的短期综合干旱指数;选用帕默尔水文干旱指数(PHDI)、标准化降水蒸散发干旱指数(SPEI)(6、12、18、24个月)、土壤相对湿度指数(SMI)、标准化径流干旱指数(SSI)等7个干旱指数进行主成分分析,构建以月为时间步长的长期综合干旱指数。构建原理如下。

在主成分分析方法^[11]之前,为了避免“大数吃小数”现象,消除不同变量量级和单位不同可能带来的影响,必须将所有单一干旱指数值进行标准化。对标准化得到的干旱指数进行主成分分析,提取的主成分表示如下:

$$Z = XE \quad (1)$$

式中: Z 为主成分分析方法提取的主成分; X 为经过标准化后的所有干旱指标构成的矩阵; E 为矩阵经过主成分分析得到的特征向量。

研究通过构建不同主成分的线性组合来计算相应综合干旱指数值,且将不同主成分对应特征值的权重作为线性组合中不同主成分对应的线性系数。综合干旱指数线性表达式如下:

$$CDI_i = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Z_{1,i} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Z_{2,i} + \dots + \frac{\lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} Z_{k,i} \quad (2)$$

式中: CDI_i 为第*i*个月的综合干旱指数值; $Z_{k,i}$ 为第*i*个月对应的第*k*个主成分; λ_i 为第*i*个月主成分对应的特征值, k 的大小由特征值所占比重的累积贡献率决定(本文取累积贡献率>80%及以上)。

根据公式(1)和(2),短期综合干旱指数S_CDI、长期综合干旱指数L_CDI的表达式分别为:

$$S_CDI_i = \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} X_S E_S \quad (3)$$

$$L_CDI_i = \sum_{j=1}^k \frac{\lambda_j}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_k} X_L E_L \quad (4)$$

$$X_S = (x_{scPDSI,i}, x_{ZIND,i}, x_{SPEI,i}, x_{SPEB,i}, x_{SMI,i})$$

$$E_S = (e_{scPDSI,i,j}, e_{ZIND,i,j}, e_{SPEI,i,j}, e_{SPEB,i,j}, e_{SMI,i,j})^T,$$

$$X_L = (x_{SMI,i}, x_{PHDI,i}, x_{SSI,i}, x_{SPE6,i}, x_{SPE12,i}, x_{SPE18,i}, x_{SPE24,i})$$

$$E_L = (e_{SMI,i,j}, e_{PHDI,i,j}, e_{SSI,i,j}, e_{SPE6,i,j}, e_{SPE12,i,j},$$

$$e_{SPE18,i,j}, e_{SPE24,i,j})^T$$

$e_{i,j}$ 为第*i*个月第*j*个主成分的特征向量; λ_j 第*j*个主成分的特征值, S_CDI_i 为第*i*个月的短期综合干旱指数, L_CDI_i 为第*i*个月的长期综合干旱指数。

基于研究流域内及其周围的日平均气温、日平均降水等气象资料,可以计算得到改进的帕默尔指数、ZIND指数、帕默尔水文干旱指数、标准化降水蒸散发指数等各干旱指数值,而土壤相对湿度指数和标准化径流指数需要借助水文模型模拟计算得到的土壤含水量计算获得。

1.3 综合干旱指数干旱等级划分的确定

综合干旱指数干旱等级划分标准的确定方法如下:先统计长江流域的资水罗家庙以上流域各干旱指数对应不同干旱等级的发生频率,取各频率的平均值作为新的综合干旱指数不同干旱等级对应的干旱频率,由此反推综合干旱指数的不同干旱等级划分临界值。

2 综合干旱指数在长江资水罗家庙以上流域的应用

资水罗家庙以上流域在20世纪60-80年代发生了不同严重程度的干旱,其中1966、1972和1979年分别发生了干旱强度最大的特旱^[12]。鉴于该时段干旱事件的代表性以及资料的可获得性,论文选用1965-1985年为研究时段,探讨并论证所构建的综合干旱

指数对不同干旱等级干旱事件的适用性。

2.1 新安江模型的应用

基于美国国家地球物理数据中心的全球 1 km 基础高程,将资水罗家庙以上流域划分成 15 308 个 1 km × 1 km 栅格。鉴于水文资料的可获得性和干旱事件的典型性,选用期间发生不同等级干旱的 1965 - 1985 年作为研究时段,其中 1965 - 1981 年作为率定期,1982 - 1985 年作为检验期。以网格为单元,以日为时间步长,应用新安江模型模拟计算并得到每个栅格的日土壤含水量,用于计算土壤相对湿度干旱指数。参数率定结果见表 1,模型模拟结果见表 2。

由表 2 可以看出,率定期(1965 - 1981)日尺度新安江模型模拟的径流深与实测值相对误差均在 10% 以内,检验期(1982 - 1985)最大相对误差为 -11.7%,模型的模拟精度符合水文模拟精度要求,表明新安江模型在资水罗家庙以上区域具有很好的适用性。

表 1 资水罗家庙水文站以上流域日模型参数表

参数符号	参数意义	参数率定值
KC	流域蒸散发折算系数	0.81
UM	上层张力水容量/mm	20
LM	下层张力水容量/mm	80
c	深层蒸散发折算系数	0.15
WM	流域平均张力水容量/mm	150
b	张力水蓄水容量曲线方次	0.3
IM	不透水面积占全流域面积的比例	0.001
BF	下渗分布曲线方次	1.5
KF	渗透系数	1
SM	表层自由水蓄水容量/mm	14.4
EX	表层自由水蓄水容量分布曲线方次	1.2
KG	表层自由水蓄水库对地下水的日出流系数	0.39
CS	河网蓄水消退系数	0.52
CI	壤中流消退系数	0.884
CG	地下水消退系数	0.975
L	河网滞时/d	1
KE	马斯京跟法演算参数/h	24
XE	马斯京根法演算参数	0.49

2.2 土壤相对湿度指数的计算与分析

由上节模拟计算得到的土壤含水量除以土壤有效含水量,计算得到每个栅格土壤相对湿度指数。栅格土壤有效含水量数据由国际地圈生物圈计划提

供的全球 10 km 的土壤剖面有效持水量图经过处理获得。通过栅格土壤相对湿度指数计算流域土壤相对湿度干旱指数,得到资水流域研究时段内历年土壤相对湿度干旱指数如图 1。

表 2 资水罗家庙水文站以上流域日模拟成果表

年份	降水/mm	实测径流深/mm	计算径流深/mm	相对误差/%
1965	1402.3	719.1	782.4	8.8
1966	1208.8	661.7	651.4	-1.6
1967	1429.6	844.4	760.2	-10.0
1968	1550.3	1015.8	916.5	-9.8
1969	1300.1	782.4	705.5	-9.8
1970	1638.6	1144.9	1033.1	-9.8
1971	1066.8	612.0	552.3	-9.7
1972	1391.5	633.1	668.7	5.6
1973	1591.9	1048.8	966.8	-7.8
1974	1107.4	611.6	563.7	-7.8
1975	1553.6	869.0	863.7	-0.6
1976	1328.3	759.5	699.4	-7.9
1977	1400.6	810.1	739.3	-8.7
1978	1246.7	574.2	550.7	-4.1
1979	1228.6	782.4	740.4	-5.4
1980	1360.5	757.9	789.0	4.1
1981	1443.3	835.3	856.3	2.5
1982	1612.9	990.8	1052.5	6.2
1983	1219.5	705.9	623.3	-11.7
1984	1226.5	727.8	691.7	-5.0
1985	1117.8	583.0	552.6	-5.2

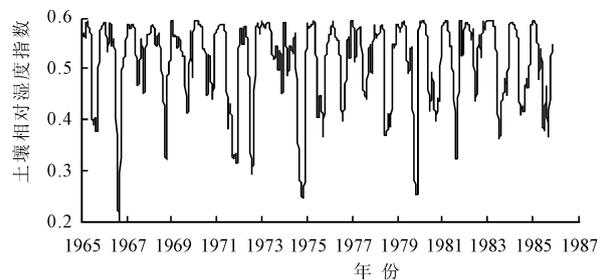


图 1 资水罗家庙以上流域土壤相对湿度指数历时变化

2.3 综合干旱指数的应用

基于计算得到的改进的帕默尔指数、ZIND 指数、帕默尔水文干旱指数、标准化降水蒸散发指数、标准化径流干旱指数、土壤相对湿度指数等各干旱指数值,由公式(3)和(4)分别得到资水罗家庙以上流域计算短期综合干旱指数和长期综合干旱指数的表达式,综合干旱指数主成分分析特征值见表 3 和相应的特征向量值见表 4 ~ 5。

基于1.3章节干旱等级划分标准的确定方法,短期和长期综合干旱指数的干旱等级划分见表6。

表3 资水罗家庙以上流域综合干旱指数主成分分析特征值

干旱指数	λ_1	λ_2	λ_3
短期综合干旱指数	2.95	0.80	0.77
长期综合干旱指数	3.88	1.34	0.71

表4 资水罗家庙以上流域短期综合干旱指数主成分分析特征值对应的特征向量

	<i>scPDSI</i>	<i>ZIND</i>	<i>SPEI</i> ₁	<i>SPEI</i> ₃	<i>SMI</i>
<i>e</i> ₁	0.21	0.32	0.30	0.27	0.19
<i>e</i> ₂	0.52	-0.37	0.52	0.07	0.76
<i>e</i> ₃	-0.77	0.12	0.21	-0.28	0.76

表5 资水罗家庙以上流域长期综合干旱指数主成分分析特征值对应的特征向量

	<i>SMI</i>	<i>PHDI</i>	<i>ISSI</i>	<i>SPEI</i> ₆	<i>SPEI</i> ₁₂	<i>SPEI</i> ₁₈	<i>SPEI</i> ₂₄
<i>e</i> ₁	0.10	0.22	0.16	0.19	0.23	0.22	0.20
<i>e</i> ₂	0.51	-0.25	0.47	-0.23	0.01	-0.24	-0.31
<i>e</i> ₃	0.84	0.18	-0.20	-0.70	-0.21	0.16	0.27

表6 资水罗家庙以上流域综合干旱指标干旱等级划分

干旱等级	短期综合干旱指标	长期综合干旱指标
无旱	(-0.33, +∞)	(-0.55, +∞)
轻旱	(-0.99, -0.33]	(-0.97, -0.55]
中旱	(-1.40, -0.99]	(-1.49, -0.97]
重旱	(-2.03, -1.40]	(-2.16, -1.49]
特旱	(-∞, -2.03]	(-∞, -2.16]

3 不同干旱指数在资水罗家庙以上流域的适用性比较研究

3.1 不同干旱指数在研究流域时程变化比较

图2为资水罗家庙以上流域短期/长期综合干旱指标及相应组分干旱指标的历时变化。由图可知,不同干旱指数均识别出了研究区域1966、1972、1974、1979年的干旱事件,可见不同干旱指数对同一干旱事件的判断结果比较一致。然而对于具体的某个干旱事件,对于同一纵坐标,由于不同干旱指数对应的干旱等级划分不同,其判断出的干旱严重程度存在差异:

(1)1966年重秋旱,能够正确识别的干旱指数

有短期综合干旱指数和土壤相对湿度指数,其他干旱指数判断均普遍偏轻,其中*scPDSI*指数判断无旱、*ZIND*指数和3个月*SPEI*指数判断中旱、1个月*SPEI*指数判断重旱。

(2)1972年重夏旱,能够正确识别的干旱指数为土壤相对湿度指数判断,判断结果为特旱,其他干旱指数判断均普遍偏轻,其中短期综合干旱指数判断结果为重旱,*scPDSI*指数判断为轻旱,*ZIND*指数、1和3个月*SPEI*指数判断为中旱。可见,短期综合干旱指数对1972年重夏旱事件判断偏轻,分析原因可能是由于该场次干旱为长历时干旱,而短历时的干旱由于只具有1~3个月的判别时间尺度,故不能准确识别该场次干旱。

与短期综合干旱指数类似,长期综合干旱指标及相应组分干旱指标对同一干旱事件的判断结果也较为一致,但同样存在对具体干旱事件判断出的干旱严重程度随干旱指数不同而存在不同程度的差异:

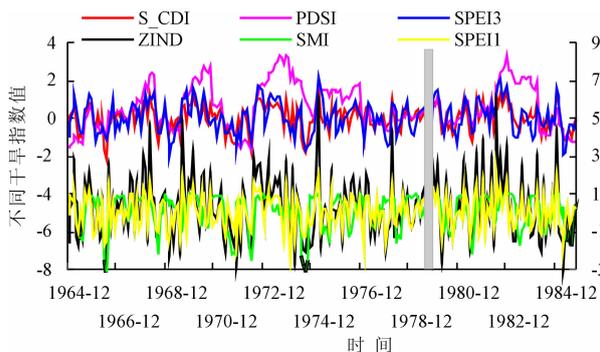
(1)1966年重秋旱,能够正确识别的干旱指数为长期综合干旱指数和土壤相对湿度指数,判断均为特旱,其他干旱指数判断均普遍偏轻,其中*PHDI*指数判断无旱、6和24个月*SPEI*指数判断为中旱,12和18个月*SPEI*指数判断轻旱,*SSI*指数判断为重旱。

(2)1972年重夏旱,能够正确识别的干旱指数为长期综合干旱指数和土壤相对湿度指数,判断均为特旱,其他干旱指数判断均普遍偏轻,其中*PHDI*指数和6个月*SPEI*指数判断轻旱,12、18和24个月*SPEI*指数判断为中旱,*SSI*指数判断为重旱。可见长期综合干旱指数能够比较好的识别并判断长历时的干旱,对于短历时干旱,长期综合干旱指数则由于本身的局限性不能很好识别。

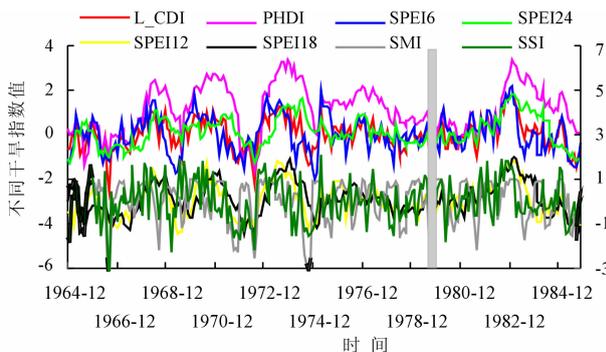
比较短期综合干旱指数和长期干旱指数,整体上来说,短期综合干旱指数与长期干旱指数波动趋势变化比较一致,二者识别出来的干旱事件也相对比较一致,这主要与二者的构建原理及所使用的资料系列相同有关。二者的区别在于短期综合干旱指数波动变化频率明显高于长期综合干旱指数,且研究区域越干旱两者相对波动差别越明显。该区别主要是由于不同综合干旱指数采用不同时间尺度的干旱组成所致,短期综合干旱指数存在大概1~3个月左右的时间尺度,而长期综合干旱指数则存在6~24个月左右的时间尺度。因此,对于历时较短的干旱场次,短期综合干旱指数由于其内在的灵敏性可以及时发现水分短缺,故对于干旱程度的判别相对较

好;而对于历时较长甚至是多年连续性干旱,长期综合干旱指数由于其能够很好考虑前期土湿和降水等条件及部分降水滞后性的影响以及干旱本身就是一

个漫长且不易发现的过程,故对长期干旱程度的判别较短期指数更准确。



(a) 短期综合干旱指数及相应组分干旱指标



(b) 长期综合干旱指数及相应组分干旱指标

图 2 长江资水罗家庙以上不同干旱指数对不同干旱事件敏感性比较

3.2 不同干旱指数在研究流域空间动态变化比较

比较资水流域各大干旱指数的空间动态变化过程发现(图 3),与短期综合干旱指数相比,其他任一干旱指数均无法准确反映资水罗家庙以上流域的干旱,均有不同程度的偏湿或偏旱。可见,提取并综合考虑各大具有短时间尺度的干旱指数的主要成分方能综合并准确反映资水罗家庙以上流域的实际干旱

过程。

通过对资水罗家庙以上流域 1979 年重秋旱的时空演变过程(图 4),短期综合干旱指数比长期综合干旱指数更能准确识别并判断资水罗家庙以上流域 1979 年的实际干旱的严重程度。可见,对于历时较短的干旱,短期综合干旱指数比长期综合干旱指数对干旱的监测识别更准确。

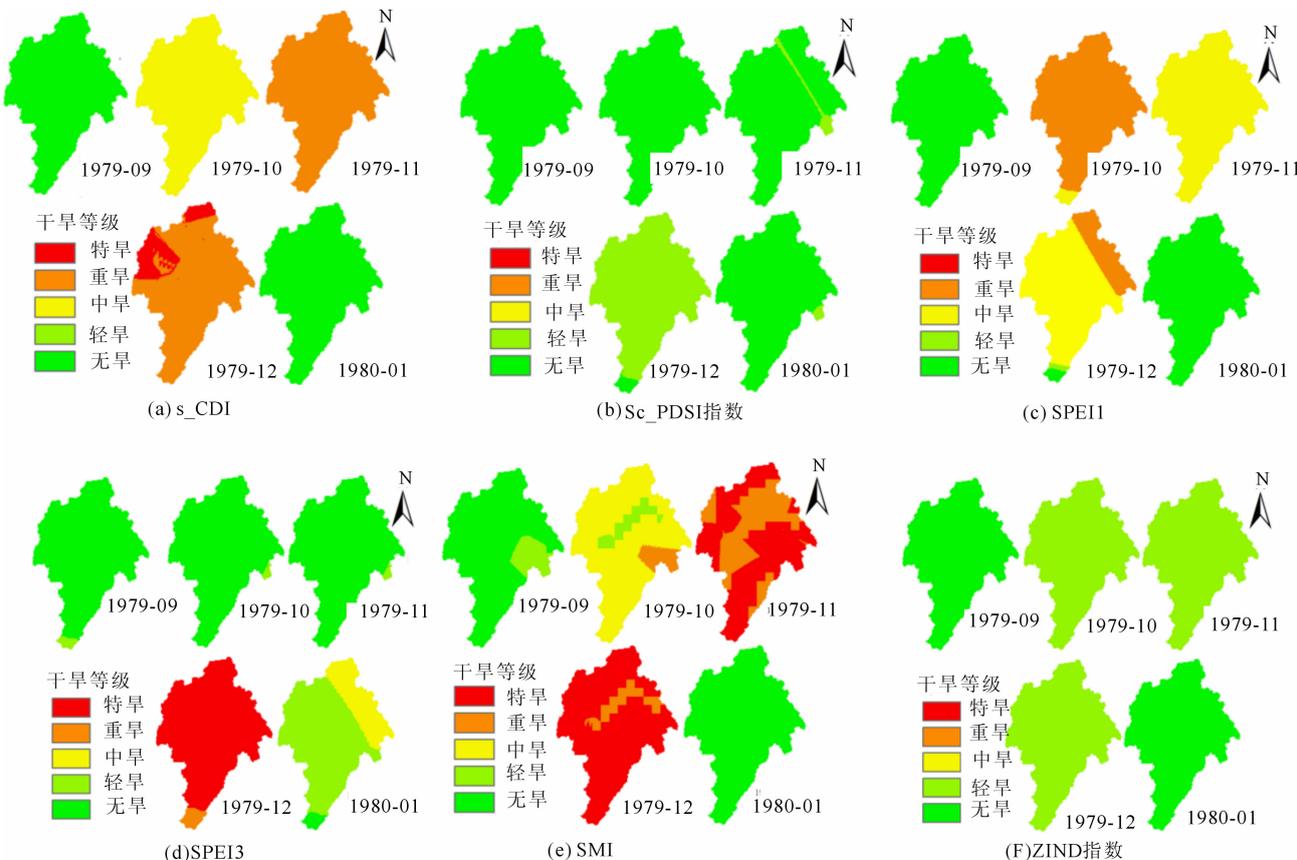


图 3 资水罗家庙以上流域短期综合干旱指数和其他干旱指数的空间动态变化比较(1979-09 - 1980-01)

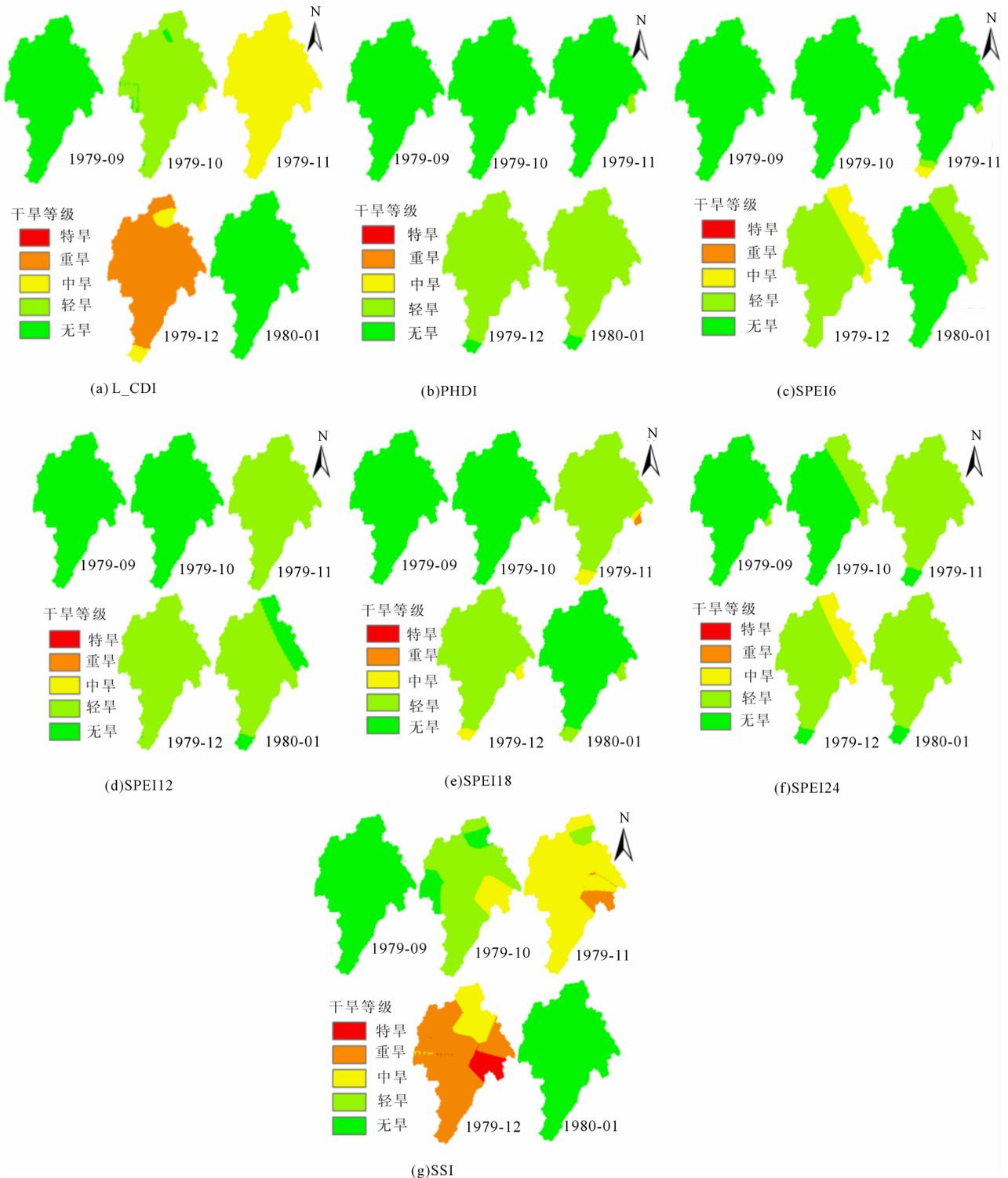


图4 资水罗家庙以上流域长期综合干旱指数和其他干旱指数的空间动态变化比较(1979-09-1980-01)

4 结 语

论文构建了资水罗家庙以上流域基于新安江模型的短期和长期综合干旱指数,并论证了构建的综合干旱指数的适用性。得到结论如下:

(1)短期/长期综合干旱指数均能很好识别并

评价资水流域的历史干旱。其中,短期综合干旱指数适合的时间尺度在1~3个月左右,长期综合干旱指数则在6~24个月之间。

(2)短期综合干旱指数适合评价旱情的相对实时变化,而长期综合干旱指数则适合判断研究区旱情的长期变化趋势。

(3)对于干旱强度大、时间跨度长的连续性干旱,短期综合干旱指数和长期综合干旱指数同时运用的监测效果比单一综合干旱指数效果好,评价更准确更全面。

(4)资水流域综合干旱指数的构建对其他地区或流域具有很好的借鉴作用,该综合干旱指数可在全国范围内推广使用。本文的研究结果可为长江流域及其他流域建立和健全干旱监测与预警系统提供重要参考。

参考文献:

[1] Yu Meixiu., Li Qiongfang, Hayes M J, et al. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951 - 2010? [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3):545 - 558.

[2] Wu Zhiyong, Lu Guihua, Wen L, et al. Reconstructing and analyzing China's fifty - nine year (1951 - 2009) drought history using hydrological model simulation [J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2011, 8(1):1861 - 1893.

[3] Zou Xukai, Zhai Panmao, Zhang Qiang. Variations in droughts over China: 1951 - 2003 [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32:L04707.

[4] 李昊洋, 李琼芳, 李鹏程. 华北历史干旱的社会影响分

析[J]. 河海大学学报:哲学社会科学版, 2011, 13(4): 63 - 66.

[5] 侯威, 杨萍, 封国林. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因[J]. 物理学报, 2008, 57(6):3932 - 3940.

[6] 苏宏新, 李广起. 基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系[J]. 生态学报, 2012, 32(17):5467 - 5475.

[7] Heim R R. A review of twentieth - century drought indices used in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(8):1149 - 1165.

[8] Wells N, Goddard S, Hayes M J. A self - calibrating palmer drought severity index [J]. Journal of Climate, 2010, 17(12):2335 - 2351.

[9] 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.

[10] Vicente - Serrano S M, López - Moreno J I, Beguería S, et al. Accurate computation of a streamflow drought index [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2012, 17(2): 318 - 332.

[11] 王春娟, 冯利华, 罗伟. 基于主成分分析的 BP 神经网络对南京市水资源需求量预测[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(6):6 - 9.

[12] 张世法. 中国历史干旱 1949 - 2000 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2008.

(上接第 64 页)

[14] 杨旭, 金萍, 黄智山. 掺用沸石岩矿粉混凝土及建筑砂浆的试验研究[J]. 混凝土, 2000(6):14 - 17.

[15] 王川, 杨朝晖, 曾光明, 等. DTOR 协同水泥固化/稳定化重金属污染底泥的研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11):2060 - 2066.

[16] 中华人民共和国建设部. CJ/T 3073 - 1998 土壤固化剂 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.

[17] 杨国清, 刘康怀, 王敦球, 等. 固体废物处理工程 [M]. (第二版) 北京: 科学出版社, 2007.

[18] 李寿冬, 吴伟豪, 蔡建军, 等. 天然沸石粉作为混凝土辅助性胶凝材料的研究 [J]. 建筑监督检测与造价, 2010, 3(5):16 - 21.

[19] 牛全林, 冯乃谦, 张新国. 改性沸石对可溶性碱的吸附性能及其对碱硅酸反应的抑制效果[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(4):515 - 519.

[20] 胡克伟, 贾冬艳, 查春梅, 等. 天然沸石对重金属离子的

竞争性吸附研究[J]. 中国土壤与肥料, 2008(3):66 - 69.

[21] 李玉萍. 徐州和苏州土壤中铅铜锌镉的吸附解吸特性研究 [D]. 北京: 首都师范大学, 2007.

[22] 刘远金, 卢维盛, 李华兴, 等. 沸石对污水中 BOD₅ 和 COD_{Cr} 净化效果的研究[J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 323 - 324

[23] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8):1327 - 1330 + 1334.

[24] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 5085.3 - 2007 危险废物鉴别标准浸出毒性鉴别 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

[25] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB18918 - 2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.