

三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害的风险性及趋势预测

高芮¹, 吕殿青^{1,2}, 李景保¹

(1.湖南师范大学资源与环境科学学院,长沙 410081;2.江苏理工学院化学与环境工程学院,江苏 常州 213001)

摘要: 根据洞庭湖区 1950—2017 年农业水旱灾情资料和 1956—2017 年的径流量数据,采用水旱灾害受(成)灾率、熵信息扩散理论模型、标准化径流指数(SRI)和重标极差分析(R/S)等方法,分析三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害的程度、风险性以及趋势。结果表明:在三峡水库蓄水后,(1)水灾受灾率由 6.65%降至 1.21%,成灾率由 2.97%降至 0.71%,旱灾受灾率由 5.97%降至 2.48%,成灾率由 2.98%降至 0.99%。(2)水旱灾害成灾率在 $\geq 5\%$, $\geq 10\%$, $\geq 15\%$ 和 $\geq 20\%$ 时,水灾风险概率分别为 0.415, 0.192, 0.057, 0.025, 旱灾风险概率依次为 0.518, 0.359, 0.037, 0.001, 水灾风险等级为中低风险(成灾率 $\geq 5\%$, $\geq 10\%$)、低风险(成灾率 $\geq 15\%$, $\geq 20\%$), 旱灾风险等级为中风险(成灾率 $\geq 5\%$)、中高风险(成灾率 $\geq 10\%$)、低风险(成灾率 $\geq 15\%$, $\geq 20\%$)。(3)该区水旱灾害风险趋势为水灾风险将呈现减轻趋势,而旱灾风险将呈现增大趋势。

关键词: 风险性; 趋势分析; 水旱灾害; 农业; 洞庭湖区

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0162-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.024

Agricultural Flood and Drought Risk and Their Trend Analysis in Dongting Lake Area After the Impoundment of Three Gorges Reservoir

GAO Rui¹, LÜ Dianqing^{1,2}, LI Jingbao¹

(1.College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou, Jiangsu 213001)

Abstract: Based on the agricultural flood drought data from 1950—2017 and the runoff data from 1956—2017 in Dongting Lake area, the degree and risk of agricultural flood and drought disasters and their trends in Dongting Lake area after impoundment of the Three Gorges Reservoir were analyzed by using the methods of flood and drought disaster acceptance rate, theory model of entropy information diffusion, standardized runoff index (SRI), and re-standard polar difference analysis (R/S). The results showed that: (1) After impoundment of the Three Gorges Reservoir, the rate of flood stricken decreased from 6.65% to 1.21%, the rate of flood disaster decreased from 2.97% to 0.71%, the rate of drought stricken decreased from 5.97% to 2.48%, and the rate of drought disaster decreased from 2.98% to 0.99%. (2) When the disaster rate of agricultural flood and drought disaster was more than 5%, 10%, 15%, and 20%, the probability of flood risk was 0.415, 0.192, 0.057 and 0.025, and the probability of drought risk was 0.518, 0.359, 0.037 and 0.001, respectively. The flood risk level was medium to low risk (disaster rate was more than 5%, 10%) and low risk (disaster rate was more than 15% and 20%). Drought risk level was medium risk (disaster rate was more than 5%), medium to high risk (disaster rate was more than 10%), and low risk (disaster rate was more than 15%, 20%). (3) The trend of flood and drought disasters will be a reducing trend for floods and an increasing trend for drought in studied areas.

Keywords: risk; trend analysis; flood and drought disasters; agriculture; dongting lake area

农业水灾^[1]是指因洪水冲击或淹没浸泡农业承灾体,而造成农作物减产或绝收的农业自然灾害,农业旱灾^[2]是指由于长期无雨、少雨造成空气干燥、土壤缺水,从而导致农业生产等经济活动与人类生活受

到危害并造成灾害。水旱灾害风险^[3]是指在易灾区遭受不同强度水旱灾害的可能性及其可能造成的后果。洞庭湖区受气候波动和人类活动的叠加影响,加之天然的地形、长江荆南三口、湖南四水等因素的综

合影响,使得该区域水旱灾害发生频繁,且易灾风险大,在较大程度上制约了本区社会经济的发展,因而颇受学者们的高度关注,廖玉芳等^[4]运用区域平均值、线性倾向估计等方法对洞庭湖区旱涝加剧的气象成因进行分析,结果表明东亚夏季风的强弱、主雨带的位置,以及该区域雨水资源向丰枯的同步转变,是导致该研究区旱涝灾害加剧的气象成因;黎焱隆等^[5]对洞庭湖流域旱涝年份大气环流特征的研究发现,典型夏涝年和夏旱年在 500 hPa 高度距平场上的位势距平分布具有相反特征;刘电英等^[6]运用 Z 指数对洞庭湖区汛期旱涝灾害的变化特征展开探讨,发现该区域汛期旱涝灾害发生频繁,旱涝风险并存;胡毅鸿等^[7]采用夏季长周期旱涝急转指数对洞庭湖区 1951—2015 年旱涝急转特征进行研究,湖区旱涝急转现象分为旱涝急转强度较大、旱转涝强度较大、涝转旱强度逐渐减小、旱涝急转现象不显著 4 个阶段;李景刚等^[8]、孙葭等^[9]通过区域综合 Z 指数、小波分析、降水 Z 指数对洞庭湖流域的旱涝特征展开分析,结果表明该流域旱涝发生较为频繁、持续时间长,且具有明显的季节分布特征,存在准 18 年、准 3 年和准 5 年的周期变化。长江三峡水库自 2003 年运行以来,国内诸多学者^[10-14]通过不同的方法,围绕三峡水库蓄水后对洞庭湖入湖与出湖水量、城陵矶水位、荆南三口分流分沙比、泥沙冲淤、水质与湿地生态系统展开了分析讨论,结果表明,三峡水库蓄水期间,减少了荆江三口进入洞庭湖的水量,城陵矶水位在 9—10 月明显下降,使得出湖水量显著减少,湖区枯水期提前了 1 个月左右^[15-16];由于三峡水库的拦沙作用,使荆江三口分流分沙比减少,三口占入湖总径流量、总输沙量比重下降,从而在一定程度上减缓了湖区的泥沙淤积^[17-18];湖区水质总体变差,由贫—中营养过渡到轻度富营养,天然湿地面积减少,湿地生态系统调洪蓄水价值明显降低^[19-20]。洞庭湖区是我国重要的商品粮、棉、油生产基地,素称渔米之乡,那么三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害的程度及其风险性如何?未来水旱灾害风险的变化趋势如何?这些均是值得进一步探讨的问题。鉴于此,本文基于定量方法,分析三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害程度、风险性及其未来趋势,以便全面了解和重新认识该地区在三峡水库蓄水后水旱灾害的程度、风险性及其变化趋势,为合理开发水资源、配置水资源以及科学制定防洪抗旱减灾规划提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区域为湖南省洞庭湖区,主要包括长沙市、

岳阳市、常德市、益阳市等地级市和 14 个国营农场,总面积为 15 200 km²。由于该区气候温和、雨量充沛、光照充足、土壤肥沃、发展生产条件优越,已成为以粮食生产为主,兼有多种农产品的农业商品生产基地。据 2017 年统计资料^[21]显示,全区粮食总产量 857.8 万 t,占全省粮食总产量的 27.91%。洞庭湖接纳长江松滋、虎渡、藕池三口来水和湖南境内湘、资、沅、澧四水,经湖泊调蓄后由城陵矶汇入长江^[22],受人类活动和特定地理环境的影响,使洞庭湖区成为我国农业水旱灾害最严重及风险最大的地区之一。

1.2 数据来源

洞庭湖区 1950—2017 年农业水旱灾情资料取自于《1950—1993 年湖南省水旱灾害总结摘录》^[23]《1994—2003 年湖南省水旱灾情汇编》^[24]《2004—2017 年湖南省防汛抗旱总结》^[25]。此外,选取枝城站、沙市站,荆南三口松滋口的沙道观站和新江口站、虎渡口的弥陀寺站、藕池口的康家岗站和管家铺站,以及长江与洞庭湖交汇区的监利站、城陵矶站、螺山站共 10 个水文站 1956—2017 年的月径流量,站点分布见图 1,数据来源于湖南省水利水电勘测设计研究总院(<http://www.hhpdi.com/index.html>),湖南省水情日报表(<http://www.hnsw.com.cn/tabid/230/Default.aspx#6135>)和湖北省江河水情报表(<http://219.140.162.169:8800/rw4/report/fa02.asp>)。为便于对比分析,以三峡水库蓄水时间(2003 年)为节点,将资料序列划分为三峡水库蓄水前(1950 或 1956—2002 年)和三峡水库蓄水后(2003—2017 年)。

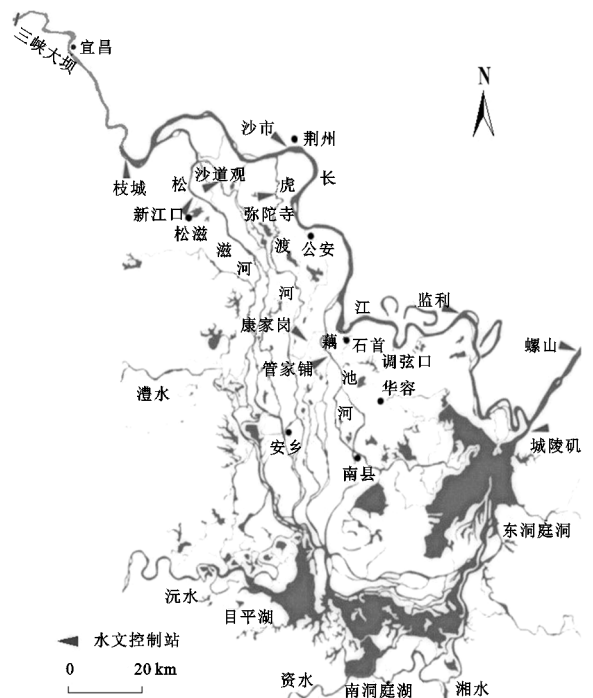


图 1 洞庭湖流域主要水系及水文站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 计算农业水旱灾害受灾率、成灾率的方法

农业水旱灾害受灾率表示因灾减产 1 成以上的农作物受灾面积与农作物总播种面积的比值,农业水旱灾害成灾率表示因灾减产 3 成以上的农作物成灾面积与农作物总播种面积的比值。其具体计算公式为:

$$I_{1f} = \frac{D_{1f}}{A} \times 100\% \quad (1)$$

$$I_{2f} = \frac{D_{2f}}{A} \times 100\% \quad (2)$$

$$I_{1d} = \frac{D_{1d}}{A} \times 100\% \quad (3)$$

$$I_{2d} = \frac{D_{2d}}{A} \times 100\% \quad (4)$$

式中: I_{1f} 、 I_{2f} 分别为农业水灾的受灾率(%)和成灾率(%); I_{1d} 、 I_{2d} 分别为农业旱灾的受灾率(%)和成灾率(%); D_{1f} 、 D_{2f} 分别为农业水灾的受灾面积(hm^2)和成灾面积(hm^2); D_{1d} 、 D_{2d} 分别为农业旱灾的受灾面积(hm^2)和成灾面积(hm^2); A 为农作物总播种面积(hm^2)。

1.3.2 熵信息扩散理论模型 熵信息扩散理论模型相比于信息扩散理论模型而言,该模型中的信息扩散系数是通过科学计算得来,且通过实例证实了该模型优于信息扩散模型,本文基于该方法计算熵信息扩散系数、水旱灾害风险概率,进而分析洞庭湖区农业水旱灾害的风险性,计算步骤见参考文献[26]。

1.3.3 标准化径流指数(SRI) 标准化径流指数(SRI)是由 Shukla 等[27]提出,在确定一定时间内径流适合的概率分布类型后,再经正态标准化求得 SRI 值[28-29]。不过目前我国学者多采用标准化降水指数(SPI),但由于一方面我们在分别计算湖区降水、径流与水旱灾害成灾率的相关程度发现,降水、径流均与水旱灾害成灾率呈正相关,相关系数依次为 0.128, 0.345, 均与水旱灾害成灾率呈负相关,相关系数依次为 -0.324, -0.428, 降水与水旱灾害成灾率的相关程度均低于径流与水旱灾害成灾率的相关程度;另一方面已有研究[30]表明,因洞庭湖区农业生产用水主要依赖于河湖地表水,用 SRI 指数比用 SPI 指数更符合该区的实际情况。鉴于此,本文采用标准化径流指数(SRI),其计算步骤见参考文献[31],SRI 划分标准[32]见表 1。

1.3.4 重标极差分析法(R/S) R/S 方法又称为重标极差分析法,由水文学家 Hurst[33]提出,该方法在时间序列分析中得到广泛应用[34-35],能定量描述时间序列的趋势性。计算步骤参考文献[36],直线的斜率就是该时间序列的 Hurst 指数,时间序列的分维用 $D(D=2-H)$ 表示,则有几种情况[37]为:如果 $H=$

0.5,表示时间序列前后变化无关,即过去与将来不存在相关性;如果 $0.5 < H \leq 1$ 时,表示时间序列前后变化正相关,即过去整体的增加趋势预示将来整体趋势还是增加,反之亦然;如果 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示时间序列前后变化负相关,即过去整体的增加趋势预示将来整体趋势是减少,反之亦然。

表 1 标准化径流指数的旱涝类型等级划分

| 等级 | SRI 值 | 旱涝类型 | 等级 | SRI 值 | 旱涝类型 |
|----|-----------------------------|------|----|-------------------------------|------|
| 1 | $2.0 \leq \text{SRI}$ | 特涝 | 6 | $-1.0 < \text{SRI} \leq -0.5$ | 轻旱 |
| 2 | $1.5 \leq \text{SRI} < 2.0$ | 重涝 | 7 | $-1.5 < \text{SRI} \leq -1.0$ | 中旱 |
| 3 | $1.0 \leq \text{SRI} < 1.5$ | 中涝 | 8 | $-2.0 < \text{SRI} \leq -1.5$ | 重旱 |
| 4 | $0.5 \leq \text{SRI} < 1.0$ | 轻涝 | 9 | $\text{SRI} \leq -2.0$ | 特旱 |
| 5 | $-0.5 < \text{SRI} < 0.5$ | 正常 | | | |

2 结果与分析

2.1 洞庭湖区农业水旱灾害受灾率、成灾率的演变特征

由公式(1)~(4)得到历年水旱灾害受灾率、成灾率,并绘制洞庭湖区农业水旱灾害受灾率、成灾率的演变过程(图 2)。通过分析图 2 认为,该地区农业水旱灾害受灾率、成灾率的演变过程特点为:

(1)在三峡水库蓄水前这一时间段内,洞庭湖区农业水灾受灾率为 6.65%,成灾率为 2.97%,在水库蓄水后的时间段内,农业水灾受灾率为 1.21%,成灾率为 0.71%,由此可见,三峡水库蓄水后该地区水灾的受灾率、成灾率均呈下降状态,下降率分别为 5.44%, 2.26%,且受灾率下降幅度明显高于成灾率。(2)在三峡水库蓄水前的较长时间内,洞庭湖区农业旱灾受灾率为 5.97%,成灾率为 2.98%,在蓄水后这一时间段内,农业旱灾受灾率为 2.48%,成灾率为 0.99%,由此可见,三峡水库蓄水后该地区旱灾的受灾率、成灾率均有所减少,减少率依次为 3.49%, 1.99%。(3)综上所述,在三峡水库蓄水后,该研究区农业水灾受灾率为 1.21%,要低于蓄水后的旱灾受灾率(2.48%),农业水灾成灾率为 0.71%,同样低于蓄水后的旱灾成灾率(0.99%)。从水库蓄水后水旱灾害受灾率、成灾率的减少幅度上看,也具有相同的特点,即水灾受灾率、成灾率的减少幅度(5.44%, 2.26%)分别高于旱灾受灾率、成灾率的减少幅度(3.49%, 1.99%)。由此表明,从受灾率、成灾率角度上看,三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害的损失程度均有所削弱,并且水灾的损失程度明显低于旱灾的损失程度。

2.2 洞庭湖区农业水旱灾害风险性评估

农作物成灾[1]是指在受灾范围内有部分或大部分农作物因受到致灾因子的危害而减产或绝收。由上述分析表明,农业水旱灾害成灾率能客观实际地全

面反映三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害的损害程度,故本研究在计算熵信息扩散模型的扩散系数

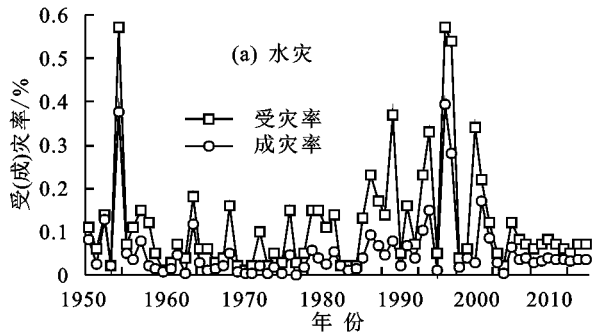


图 2 洞庭湖区农业水旱灾害受灾率、成灾率的演变过程

2.2.1 基于熵信息扩散模型的扩散指标 根据 2.1 章节将成灾率数据分为三峡水库蓄水前与蓄水后,从而得到每组数据中农业水灾样本中的最小值 a_f 、最大值 b_f ,农业旱灾样本中的最小值 a_d 、最大值 b_d ,再运用熵信息扩散理论模型,分别计算得到三峡水库蓄水前后洞庭湖区农业水旱灾害的熵信息扩散系数 h_f 、 h_d (表 2)。

2.2.2 水旱灾害成灾率风险等级划分标准 由计算可知,洞庭湖区水旱灾害成灾率主要集中在 0~20%,根据特定成灾程度的风险概率 P 的取值,结合

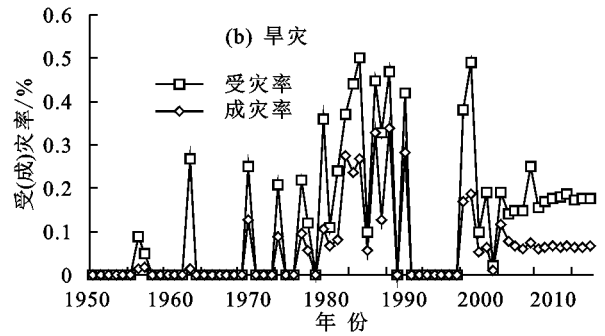
表 3 不同成灾率下的水旱灾害风险等级划分

| 成灾率 I_{2f} (或 I_{2d})/% | 高风险 | 中高风险 | 中风险 | 中低风险 | 低风险 |
|------------------------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|----------|
| ≥ 5 | | $R=1$ | $1 < R \leq 2$ | $2 < R \leq 4$ | $R > 4$ |
| ≥ 10 | $1 < R \leq 2$ | $2 < R \leq 3$ | $3 < R \leq 5$ | $5 < R \leq 7$ | $R > 7$ |
| ≥ 15 | $1 < R \leq 2$ | $2 < R \leq 4$ | $4 < R \leq 6$ | $6 < R \leq 10$ | $R > 10$ |
| ≥ 20 | $1 < R \leq 2$ | $2 < R \leq 5$ | $5 < R \leq 10$ | $10 < R \leq 20$ | $R > 20$ |

2.2.3 洞庭湖区农业水灾风险性评估 由风险分析模型和风险等级划分标准,得到三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水灾成灾的风险概率、风险等级(表 4 和表 5),据此分析在不同成灾率发生的情况下,三峡水库蓄水后该研究区农业水灾的风险性。

在 $I_{2f} \geq 5\%$ 时,水灾在三峡水库蓄水前呈现低风险,为大于 4 年一遇,蓄水后呈现中低风险,为 2~4 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 2.410 年一遇,高于蓄水前的 4.132 年一遇;在 $I_{2f} \geq 10\%$ 时,水灾在蓄水前显示为中风险,为 3~5 年一遇,蓄水后显示中低风险,为 5~7 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 5.208 年一遇,低于蓄水前的 4.975 年一遇;在 $I_{2f} \geq 15\%$ 时,水灾成灾率在蓄水前表现为中低风险,为 6~10 年一遇,蓄水后表现为低风险,大于 10 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 17.544 年一遇,低于蓄水前的 7.246 年一遇;在 $I_{2f} \geq 20\%$ 时,水灾在蓄水前仍旧呈现中低风险,为 10~20 年一遇,蓄水后呈现低风险,为大于 20 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 40.000 年一遇,远

时以农业水旱灾害成灾率作为评估农业水旱灾害的风险指标。



中国南方地区农业水旱灾害风险等级阈值表^[38]将该区水旱灾害成灾率风险等级分为 5 个等级(表 3),其中 $R=1/P$, $1 < R \leq 2$ 表示水旱灾害 1~2 年一遇,其他以此类推。

表 2 三峡水库蓄水前后熵信息扩散模型的扩散指标计算结果

| 年份 | 水灾 | | | 旱灾 | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | a_f | b_f | h_f | a_d | b_d | h_d |
| 1950-2002 | 0.001 | 0.396 | 0.106 | 0 | 0.338 | 0.090 |
| 2003-2017 | 0.004 | 0.169 | 0.044 | 0.012 | 0.115 | 0.028 |

低于蓄水前的 12.500 年一遇。由此认为,三峡水库蓄水后减少了入湖水量与泥沙,在水灾成灾率不断增大的情况下,三峡水库的蓄水功能对湖区水灾成灾率的减缓作用愈加显著,不仅有效地减少了该地区水灾发生的风险次数,尤其是特大水灾发生次数的风险,而且在一定时间内降低了水灾的风险等级。

表 4 不同成灾率下的农业水灾风险等级

| 成灾率 I_{2f} /% | 1950-2002 年 | 2003-2017 年 |
|-----------------|-------------|-------------|
| ≥ 5 | 低风险 | 中低风险 |
| ≥ 10 | 中风险 | 中低风险 |
| ≥ 15 | 中低风险 | 低风险 |
| ≥ 20 | 中低风险 | 低风险 |

2.2.4 洞庭湖区农业旱灾风险性评估 由风险分析模型和风险等级划分标准,得到三峡水库蓄水后洞庭湖区农业旱灾成灾的风险概率、风险等级(表 6 和表 7),据此分析在不同成灾率发生的情况下,三峡水库蓄水后该研究区农业旱灾的风险性。

当 $I_{2d} \geq 5\%$ 时,旱灾在三峡水库蓄水前呈现中低风险,为 2~4 年一遇,蓄水后呈现中风险,为 1~2

年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 1.931 年一遇,高于蓄水前的 3.968 年一遇;当 $I_{2d} \geq 10\%$ 时,旱灾在蓄水前依旧呈现中低风险,为 5~7 年一遇,蓄水后呈现中高风险,为 2~3 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 2.786 年一遇,依旧高于蓄水前的 5.435 年一遇;当 $I_{2d} \geq 15\%$ 时,旱灾在蓄水前呈现中低风险,为 6~10 年一遇,蓄水后呈现低风险,为大于 10 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 27.027 年一遇,低于蓄水前的 8.850 年一遇;在 $I_{2d} \geq 20\%$ 时,旱灾在水库蓄水前表现为中低风险,为 10~20 年一遇,蓄水后表现为低风险,大于 20 年一遇,此处研究结果显示蓄水后的重现期为 1000.000 年一遇,远低于蓄水前的 15.152 年一遇。由此认为,三峡水库蓄水后因其出库流量的减少,使长江干流的枯水期提前,从而减少荆南三口入湖流量、降低湖区水位,使得在旱灾成灾率 $\geq 5\%$ 和 $\geq 10\%$ 的情况下,三峡水库蓄水后旱灾风险概率、风险等级均稍高于水库蓄水前。

表 5 不同成灾率下的农业水灾风险概率

| 成灾率 $I_{2f}/\%$ | 1950—2002 年 | | 2003—2017 年 | |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 风险概率 | 风险几年 | 风险概率 | 风险几年 |
| | $P_{f前}$ | 一遇 $R_{f前}$ | $P_{f后}$ | 一遇 $R_{f后}$ |
| 5 | 0.242 | 4.132 | 0.415 | 2.410 |
| 10 | 0.201 | 4.975 | 0.192 | 5.208 |
| 15 | 0.138 | 7.246 | 0.057 | 17.544 |
| 20 | 0.080 | 12.500 | 0.025 | 40.000 |
| 25 | 0.041 | 24.390 | 0.006 | 166.667 |
| 30 | 0.022 | 45.455 | 0 | — |
| 35 | 0.014 | 71.429 | 0 | — |
| 40 | 0.010 | 100.000 | 0 | — |
| 45 | 0.007 | 142.857 | 0 | — |
| 50 | 0.004 | 250.000 | 0 | — |
| 55 | 0.002 | 500.000 | 0 | — |
| 60 | 0.001 | 1000.000 | 0 | — |

表 6 不同成灾率下的农业旱灾风险等级

| 成灾率 $I_{2d}/\%$ | 1950—2002 年 | 2003—2017 年 |
|-----------------|-------------|-------------|
| ≥ 5 | 中低风险 | 中风险 |
| ≥ 10 | 中低风险 | 中高风险 |
| ≥ 15 | 中低风险 | 低风险 |
| ≥ 20 | 中低风险 | 低风险 |

综上所述,三峡水库蓄水后洞庭湖区农业水旱灾害成灾率 $\geq 5\%$ 、 $\geq 10\%$ 时,旱灾的风险等级分别为 1~2 年一遇的中风险、2~3 年一遇的中高风险,分别高于水灾 2~4 年一遇的中低风险、5~7 年一遇的中低风险,水旱灾害成灾率 $\geq 15\%$ 、 $\geq 20\%$ 时,水旱灾害风险等级表现一致,分别大于 10 年一遇的低风险、大于 20 年一遇的低风险。

表 7 不同成灾率下的农业旱灾风险概率

| 成灾率 $I_{2d}/\%$ | 1950—2002 年 | | 2003—2017 年 | |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 风险概率 | 风险几年 | 风险概率 | 风险几年 |
| | $P_{d前}$ | 一遇 $R_{d前}$ | $P_{d后}$ | 一遇 $R_{d后}$ |
| 5 | 0.252 | 3.968 | 0.518 | 1.931 |
| 10 | 0.184 | 5.435 | 0.359 | 2.786 |
| 15 | 0.113 | 8.850 | 0.037 | 27.027 |
| 20 | 0.066 | 15.152 | 0.001 | 1000.000 |
| 25 | 0.043 | 23.256 | 0 | — |
| 30 | 0.031 | 32.258 | 0 | — |
| 35 | 0.021 | 47.619 | 0 | — |
| 40 | 0.013 | 76.923 | 0 | — |
| 45 | 0.006 | 166.667 | 0 | — |
| 50 | 0.002 | 500.000 | 0 | — |
| 55 | 0.001 | 1000.000 | 0 | — |
| 60 | 0 | — | 0 | — |

3 洞庭湖区农业水旱灾害风险趋势预测

3.1 基于不同时间尺度下 SRI 指数的变化特征

运用标准化径流指数(SRI)依次计算得到 1956—2017 年 SRI1、SRI3、SRI6、SRI12 指数,并由此绘制图 3,再结合表 1 进行综合分析获得以下认识。

SRI1 反映了每月水旱变化过程(图 3a),三峡水库蓄水前的 564 个月和蓄水后的 180 个月中,洞庭湖区处于水灾状态的月份数量分别为 190 和 22,处于旱灾状态的月份数量分别为 162 和 75,蓄水后水灾发生频率由 33.69% 下降到 12.22%,下降率为 21.47%,旱灾发生频率由 28.72% 上升至 41.67%,上升率为 12.95%。

SRI3 反映了季尺度下水旱变化过程(图 3b),在三峡水库蓄水后,研究区各等级的水灾发生频率均处于减少状态,且中涝类型减少最为显著,由 11.88% 减少到 0.56%,减少率为 11.32%,旱灾发生频率总体上处于下降状态,但重旱和特旱这 2 个类型均呈上升状态,分别由 1.42% 上升至 4.44%、由 1.77% 上升至 5.56%,上升率分别为 3.02%、3.79%。

SRI6 是在半年尺度下(图 3c),反映较长时间段内水旱的变化,在该尺度下,水旱灾害发生频率比 SRI1、SRI3 变化明显,其中,在三峡水库蓄水后各等级的水灾发生频率均处于下降状态,各等级的旱灾发生频率均处于上升状态。水灾发生频率由 38.48% 下降至 8.33%,下降率为 30.15%,旱灾发生频率由 24.11% 上升至 60%,上升率为 35.89%。

SRI12 是反映年尺度下水旱的变化特征(图 3d)。在该尺度下,三峡水库蓄水后水灾发生频率由 39.18% 减少至 10.56%,减少率为 28.62%,其中在 2003 年之后特涝和重涝事件极少发生,轻涝事件大幅度减少,由 19.33% 减少至 4.44%,减少率为 14.89%。旱灾发生频率则处于增加状态,由 18.97% 增加至 65.56%,增加率为

46.59%,特旱、中旱和轻旱发生频率分别由 0.18%增至 6.11%、由 4.26%增至 21.11%、由 9.4%增至 33.89%。总

体而言,洞庭湖区水灾发生频率减少了 28.62%,而旱灾发生频率增加了 46.59%,增减幅度都较为明显。

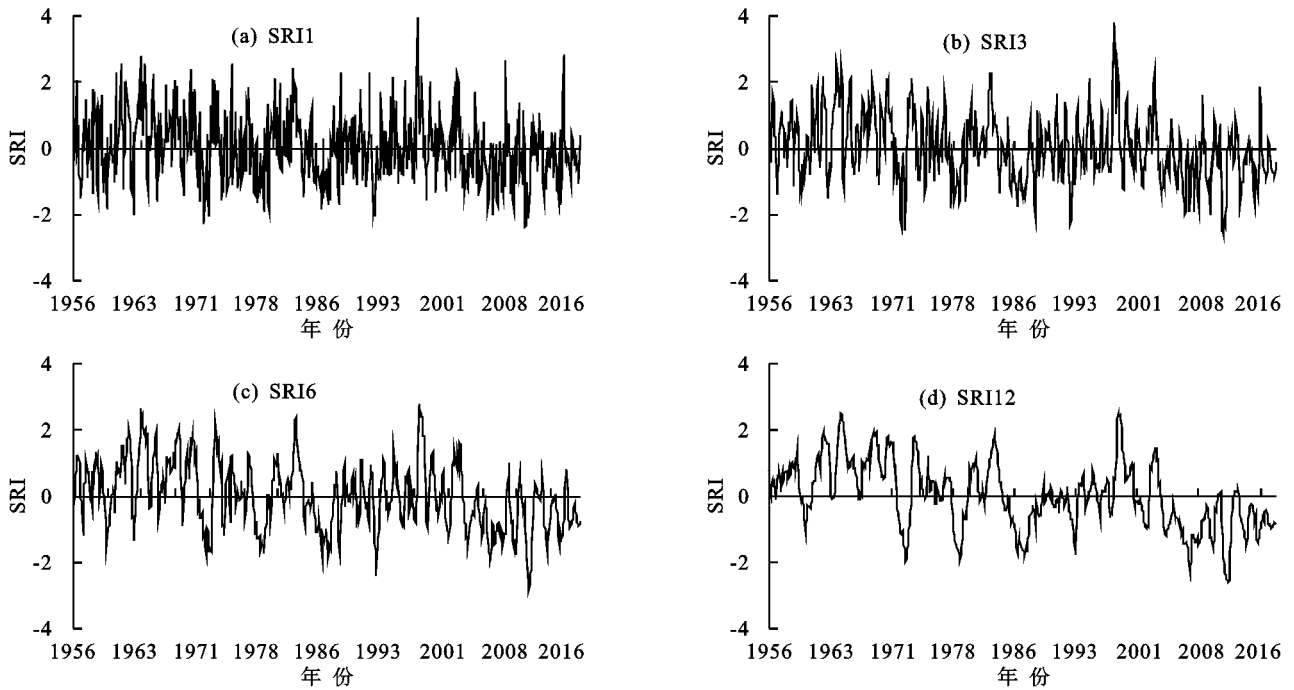


图 3 洞庭湖区不同时间尺度下水旱灾害变化过程

通过不同时间尺度 SRI 指数的综合分析可知,三峡水库蓄水后洞庭湖区水灾的发生频率在各个尺度下均处于减少状态,旱灾的发生频率在季尺度下(SRI3)处于下降状态,下降率为 8.73%,其他尺度下均处于上升状态。

3.2 基于 R/S 分析的农业水旱灾害风险趋势预测

分析可知,在三峡水库蓄水后,各时间尺度下 SRI 出现中涝以上($SRI \geq 1.5$)的年份数量分别为 4, 3, 1, 0 年,出现中旱以上($SRI \leq -1.5$)的年份数量分别为 6, 7, 8, 5 年。鉴于此,在农业水旱灾害风险趋势预测时,选取 1956—2017 年中出现中涝以上、中旱以上的年份。通过对多时间尺度的 SRI 进行 R/S 分析,计算得到相应的 Hurst 指数 H 、分维 D 、相关系数 r (表 8)。

这里以 SRI12 为例,探究三峡水库蓄水后洞庭湖区水旱灾害风险趋势。取 $SRI \geq 1.5$ 的年份进行 R/S 分析(图 4),结果表明,在过去 62 年间,研究区

有 13 年处于中涝以上,线性趋势是 0.008/a,呈现出上升状态,而 Hurst 指数为 $0.188 < 0.5$,说明该区水灾未来整体的发展态势与过去变化相反,即呈减弱趋势。取 $SRI \leq -1.5$ 的年份进行 R/S 分析(图 5)发现,在过去 62 年间,研究区有 11 年处于中旱以上,线性趋势是 $-0.009/a$,呈现出下降状态,而 Hurst 指数为 $0.193 < 0.5$,表明该区旱灾未来整体的发展态势与过去变化相反,即呈增加趋势。由此推断,洞庭湖区未来水旱灾害风险趋势大致为:水灾将呈减小的趋势,旱灾将呈增大的趋势。

表 8 多时间尺度下的 SRI 进行 R/S 分析的计算结果

| SRI | 水灾指数 | | | 旱灾指数 | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | H | D | r | H | D | r |
| SRI1 | 0.246 | 1.754 | 0.882 | 0.203 | 1.797 | 0.658 |
| SRI3 | 0.234 | 1.766 | 0.928 | 0.253 | 1.747 | 0.797 |
| SRI6 | 0.166 | 1.834 | 0.867 | 0.151 | 1.849 | 0.856 |
| SRI12 | 0.188 | 1.812 | 0.918 | 0.193 | 1.807 | 0.800 |

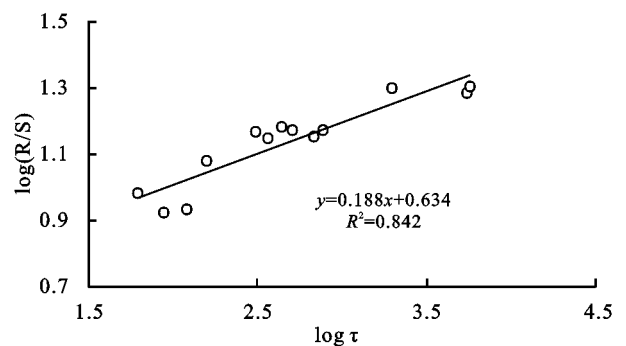
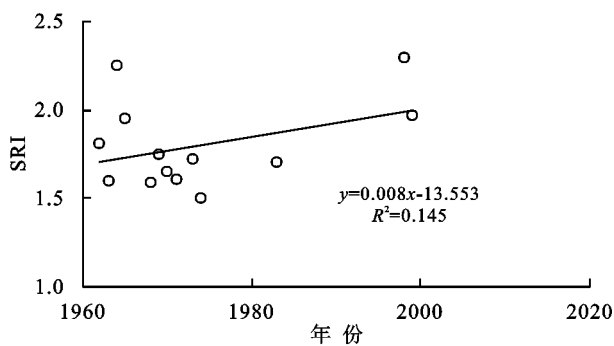


图 4 中涝以上年份 SRI12 序列的变化趋势和 R/S 分析

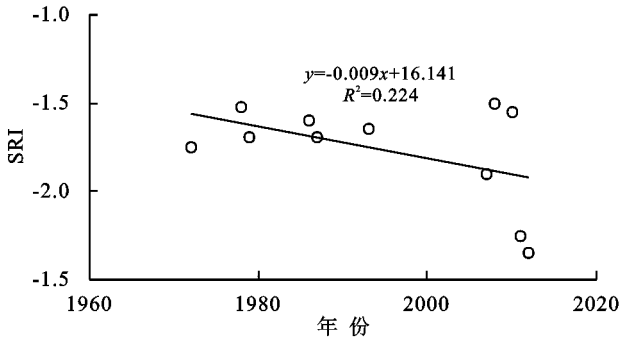


图 5 中旱以上年份 SRI12 序列的变化趋势和 R/S 分析

4 结论

(1)在三峡水库蓄水后,农业水旱灾害受灾率、成灾率均有所减少,受灾率分别由 6.65%减少至 1.21%,由 5.97%减少至 2.48%,成灾率依次由 2.97%减少到 0.71%,由 2.98%减少到 0.99%,从受灾率、成灾率的减少幅度上看,水灾均高于旱灾。说明三峡水库蓄水对洞庭湖区农业水旱灾害造成不同程度的影响。

(2)三峡水库蓄水后水旱灾害成灾率 $\geq 5\%$ 的风险等级依次呈现为 2~4 年一遇的中低风险、1~2 年一遇的中风险,水旱灾害成灾率 $\geq 10\%$ 的风险等级分别呈现为 5~7 年一遇的中低风险、2~3 年一遇的中高风险,水旱灾害成灾率 $\geq 15\%$ 的风险等级均表现为大于 10 年一遇的低风险,水旱灾害成灾率 $\geq 20\%$ 的风险等级均为大于 20 年一遇的低风险。表明水旱灾害成灾率 $\geq 5\%$, $\geq 10\%$ 时,水旱灾害呈现周期短、再现频率高的特点,并且旱灾风险同水灾相比,风险相对更大,周期更短。

(3)基于 R/S 分析的预测结果可知,该湖区在三峡水库蓄水后未来农业水旱灾害的风险趋势是,水灾风险将呈现减小趋势,而旱灾风险将呈现增大趋势。这就暗示了要求三峡水库补水调度期适当加大库坝下泄水量,降低农业旱灾风险。

(4)影响洞庭湖区农业水旱灾情以及灾害风险性的因素较多,情况也较为复杂,本文只考虑了三峡水库蓄水后地表径流对该区农业水旱灾害程度、风险的影响,实际上与全球气候变暖、降水、蒸发、农业承灾体的抗灾能力、四水入湖水量等因素密切相关,这些问题还有待于今后做进一步探讨。

参考文献:

[1] 李景保,胡巍,尹辉,等.1950—2009 年洞庭湖流域农业水灾演变特征及分异规律[J].自然资源学报,2011,26(9):1496-1505.

[2] 黄崇福.自然灾害基本定义的探讨[J].自然灾害学报,2009,18(5):41-49.

[3] 马保成.自然灾害风险定义及其表征方法[J].灾害学,2015,30(3):16-20.

[4] 廖玉芳,赵辉,彭嘉栋,等.洞庭湖区旱涝灾害加剧的气象成因[J].灾害学,2016,31(1):29-54.

[5] 黎燧隆,章新平,尚程鹏.洞庭湖流域夏季降水特征及早涝年份大气环流分析[J].气象研究与应用,2018,39(1):1-5.

[6] 刘电英,田莉萍,龚容.洞庭湖区汛期旱涝灾害变化特征分析[C]//中国气象学会.第 32 届中国气象学会年会 SI 灾害天气监测、分析与预报.天津:中国气象学会,2015:943-948.

[7] 胡毅鸿,李景保.1951—2015 年洞庭湖区旱涝演变及典型年份旱涝急转特征分析[J].农业工程学报,2017,33(7):107-115.

[8] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等.基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J].资源科学,2010,32(6):1103-1110.

[9] 孙霞,黄一民,吴华武.6 套格点数据中洞庭湖流域旱涝特征分析[J].湖南农业大学(自然科学版),2018,44(6):629-637.

[10] 李景保,钟一苇,周永强,等.三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J].自然资源学报,2013,28(9):1583-1593.

[11] 方春明,胡春宏,陈绪坚.三峡水库运用对荆江三口分流及洞庭湖的影响[J].水利学报,2014,45(1):36-41.

[12] 周永强,李景保,张运林,等.三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值[J].地理学报,2014,69(3):409-421.

[13] 朱玲玲,陈剑池,袁晶,等.洞庭湖和鄱阳湖泥沙冲淤特征及三峡水库对其影响[J].水科学进展,2014,25(3):348-357.

[14] 李景保,代勇,欧朝敏,等.长江三峡水库蓄水运用对洞庭湖水沙特性的影响[J].水土保持学报,2011,25(3):215-219.

[15] 王冬,李义天,邓金运,等.三峡水库蓄水期洞庭湖水力要素变化初步分析[J].水利发电学报,2014,33(2):26-32.

[16] 徐长江,徐高洪,戴明龙,等.三峡水库蓄水期洞庭湖区水文情势变化研究[J].人民长江,2019,50(2):6-12.

[17] 胡光伟,毛德华,李正最,等.三峡工程建设对洞庭湖的影响研究综述[J].自然灾害学报,2013,22(5):44-52.

[18] 陈虞平.三峡水库运用后长江与洞庭湖水沙交换的变化及响应[D].北京:中国水利水电科学研究院,2016.

[19] 黄韬,张俊宏,邓志民,等.三峡水库蓄水前后洞庭湖区水环境演化过程研究进展[J].水资源与水工程学报,2018,29(6):61-67.

[20] 帅红,李辉艳,李赛,等.三峡工程对洞庭湖水环境质量的

- 影响[J].长江流域资源与环境,2018,27(6):1315-1323.
- [21] 湖南统计年鉴委员会.湖南统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018:163-169.
- [22] 代勇.三峡水库运行后洞庭湖湿地生态系统服务功能价值研究[D].长沙:湖南师范大学,2012.
- [23] 湖南省水旱灾害编辑部.1950—1993年湖南省水旱灾害总结摘录[Z].湖南省水旱灾害编辑部,长沙:1994.
- [24] 湖南省防汛抗旱指挥部办公室.1994—2003年湖南省水旱灾情况汇编[Z].湖南省防汛抗旱指挥部,长沙:2003.
- [25] 湖南省防污抗旱指挥部办公室.2004—2017年湖南省防汛抗旱总结[Z].湖南省防汛抗旱指挥部,长沙:2017.
- [26] 李孟刚,周长生,连莲.基于熵信息扩散理论的中国农业水旱灾害风险评估[J].自然资源学报,2017,32(4):620-631.
- [27] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): 226-236.
- [28] 何福力,胡彩虹,王纪军,等.基于标准化降水、径流指数的黄河流域近 50 年气象水文干旱演变分析[J].地理与地理信息科学,2015,31(3):69-75.
- [29] 周洪华,王云倩,方功焕,等.标准化径流指数在阿克苏河水文干旱特征识别中的应用[J].水资源与水工程学报,2019,30(2):6-18.
- [30] 张瑞.水系连通变异下长江荆南三口地区旱涝演变特征及驱动因素分析[D].长沙:湖南师范大学,2019.
- [31] 吴杰峰,陈兴伟,高路,等.基于标准化径流指数的区域水文干旱指数构建与识别[J].山地学报,2016,34(3):282-289.
- [32] 中国国家标准化管理委员会.GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2017:3-5.
- [33] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transaction of Transactions of the American Society of Engineers, 1951, 116(1): 770-799.
- [34] 龚艳冰,张继国,刘高峰,等.基于 SPI 指数与 R/S 分析的曲靖市干旱特征研究[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):273-277.
- [35] 张涵丹,卫伟,薛菱.基于 R/S 分析和 Mann-Kendall 检验的定西市气温降水变化特征[J].水土保持研究,2015,22(6):183-189.
- [36] 王怀清,殷剑敏,孔萍,等.鄱阳湖流域千年旱涝变化特点及 R/S 分析[J].长江流域资源与环境,2015,24(7):1214-1220.
- [37] Kaboudan M A. Diagnosing time-series dynamical structures [J]. Chaos, Solution and Fractals, 1996, 7(7): 977-990.
- [38] 王莺,张强,韩兰英.基于信息扩散理论的中国南方水旱灾害风险特征[J].干旱气象,2016,34(6):919-925.
- (上接第 161 页)
- [13] Kimoto A, Nearing M A, Zhang X C, et al. Applicability of rare earth element oxides as a sediment tracer for coarse-textured soils [J]. Catena, 2006, 65: 214-221.
- [14] Liu G, Xiao H, Liu P L, et al. An improved method for tracing soil erosion using rare earth elements [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1670-1679.
- [15] Zhang X C, Liu G, Zheng F L. A simple enrichment correction factor for improving erosion estimation by rare earth oxide Tracers [J]. Vadose Zone Journal, 2017, 16(12): e345.
- [16] Oades J M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure [J]. Geoderma, 1993, 56: 377-400.
- [17] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 7-31.
- [18] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 109: 81-94.
- [19] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科技出版社,1978.
- [20] 肖海.稀土元素定量监测坡面浅沟产生及发育过程[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [21] 刘普灵,田均良,周佩华,等.土壤侵蚀稀土元素示踪法实验研究[J].稀土,2001(2):37-40.
- [22] Song W, Liu P L, Yang M Y, et al. Using REE tracers to measure sheet erosion changing to rill erosion [J]. Journal of Rare Earths, 2003, 21(5): 587-590.
- [23] Liu S, Guo Z C, Pan Y, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure [J]. Geoderma, 2019, 351: 36-48.
- [24] Spencer K L, Suzuki K, Hillier S. The development of rare earth element-labelled potassium-depleted clays for use as cohesive sediment tracers in aquatic environments [J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11(6): 1052-1061.
- [25] 耿韧,张光辉,洪大林,等.黄土高原农地草地林地土壤团聚体稳定性沿降水梯度的变化特征[J].农业工程学报,2019,35(3):141-148.
- [26] 范云涛,雷廷武,蔡强国.湿润速度对土壤表面强度和土壤团聚体结构的影响[J].农业工程学报,2008,24(5):46-50.
- [27] 邵明安,王全九,黄明斌,等.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [28] 卢金伟,李占斌.土壤团聚体研究进展[J].水土保持研究,2002,9(1):81-85.
- [29] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [30] 雷廷武,张晴雯,赵军.细沟水蚀动态过程的稳定性稀土元素示踪研究[J].水利学报,2004,35(12):84-91.