

# 气候变化对陕北黄土高原水土流失的影响

张雪才, 崔晨凤\*, 蔡明科, 王伟 (西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 利用“3S”技术探究气候变化对陕北黄土高原的水土流失的影响, 通过分析 2000~2010 年陕北黄土高原水土流失的重要影响因子(降雨、植被、坡度、温度、地表风速), 结合水土流失评价指标——风险指数, 研究气候变化对陕北黄土高原水土流失的影响。结果表明, 2000~2010 年陕北黄土高原的风险指数呈上升趋势, 气候变化对陕北黄土高原水土流失产生了不利影响。因此, 开展水土保持工作刻不容缓, 以防止生态环境进一步恶化。

**关键词** 3S; 气候变化; 陕北黄土高原; 水土流失

**中图分类号** S126 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)10-04532-05

## The Impact of Climate Change on Soil Erosion in the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province

ZHANG Xue-cai et al (College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract** “3S” technology was used to explore the impact of climate change on soil erosion in the Loess Plateau of northern Shaanxi. Important factors including rainfall, vegetation, slope, temperature and surface wind speed affecting soil erosion in the Loess Plateau of northern Shaanxi were analyzed from 2000 to 2010, combined with soil erosion evaluation-risk index, the impact of climate change on soil erosion in the Loess Plateau in northern Shaanxi Province was researched. Risk index showed an ascendant trend from 2000 to 2010. Climate change adversely affected soil erosion in the Loess Plateau of northern Shaanxi. Carrying out soil and water conservation engraved work brooks no delay to prevent further deterioration of the ecological environment.

**Key words** 3S; Climate change; Loess Plateau in Northern Shaanxi; Soil erosion

水土流失是一个全球性的生态环境问题, 我国是水土流失最为严重的国家之一。黄土高原位于黄河中游, 土壤侵蚀十分严重, 多年平均输沙量达 16 亿 t。全区 62.38 万 km<sup>2</sup> 的面积, 水土流失面积高达 50 万 km<sup>2</sup>, 其中年侵蚀模数超过 5 000 t/(km<sup>2</sup>·a) 的面积达 14.5 万 km<sup>2</sup>。长期以来, 水土流失严重地制约着陕北地区自然资源的合理开发利用, 阻碍着经济发展, 使陕北地区成为全国贫困地区之一。钱林清<sup>[1]</sup>利用 1951~1980 年的气候资料, 系统地阐述了黄土高原气候要素和气候灾害的主要统计特征、气候变迁、气候区划和气候形成与变化的原因; 戴英生<sup>[2]</sup>认为, 在地质历史时期黄土高原就发生了水土流失, 然而强烈的流失却发生于中更新世末及近代; 研究表明, 20 世纪 80 年代以来, 黄土高原地区气候暖干化发展趋势明显<sup>[3-5]</sup>; 谢金南<sup>[6]</sup>认为, 西北地区东部(陕西省、甘肃省河西走廊东段以东、宁夏)连旱、重旱频数增加, 干旱区域面积扩大, 强度增强; 叶燕华等<sup>[7]</sup>研究了黄土高原春季降水的时空分布特征和变化规律, 认为黄土高原春季降水具有明显的南北差异和东西差异, 总降水量呈减少趋势; 王毅荣<sup>[8]</sup>分析了黄土高原植被生长期降水异常的分布和振荡特征; 姚玉璧等<sup>[3,9]</sup>研究了黄土高原气候和径流量变化特征及其对生态环境的影响, 表明我国黄土高原年平均气温呈明显的上升趋势, 年降水量和植物生长季降水量均呈递减的趋势, 黄土高原中部 7 条主要河流径流量呈明显的下降趋势; 周晓红等<sup>[10]</sup>指出, 黄土高原 100 年来气温持续升高, 年降

水平均减少了 100 mm 左右, 生态与环境更加恶化; 曹颖等<sup>[11]</sup>研究了气候变化对泾河流域径流和输沙量的影响; 赵昆昆等<sup>[12]</sup>研究了全球气候变化下陕北黄土地貌的环境演变。上述研究虽然对全球气候变化下黄土高原的一些环境要素进行了研究, 但一般采用传统方法, 仅考虑了气候变化对单一因子的影响, 关于气候变化背景下各要素对陕北黄土高原水土流失影响的研究较少。“3S”技术是集遥感(RS)、全球定位系统(GPS)与地理信息系统(GIS)于一体的高新技术手段, 利用“3S”技术可以快速、准确、客观地掌握研究区水土流失现状, 从而为找出导致水土流失的原因, 防治水土流失, 改变水土流失的现状, 防止泥沙进入黄河, 合理开发自然资源, 促进陕北经济的发展提供科学依据。因此, 笔者利用“3S”技术, 在全球气候变化的大背景下, 研究降雨、植被、坡度、温度和地表风速因素对陕北黄土高原水土流失的影响, 找出在气候变化的条件下水土流失的主要原因, 以期水土流失的防治提供科学依据。

## 1 研究区概况

陕北黄土高原幅员辽阔, 地处半干旱、半湿润地区, 位于 107.3°~111.4°E, 34.8°~39.6°N, 北接长城沿线风沙区与内蒙古自治区相邻, 南接渭北高原区, 东隔黄河与山西相望, 西与宁夏和甘肃两省毗邻, 是我国黄土高原的中心部分, 地势西北高, 东南低。它是在中生代基岩所构成的古地形基础上, 覆盖新生代红土和很厚的黄土层, 再经过流水切割和土壤侵蚀而形成的。基本地貌类型是黄土塬、梁、峁、沟、壑, 是黄土高原经过现代沟壑分割后留存下来的高原面, 是黄河的主要产沙源地, 也是我国甚至世界上水土流失最严重的区域之一, 60% 以上的土地存在着不同程度的水土流失, 年平均泥沙流失量达到 2 000~2 500 t/km<sup>2</sup>, 主要包括榆林、延安及铜川 3 个地级市, 共 25 个县 4 个市辖区, 9 689 个行政村。土

**基金项目** 国家自然科学基金项目(60705009); 水资源与水电工程科学国家重点实验室开放基金项目(2011B083); 西北农林科技大学博士启动基金(2010BSJJ056); 大学生创新创业训练计划项目(1201210712077)。

**作者简介** 张雪才(1990-), 男, 河南项城人, 本科生, 专业: 农业水利工程, E-mail: xnzxc1990@163.com。\* 通讯作者, 讲师, 博士, 从事 3S 技术在水文水资源和农业水土工程中的应用研究, E-mail: cuichenfeng@163.com。

**收稿日期** 2013-03-09

地面积 83 990.067 km<sup>2</sup>, 占陕西省土地总面积的 40.81%, 人口 605.9 万人, 占陕西省总人口的 17.31%。陕北黄土高原地貌形态复杂多样, 陡坡沟多, 土地利用类型多种多样, 农牧、农林交错性特征明显, 长期以来水土流失和风沙危害尤为严重。

## 2 资料与方法

**2.1 数据来源** 陕北黄土高原 2000~2010 年 MODIS-NDVI 数据和 2010 年 GDEM 数据来自国际数据服务平台。其中, MODIS-NDVI 数据的空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d; GDEM 数据的空间分辨率为 90 m。陕北黄土高原 2000~2010 年榆林、定边、吴旗、横山、绥德、延安、长武、洛川、耀县和神木 10 个气象站的降雨、温度、地表风速数据, 来自中国科学气象数据共享服务网和中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原生态环境数据库。

**2.2 数据处理** 各项数据的处理过程(图 1)如下: ①裁剪出陕北黄土高原的矢量界限; ②对 MODIS-NDVI 数据进行转换, 再裁剪出陕北黄土高原的 MODIS-NDVI 数据, 并根据其值的大小依次赋值; ③同理, 把融合好的 GDEM 数据裁剪出, 再进行重分类处理; ④用 Kriging 插值法分别对 10 个气象站的年均降雨量、年均温度、年均地表风速数据进行插值, 分别得出陕北黄土高原的年均降雨量、年均温度、年均地表风速数据, 裁剪后再进行重分类处理; ⑤根据 2000~2010 年以

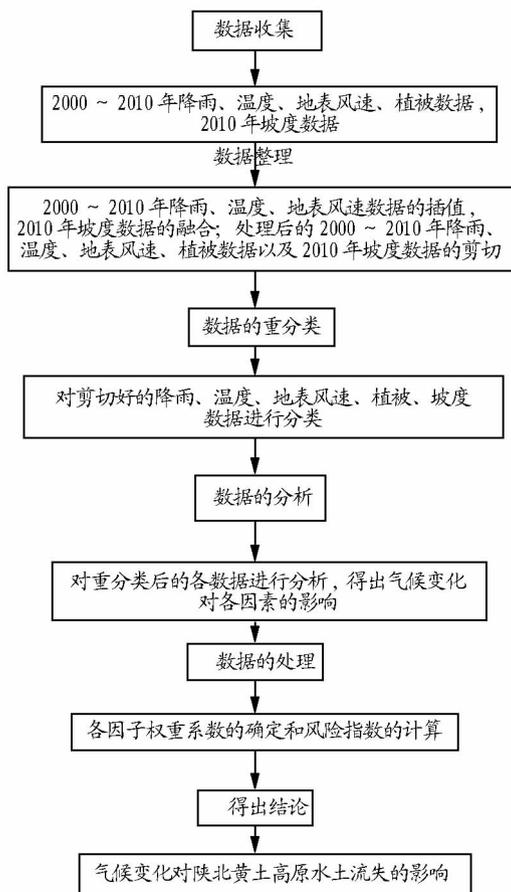


图 1 数据处理与分析流程

各数据的变化, 得出气候变化对水土流失影响因子的影响;

⑥考虑各个因素对水土流失影响的大小程度, 利用数据正规化方法来计算权重系数  $B_{ij}$ 。当  $X_{\max_{ij}} - X_{\min_{ij}} \geq X_{\max_j} - X_{\min_j}$  时,  $B_{ij} = \frac{X_{\max_j} - X_{\min_j}}{X_{\max_{ij}} - X_{\min_{ij}}}$ , 反之,  $B_{ij} = \frac{X_{\max_{ij}} - X_{\min_{ij}}}{X_{\max_j} - X_{\min_j}}$ 。式中,  $X_{\max_{ij}}$  表示在第  $i$  年  $j$  因素的最大值;  $X_{\min_{ij}}$  表示在第  $i$  年  $j$  因素的最小值;  $X_{\max_j}$  表示在第  $j$  因素的最大值;  $X_{\min_j}$  表示在第  $j$  因素的最小值;  $X_{\text{mean}_{ij}}$  表示在第  $i$  年  $j$  因素的平均值。  $B_{ij}$  的变化范围为 0~1, 原始数据经过正规化变换后, 内部数值的相对关系并未改变, 仅是使各个量处于相同的量级上。⑦再计算每年水土流失的指标风险指数<sup>[13]</sup>  $F_i$ ,  $F_i = A_i + B_{ij}C_{ij}$ 。式中,  $F_i$  表示第  $i$  年发生水土流失的风险指数,  $F_i$  的数值越大, 表示发生水土流失的可能性就越大;  $A_i$  表示第  $i$  年重分类好的 MODIS-NDVI 的矢量图层;  $B_{ij}$  表示第  $i$  年  $j$  因素的权重系数;  $C_{ij}$  表示第  $i$  年  $j$  因素重分类好的矢量图层。⑧根据风险指数的大小, 来判断陕北黄土高原水土流失的变化情况。

## 3 气候变化对各因子的影响

**3.1 对降雨因子的影响** 由图 2 可知, 在全球气候变化影响下, 2000~2010 年间陕北黄土高原的最大降雨量和最小降雨量变化不明显, 比较稳定, 但均呈减少的趋势。经过 ARC-GIS 插值处理, 可得 2000~2010 年陕北黄土高原的降雨量分布: 陕北黄土高原的降雨主要集中于与关中接壤的洛川和长武一带, 但降雨量是随时间减少的; 而榆林西南、绥德西南、定边东北、吴旗北部和延安北部降雨较少, 但降雨量是随时间增加的, 整体随时间波动有所减少, 这与其他学者<sup>[3,14]</sup> 得出的结论一致。以 2000 年为例, 陕北黄土高原降雨量分布如图 3 所示。

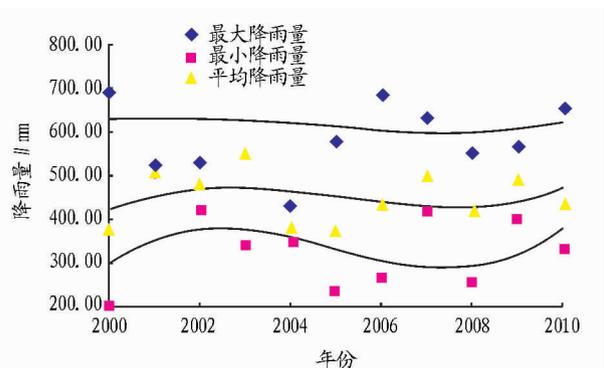


图 2 2000~2010 年陕北黄土高原降雨量变化趋势

**3.2 对温度因子的影响** 由图 4 可知, 在气候变化的影响下, 2000~2010 年陕北黄土高原年最高温度呈升高趋势; 最低温度比较稳定; 平均温度随时间有轻微的波动。但从总体来看, 温度变化不明显。经过 ARCGIS 插值处理, 可得到 2000~2010 年陕北黄土高原的温度分布情况: 陕北黄土高原年均温度较高区主要分布在绥德南部、吴旗东南部和关中北部, 并且最高温度维持在 11.5℃左右, 最低温度维持在 8.5℃(图 5)。研究表明, 黄土高原的年均温度持续升高<sup>[3-4,15-17]</sup>, 并且温度的升高对减缓水土流失起到一定的作用。

**3.3 对地表风速因子的影响** 风是重要的气候要素之一, 而风速和风向是风最重要的特征。由图 6 可知, 在气候变化

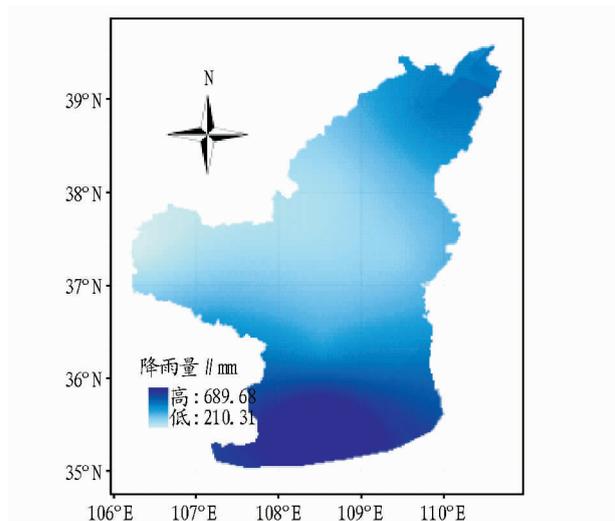


图3 2000年陕北黄土高原降雨量分布

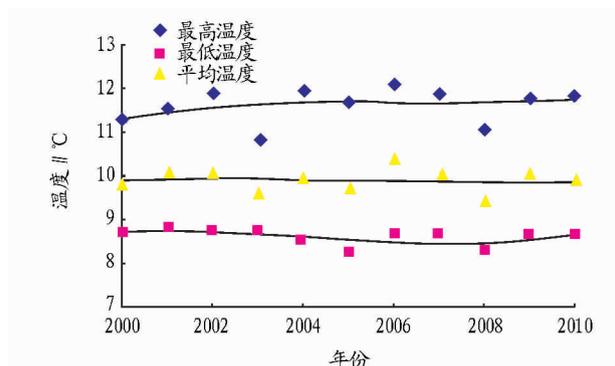


图4 2000~2010年陕北黄土高原温度变化趋势

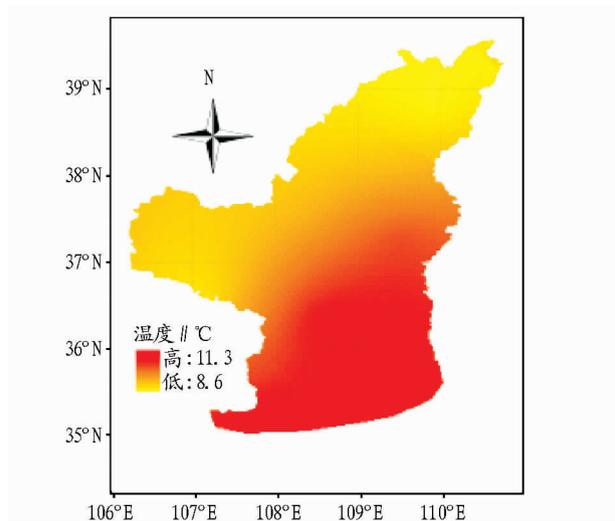


图5 2000年陕北黄土高原温度分布

的影响下,2000~2010年陕北黄土高原年最大风速有所降低,由3.30降至2.90 m/s;年均地表风速和最低风速随时间波动上升。经过ARCGIS插值处理,可得到2000~2010年陕北黄土高原的地表风速分布情况:在全球气候变化的大背景下,2000~2010年最大地表风速所在区域逐渐由定边一带向榆林、横山、绥德一带移动,而最小地表风速一般集中在吴旗、延安、洛川、神木一带(图7)。

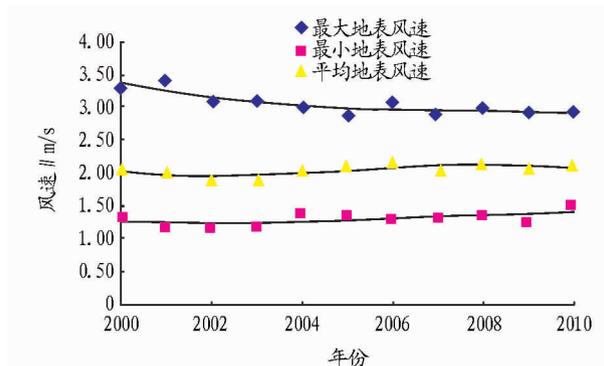


图6 2000~2010年陕北黄土高原地表风速变化趋势

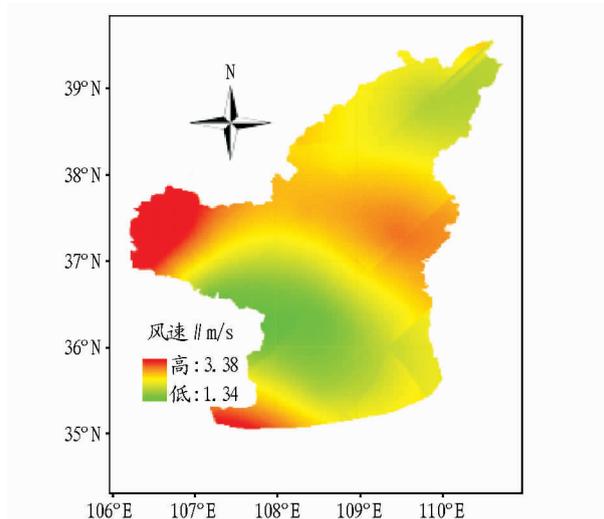


图7 2000年陕北黄土高原地表风速分布

**3.4 对植被因子的影响** 植被是非常重要的陆地生态系统中的自然资源,可以作为防止水土流失的关键因素。由表1可知,在气候变化大背景下,2000~2010年陕北黄土高原局部最大NDVI(归一化植被指数)值随时间降低,而最小NDVI值几乎不变。说明气候变化对局部生长茂密的植被影响较大,大范围内的植被比较稳定。当植被生长旺盛并且较茂密,在其他因素保持不变时,水土流失发生的可能性较小。以2000年为例,陕北黄土高原植被指数分布如图8所示。考虑到植被对水土流失的影响较其他因素重要,该研究对植被指数采用赋值法进行处理,为了与其他因素分类保持一致,此处也采用4类赋值。当NDVI值为0.004~0.009时,赋值4;当NDVI值为0.010~0.200时,赋值3;当NDVI值为0.210~0.420时,赋值2;当NDVI值为0.430~0.620时,赋值1。

**3.5 对坡度因子的影响** 坡度是反映了地表斜面对水平面的倾斜程度,是地表形态的重要指标之一,坡度的大小制约着水土流失的强弱。孟广涛等<sup>[18]</sup>指出,在影响水土流失的因素中,地形因素是非常重要的,特别是坡度因素,以往人勾绘坡度图既费时、又费工,并且精度不高,利用“3S”技术可以很好的克服这些缺点和不足。由于下垫面坡度的变化受到人类活动的影响比较强烈,而受气候变化的影响不是很大,并且在短期内的影响可以认为是不变的,与其他作用的影响

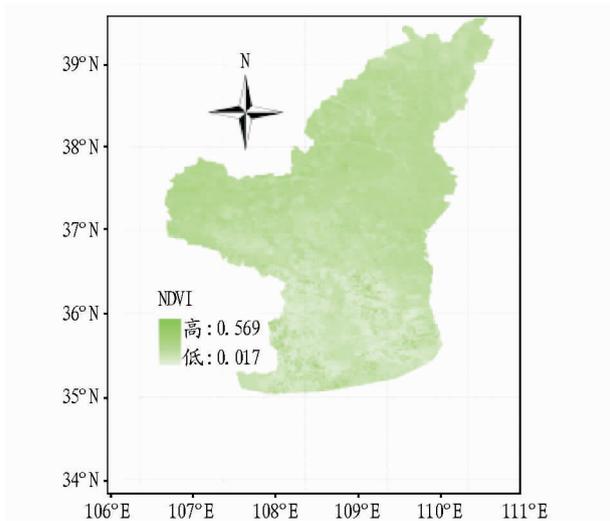


图8 2000年陕北黄土高原植被指数分布

相比可以不再考虑,故该研究采用了2010年坡度数据作为研究对象,并根据黄委会绥德水保试验站在韭园沟多年试验结果,黄土丘陵沟壑区在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的区间内 $3^{\circ}$ 、 $8^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $25^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$ 是较明显的临界坡度值<sup>[19-23]</sup>,将坡度分为 $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 、 $5^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 、 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 、 $25^{\circ} \sim 85^{\circ}$ ,权重系数 $B = 0.86$ 。2010年陕北黄土高原坡度空间分布如图9所示。

表1 2000~2010年陕北黄土高原MODIS-NDVI变化

年份	最大	最小
2000	0.569	0.017
2001	0.406	0.011
2002	0.427	0.013
2003	0.223	0.015
2004	0.410	0.006
2005	0.397	0.008
2006	0.336	0.011
2007	0.619	0.009
2008	0.448	0.016
2009	0.195	0.015
2010	0.587	0.004

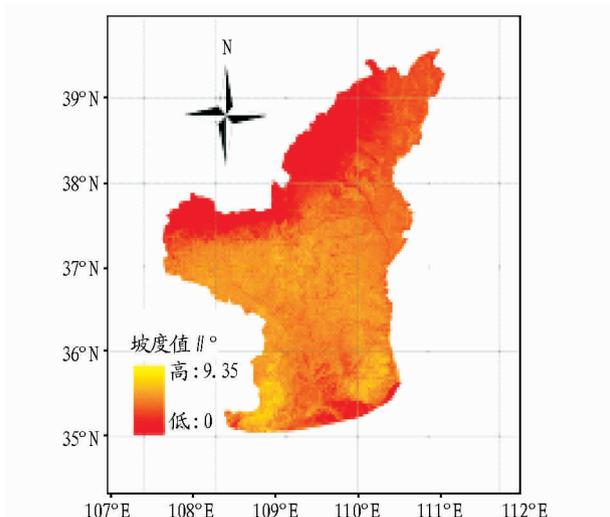


图9 2010年陕北黄土高原坡度分布

## 4 各因子对水土流失的综合影响

**4.1 降雨** 气候变化引起降雨量、温度、地表风速、植被和坡度的变化,这些因素又与水土流失密切相关。土壤侵蚀的原动力最主要是雨滴击溅作用和因降雨产生的地表径流,一次降雨过程中的降雨特点与侵蚀关系十分密切。如降雨量、降雨强度、雨滴组成和雨型等降雨特性均可以影响土壤侵蚀力;降雨动能与降雨强度成正比,年降雨量越大,雨滴直径越大,对地面的打击力越强,其侵蚀总量也就越大,水土流失可能因此而加强。径流的冲刷力取决于它的动能和势能,水体动能的大小与流量和含沙量有关,温度和风能影响天然降雨的动能,降雨强度会影响它的势能。高振纪等<sup>[24]</sup>研究了黄土高原水土流失监测指标体系,认为天然降雨的雨滴直径大小又和雨型有关,对于黄土高原的雨型,雨滴大小组成是随雨强增大而增大,所以黄土高原的降雨强度越大,降雨侵蚀力就越大。经研究发现,陕北黄土高原气候变化引起降雨量的减少,地面径流也有所减少,降雨因子对水土流失的作用就会有所降低,因为影响陕北黄土高原水土流失的因素有多种,它们之间又都有一定的关系,不能只从降雨这一单独因素来考虑,还应考虑其他因素的影响。

**4.2 坡度与温度** 在国内外研究中,Zingg第1个通过试验建立了土壤侵蚀量与坡度之间的经验关系,证明在坡度较小时,坡度每增加1倍,土壤侵蚀量将增加2.61~2.80倍<sup>[25]</sup>。魏天兴<sup>[26]</sup>认为,在黄土区坡度与地表径流量呈正相关关系。气候变化导致降雨量减少,由于黄土高原的地面径流是由降雨产生的,所以由地面径流产生的水土流失也相应减少。李志等<sup>[16]</sup>的研究表明,气候变暖引起地面径流的减少,温度的升高对水土流失可以起到一定的减缓作用。温度不是黄土高原地区植被生长的限制性因子,但是由于温度上升加速了地表蒸散发过程,潜在地加剧了水分的缺乏,由此造成黄土高原地区土壤干层的发育,对植被生长具有明显的抑制作用,为了证明这一推论还需进行基于地面定点观测的专门研究<sup>[27]</sup>。

**4.3 植被指数** 植被指数是反映植被生长状况和活性的重要指示因子,是植被的较好指示。生长旺盛的植被有利于防止水土流失的发生,植被的生长和温度、降水等气候条件密切相关,并且不同的植被类型对温度、降水的响应存在很大的差异。水分条件又是黄土高原地区植被生长的关键因素,降水对植被的空间分布具有决定性的作用。陕北黄土高原的植被类型呈现从东南向西北由阔叶林向森林灌木草原过渡的特点,天然次生林主要分布在志丹、安塞、宝塔3县(区)的南部及甘泉县境内,其他县(区)植被以灌木草原为主<sup>[33]</sup>。由此可知,降雨对陕北黄土高原的水土流失具有双重的影响。黄土高原降水相对较少的西北地区植被覆盖呈现增加的趋势,而降水相对较多的南部、西南部地区植被存在不同程度退化<sup>[27]</sup>。

**4.4 综合影响** 由图10可知,在气候变化条件下,2000~2010年陕北黄土高原的最大和最小风险指数变化缓慢,平均风险指数变化较大,且呈上升趋势。说明2000~2010年陕

北黄土高原发生水土流失的可能性逐年增加,即全球气候变化对陕北黄土高原水土流失有不利的影 响。2000~2010年水土流失主要集中在洛川西南部,神木东北部较为严重;绥德东南部一带、榆林东南部和横山东北部一带、洛川西北部、吴旗西北部和定边东北部、耀县北部出现中等程度水土流失,其余地区为轻微水土流失(图11)。但从整体来看,水土流失现象随时间恶化,水土流失严重区范围逐渐扩大。以洛川为例,其风险指数由7.86增至9.35,并且水土流失面积也随之增加。2005~2007年,随温度升高,在其他因素变化不大时,在一定范围内,水土流失现象有所减缓。降雨要素和植被要素对陕北黄土高原水土流失的作用比温度要素大。导致水土流失的原因有自然因素和人类活动,其中人类活动对陕北黄土高原水土流失影响比自然因素大,所以开展水土保持工作是陕北黄土高原水土流失防治的主要措施。

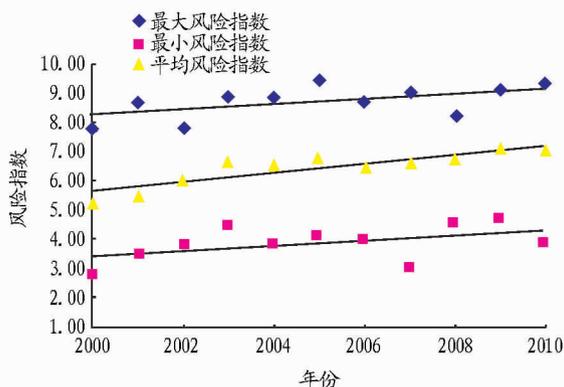


图10 2000~2010年陕北黄土高原风险指数变化趋势

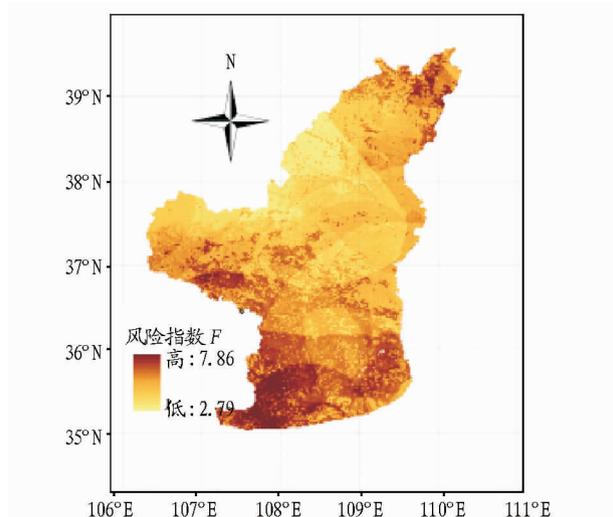


图11 2000年陕北黄土高原风险指数分布

## 5 结语

利用“3S”技术通过研究气候变化引起其他要素的变化,来分析各要素对陕北黄土高原水土流失的作用,从而反应气候变化对陕北黄土高原水土流失的影响。该研究所得结论与2000~2010年陕北黄土高原水土流失的现状是吻合的,说明该方法是可行的。运用此方法不仅可以节省人力、物

力、财力,而且也可以实现不间断的监测,找出导致陕北黄土高原水土流失的主要原因,为水土流失的防治及促进陕北经济的发展提供了科学依据。该研究不足之处在于各要素的精度较低,考虑各研究因素之间关系比较简单,各要素的时间序列比较短。今后,应利用先进的仪器测得准确的气候变化数据,考虑全面的影响因素,利用较长时间的要素数据,探究各要素之间是否还存在其他更加接近实际的关系,从而得出气候变化对陕北黄土高原水土流失影响的比较真实、全面、可靠的结果,为更好地保护陕北黄土高原,促进当地经济发展提供有力的技术支持和措施保障。

## 参考文献

- [1] 钱林清. 黄土高原气候[M]. 北京:气象出版社,1991:4.
- [2] 戴英生. 从黄河中游的古气候环境探讨黄土高原的水土流失问题[J]. 人民黄河,1980(4):1-8.
- [3] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J]. 资源科学,2005,27(5):146-152.
- [4] 杨新,延军平. 陕甘宁地区气候暖干化趋势分析[J]. 干旱区研究,2002,19(3):67-71.
- [5] 刘晓清,赵景波,于学峰,等. 黄土高原气候变暖干旱化趋势及适应对策[J]. 干旱区研究,2006,23(4):627-631.
- [6] 谢南金. 中国西北干旱气候与预测研究[M]. 北京:气象出版社,2000.
- [7] 叶燕华,郭江勇,王凤. 黄土高原春季降水的气候特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2004,22(1):11-17.
- [8] 王毅荣. 黄土高原植被生长期降水对全球气候变化的响应[J]. 山西大学学报:自然科学版,2005,28(2):214-219.
- [9] 姚玉璧,李耀辉,王毅荣,等. 黄土高原气候与气候生产力对全球气候变化的响应[J]. 干旱地区农业研究,2005,23(2):202-208.
- [10] 周晓红,赵景波. 黄土高原气候变化与植被恢复[J]. 干旱区研究,2005,22(1):176-181.
- [11] 曹颖,张光辉,罗榕婷. 全球气候变化对泾河流域径流和输沙量的潜在影响[J]. 中国水土保持科学,2010,8(2):30-35.
- [12] 赵昆昆,周宝同,王晓洁,等. 全球气候变化下陕北黄土地貌的环境演变[J]. 安徽农业科学,2011,39(24):14788-14790.
- [13] 张雪才,王伟,贺新娟. 3S技术在水土流失动态变化分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报,2012,10(4):31-34.
- [14] 李振朝,韦志刚,文军,等. 近50年黄土高原气候变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(3):57-62.
- [15] 王绍武,叶瑾琳,龚道溢. 近百年中国气温序列的建立[J]. 应用气象学报,1998,9(4):392-401.
- [16] 李志,刘文兆,郑粉莉. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响[J]. 生态学报,2010,30(9):2379-2386.
- [17] 任国玉,郭军,徐铭志,等. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报,2005,63(6):948-952.
- [18] 孟广涛,方向京,和丽萍,等. 3S技术在水土保持动态监测中的应用[J]. 水土保持研究,2007,14(2):8-13.
- [19] 曹文洪. 土壤侵蚀的坡度界限研究[J]. 水土保持通报,1993,13(4):1-5.
- [20] 靳长兴. 论坡面侵蚀的临界坡度[J]. 地理学报,1995,50(3):234-238.
- [21] 胡世雄,靳长兴. 坡面土壤侵蚀临界坡度问题的理论与实验研究[J]. 地理学报,1999,54(4):347-355.
- [22] 靳长兴. 坡度在坡面侵蚀中的作用[J]. 地理研究,1996,15(3):57-63.
- [23] 王秀英,曹文洪,陈东. 土壤侵蚀与地表坡度关系研究[J]. 泥沙研究,1998,21(2):36-41.
- [24] 高振纪,鄂伦,马修军. 黄土高原水土流失监测指标体系研究[J]. 水土保持研究,2005,12(4):53-55.
- [25] ZINGG A W. Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff[J]. Agricultural Engineering, 1940,21(2):59-64.
- [26] 魏天兴,朱金兆. 黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J]. 北京林业大学学报,2002,24(1):59-62.
- [27] 信忠保,许沁心,郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 地球科学,2007,37(11):1504-1514.
- [28] 李志熙,白岗松,杜峰. 陕北黄土丘陵陵区植被建设分区研究[J]. 水土保持通报,2004,24(4):14-22.