

# 黄土塬区坡面土壤侵蚀对全球气候变化的响应

李志<sup>1,2</sup>, 刘文兆<sup>2</sup>, 张勋昌<sup>3</sup>, 郑粉莉<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma 73036, USA)

**摘要:** 气候变化将对黄土高原土壤侵蚀产生重要影响, 评估其可能影响可为农业生产提供重要的决策依据。基于全球环流模式 HadCM3, 建立黄土塬区长武县 2010—2039 年 A2a, B2a 和 GGal 共 3 种气候情景; 进而使用土壤侵蚀预报模型 WEPP 模拟该区农田 (5 和 10 坡地) 的土壤侵蚀变化。结果表明, 2010—2039 年长武县年均降水量可能增长 1.8%~17.5%, 年均最高和最低温度分别升高 0.5~0.9 和 2.0~2.3。相对于目前气候下的耕作条件, 2010—2039 年 5 月和 8—10 月的径流量和侵蚀量显著增大; 年均径流量可增长 52%~119%, 年均土壤侵蚀量可能增长 37%~170%。气候变化将加剧黄土高原农田水土流失, 需要采取相应的措施来减缓其不利影响。

**关键词:** 气候变化; 黄土高原; 全球环流模式; 天气发生器; WEPP

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)01-0001-06

中图分类号: S157, P461

## Response of Slope Erosion to Global Climate Change on the Loess Tableland

LI Zhi<sup>1,2</sup>, LIU Wen-zhao<sup>2</sup>, ZHANG Xun-chang<sup>3</sup>, ZHEN Fen-li<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. USDA-ARS, Grazinglands Research Lab., El Reno, OK 73036, USA)

**Abstract:** Climate change will have considerable impacts on soil erosion on the Loess Plateau and assessing the possible impacts may provide useful information for agriculture production. The objective of this study was to simulate the response of slope erosion (5° and 10°) on the loess tableland during 2010 - 2039 based on HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) and WEPP (Water Erosion Prediction Project) model. GCMs predicted a 1.8% to 17.5% increase in annual precipitation, 0.5 to 0.9 rises in maximum temperature, and 2.0 to 2.3 rise in minimum temperature for the region. Compared with the present climate, the runoff and soil loss of May and August to October will increase greatly. Percent increases, as averaged for each emissions scenario and slope, ranged from 51% to 117% for annual runoff and 31% to 170% for annual soil loss. Climate change will exacerbate soil and water loss in hillslopes on the Loess Plateau and some countermeasures are necessary to mitigate the adverse effects of climate change.

**Keywords:** climate change; Loess Plateau; general circulation model; CLIGEN; WEPP

人类活动大幅增加了大气中 CO<sub>2</sub> 等温室气体的浓度, 导致自然温室效应增强, 从而引起地球表面和大气进一步增温, 可能对自然生态系统和人类造成不利影响<sup>[1-3]</sup>。

目前, 一些潜在的严峻变化已经得到确认, 包括温度升高, 降水量增大, 高强度降水事件增多等<sup>[4]</sup>, 其中, 降水量和高强度降水事件增多将有很大的潜在影响, 因为灾难性的环境破坏通常都是由罕见的暴雨引起的<sup>[5-6]</sup>。这些预计的气候变化会使洪水、干旱、土壤侵蚀和相关环境问题发生的风险增大, 但它们对特定地区的实际破坏却是未知的, 需要进行评估<sup>[7]</sup>。

黄土高原水土流失严重程度居世界首位, 再加上地处干旱半干旱区域导致的水资源短缺, 该区农业生产和生态建设受到严重的限制<sup>[8]</sup>。而全球变化所带来的气候异常, 导致地球上的水循环在发生变化, 必将直接影响水土资源的变化趋势<sup>[9-10]</sup>。全球变化背景下, 黄土高原水土资源将如何变化? 其保护措施是否要改变以及如何改变? 这些问题直接关系到黄土高原地区的农业生产和生态建设, 需要进行详细的评估。但目前在黄土高原开展的气候变化影响评估多针对过去的气候变化, 对未来气候影响的评估很少, 不利于为区域可持续发展提供宏观决策依据。

评估气候变化影响时,常结合气候变化情景与模拟模型进行。建立气候情景时,全球环流模式(GCMs)被广泛应用<sup>[11]</sup>,但应用 GCMs 进行气候变化影响评估时常常存在一个重要障碍,即 GCMs 的低分辨率输出与农业模型的高分辨率输入之间的矛盾<sup>[11]</sup>,如 GCMs 输出是基于网格的月数据,而农业模型需要输入基于站点的日数据。基于这种需求,大量的时空尺度转换方法,又称解集(downscaling)方法,被建立起来,主要分为两类:动力学方法和统计方法。动力学方法即区域气候模式(RCM),可以获得高的时空分辨率,但是由于计算量大,费用昂贵,只能用于一些有限的区域。统计法容易实现并可以按照当地条件校准 GCM 输出而被广泛应用<sup>[12]</sup>,统计法可以分为 3 类,即转换函数法<sup>[13-16]</sup>、天气发生器法 CLIGEN (Climate Generator)<sup>[17-19]</sup>和环流分型技术<sup>[20-21]</sup>。统计方法在应用时往往需要组合使用,如使用转换函数法进行空间解集后再用天气发生器法进行时间解集是比较常用的方法。

本研究的目标是使用一种新的转换函数法将 GCMs 网格数据进行空间尺度转换后,基于天气发生器进行时间解集,建立黄土高原长武县 2010—2039 年的 3 种气候情景 A2a, B2a 和 GGal;并将其作为 WEPP 的输入文件来探讨该区农田径流和侵蚀对气候变化的潜在响应,从而为该区生态建设、农业生产和可持续发展提供决策依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区域概况

长武县地处黄土高原陕甘交界处,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量 582.3 mm,其中 52.8% 分布在 7—9 月,年均温 9.2℃。属典型的雨养农业,传统耕作系统是 3 年轮作的冬小麦—冬小麦—春玉米。该区是黄土高原沟壑区的典型代表,塬高,沟深,坡陡,塬区黄土层厚度超过 100 m。土壤属黑垆土,母质是中壤质马兰黄土,土质均匀疏松,通透性好,有利于植物生长;但由于降雨集中且多暴雨,很容易发生土壤侵蚀。

长武县土地利用类型多样。据长武县农业局 2008 年发布的《土地利用现状分类面积统计表》,该区主要包括耕地、林地、园地(包含果园)、草地、建设用地、水域和未利用地等,其中耕地占总面积的 45.3%,且近年来耕地面积呈增长趋势,如 2006 和 2007 年分别增加了 818 和 36 hm<sup>2</sup>。需要注意的是,坡地和梯田约占长武县总面积的 20%,再加上塬面边缘的耕地,都容易产生土壤侵蚀;如果未来的极端降水事件增多,必

将导致更加严重的水土流失,不利于其农业生产和生态建设。

### 1.2 数据来源及情景选择

基于统计法进行尺度转换,需要两部分数据:GCMs 产生的网格数据与研究站点的实测气象数据。GCMs 数据来自英国 Hadley 中心的 HadCM3 模式,包括追算的 1957—2001 年和预测的 2010—2039 年长武县所在网格的月气象数据;实测数据来自长武县气象局,是 1957—2001 年间的日气象数据,包括降水、温度、风速和风向等。

气候变化具有不确定性,因此,进行气候变化影响评估时,往往选择多种情景以尽可能地描述未来状况<sup>[22]</sup>。基于不同情景的特点及数据可得性,选取 A2a, B2a 和 GGal 这 3 种情景,A2a 通过分区促进经济和社会发展,但是较少注重环境;B2a 强调环境意识,通过分区安排来促进经济、社会和环境的可持续发展;GGal 将 1860—1990 年间温室气体的增长情况应用到 2099 年以前,常被作为基准气候。这 3 种情景分别代表温室气体中高排放标准、中低排放标准和当前排放标准下的气候变化(CO<sub>2</sub> 排放量 A2a > GGal > B2a)。

### 1.3 GCMs 空间解集方法

以降水量为例,GCMs 空间解集法具体操作方法如下。

第一步,求取转换函数。使用 GCM 输出和长武实测的 1957—2001 年的月降水量数据。对于每一个月,将实测的(y 值)和 GCM 输出的(x 值)月降水量分别进行排序,对每个月的两组数据求取单变量线性和非线性函数各一个,来获得每个月的转换函数。

第二步,对未来气候进行空间解集。使用第一步得到的转换函数,将 GCM 输出的 2010—2039 年的月降水量作为 x 值求取 y 值,即得到王东沟流域在 2010—2039 年间的月降水量数据。注意两个转换函数的使用:GCM 输出的 2010—2039 年数据介于 1957—2001 年数值范围时,使用非线性函数求取 y 值;GCM 输出的 2010—2039 年数据超出了 1957—2001 年数值范围时,超出部分使用线性函数转化。使用线性函数是为了使数据更加接近,不至于出现飞点。

第三步,计算均值差和方差比率。使用转换函数求取的 y 值就代表王东沟 2010—2039 年的月降水量,计算 2010—2039 年与实测 1957—2001 年的月降水量均值差和方差比率,这些参数可以应用到时间转换中来产生该区 2010—2039 年的日天气序列数据。

用类似的方法,可以将 GCMs 网格月最高、最低温度进行空间解集并计算均值差和方差比率用于时间解集。

### 1.4 GCMs 时间解集方法

首先,使用长武 1957—2001 年实测的逐日天气数据产生 CLIGEN 的基本输入文件,该文件中包括气象变量(降水、温度、风速、辐射等)逐月的均值和方差等统计参数(基线参数)。然后,使用空间解集得到的均值差和方差比率来调整上述的基线参数。其中,与降水相关的参数包括降水转移概率  $P_{w/w}$  (降水—降水概率)和  $P_{w/d}$  (降水—不降水概率)、均值和方差,这些参数将做如下调整:降水转移概率的调整,使用实测降水的转移概率和均值建立线性关系,再用该线性关系和空间解集获得的月降水均值来计算未来降水的转移概率;方差调整,使用空间解集得到的方差比率与基线参数的方差相乘;降水均值的调整,将空间解集得到的均值差加到基线参数的降水均值上。

温度均值的调整与降水均值的调整相似,可以将空间解集得到的均值差加到基线参数的相应变量上;使用计算出的方差比率,未来的温度方差可以通过放大基线相应变量的方法获得。通过空间和时间尺度的转换,就可以得到未来气候情景的输入文件,使用这些输入文件运行天气发生器 CLIGEN,就可以输出 2010—2039 年的 3 种气候情景 A2a, B2a 和 GGa1。

### 1.5 WEPP 模型校准

所用 WEPP 模型是 v2004.7,经修改后可以预测  $\text{CO}_2$  对作物生长和蒸散的效应;使用的  $\text{CO}_2$  浓度目前

为  $350 \text{ ml/m}^3$ ,2025 年 A2a 为  $592 \text{ ml/m}^3$ ,B2a 为  $416 \text{ ml/m}^3$ ,GGa1 为  $445 \text{ ml/m}^3$ 。CERN 长武生态试验站 1988—1992 年径流小区实测的土壤、气候、作物管理信息、地表径流和泥沙沉积被用来校准 WEPP 模型。使用当地的传统耕作模式冬小麦—冬小麦—春玉米,在收获一周后除去秸秆,在种植前一周犁耕;在变化后的气候条件下,为了使作物适应增高的温度,本研究将作物的耕作期进行了调整,小麦晚播种 3 d 早收获 3 d,玉米早播种 3 d 早收获 3 d。模拟的两个坡地均为  $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ,坡度分别为  $5^\circ$  和  $10^\circ$ ,径流、侵蚀以及作物产量都被校准到实测的水平。

## 2 结果与讨论

### 2.1 预测的气候变化

2.1.1 降水 表 1 为 A2a, B2a 和 GGa1 情景预测的 2010—2039 年降水和极端温度的年均变化,年均降水量分别增加 10.8, 80.6 和  $101.4 \text{ mm}$ ;相对变化为 1.8%, 13.9% 和 17.5%;降水方差增大,与 1957—2001 年方差的比率分别为 1.25, 1.27 和 1.13。整体而言,GGa1 和 B2a 情景的降水量增长较大,而 A2a 和 B2a 的方差变化较大。B2a 情景的年均降水量和方差变化均较大,如果仅从降水要素对侵蚀的影响来说, B2a 可能会产生更多的径流和土壤流失,但径流和侵蚀的产生具有季节性,其可能变化主要受降水的季节分布影响。

表 1 2010—2039 年相对于 1957—2001 年的年均气候变化

排放情景	降水		最高温度		最低温度	
	变化量/ %	方差比率	方差比率	变化量/ %	方差比率	变化量/ %
A2a	1.8	1.25	0.9	1.08	2.3	1.13
B2a	13.9	1.27	0.5	1.22	2.1	1.09
GGa1	17.5	1.13	0.8	1.00	2.0	0.97

图 1 为预测的 2010—2039 年较实测的 1957—2001 年降水均值和方差的季节变化。整体上,夏秋季降水量变化比冬春季大,主要发生变化的月份是 5 和 7—10 月;除了 A2a 在 7—8 月降水减少以外,其它情景在这几个月份普遍增长。

长武县产生土壤侵蚀的降水主要出现在 7—10 月,其中 7—8 月的暴雨占全年暴雨总数的 62%,因此,这 4 个月即使方差增幅不大,也可能导致大量的土壤侵蚀。这 4 个月中, A2a 情景的方差变化最大,其中 10 月降水方差剧增到 5.43; B2a 次之, 8—10 月都有所增长,但增幅均不大; GGa1 情景 9—10 月的方差均增大。这些变化对径流和土壤侵蚀模拟将会产生很大的影响。

2.1.2 温度 与 1957—2001 年相比较, A2a, B2a 和 GGa1 预测 2010—2039 年的年均最高温度分别增加 0.9, 0.5 和 0.8; 年均最低温度分别增加 2.3, 2.1 和 2.0。整体而言,最低温度和最高温度都有所增长,但最低温度升高更加明显,这与《气候变化国家评估报告》的结论一致<sup>[2]</sup>。预测的月温度方差, B2a 和 A2a 增大,但是两种情景预测的增长率相差不大; GGa1 轻微减小。

图 2 表示了 2010—2039 年最高和最低温度的季节变化。总体上,各月的平均温度普遍升高,春季和冬季是两个增长高峰,表明暖冬现象将更加严重。预测的温度方差, 6—8 月普遍增大,而该阶段是长武县的高温期,表明长武县未来温度变化剧烈,出现极端

高温的可能性增大。对于最高温度, A2a 数据点的大部分都位于直线  $y = 1$  之上, 说明其预测的温度方差普遍增大, 最高温度变化将更加剧烈, 而 B2a 和

GGa1 则没有一致的规律; 对于最低温度, B2a 预测各月温度的方差普遍增大。温度变化将影响作物生长和蒸散等, 进而导致径流和侵蚀变化。

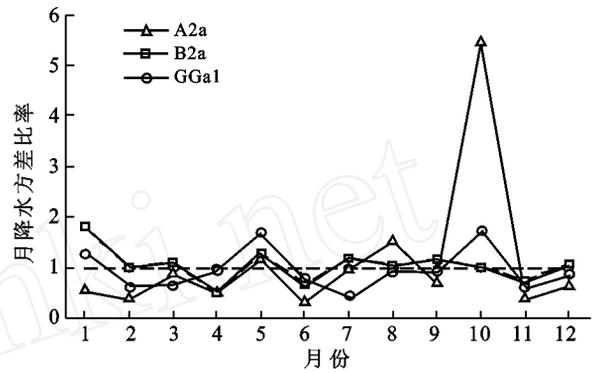
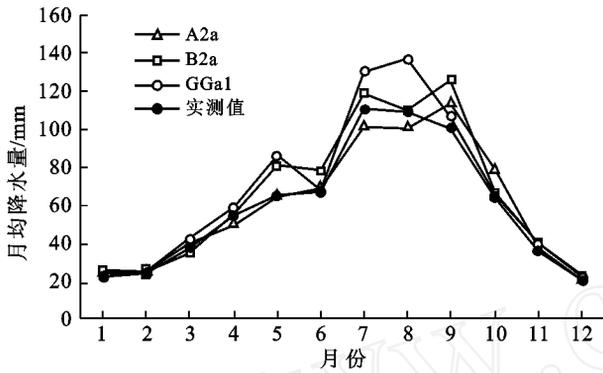


图 1 3 种情景预测的 2010—2039 年较实测 1957—2001 年的降水量和方差变化

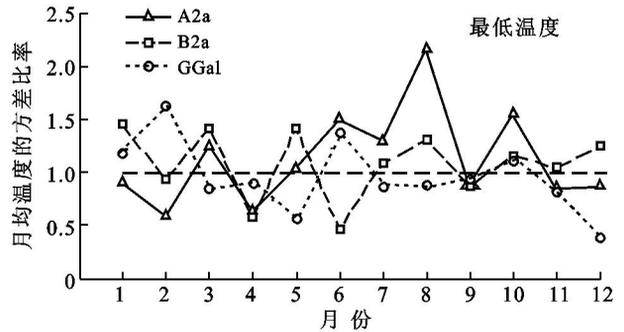
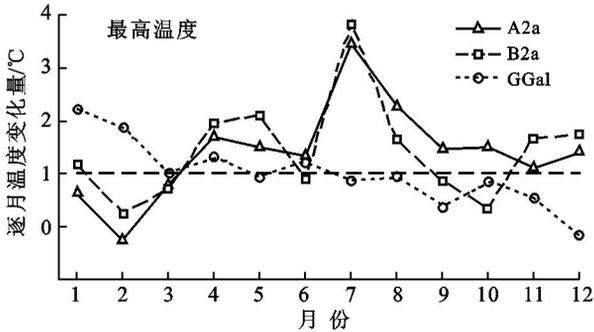
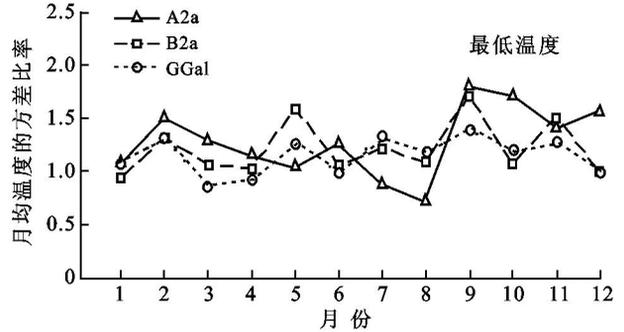
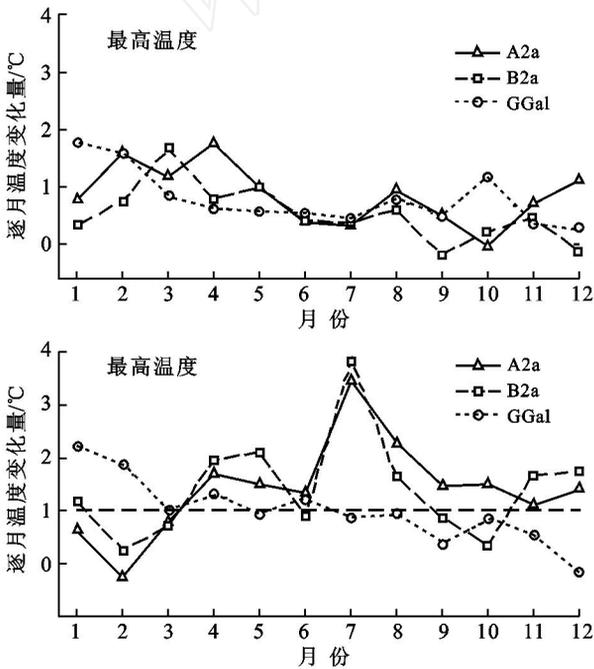


图 2 3 种情景预测的 2010—2039 年较实测 1957—2001 年的最高、最低温度的变化量和方差比率

## 2.2 气候变化对径流、侵蚀的影响

2.2.1 月径流、侵蚀量变化 由于 WEPP 对 5 和 10 坡地的径流和侵蚀模拟具有相似的趋势, 本文仅分析 5 坡地的变化状况(图 3)。与目前气候比较, 长武 2010—2039 年 5 月和 8—10 月的径流和侵蚀显著增大, 平均增幅分别为 539% 和 618%; 6 月的径流和侵蚀均减少, 平均减幅分别为 61% 和 70%; 7 月份的径流和侵蚀变化没有一致的规律, 有增有减; 其它月份变化不大。这些变化可能主要受降水方差变化影响(图 1), 如 5 和 8—10 月降水方差普遍增大导致径流和侵蚀的增加, 6 月降水量普遍增大但由于降水方差减小而导致径流和侵蚀减少, 10 月 A2a 情景由于方差远高于其它情景导致其侵蚀量最大, 说明降水方

差变化对径流和侵蚀有很大的影响。

2.2.2 年径流、侵蚀量变化 较目前气候下的耕作条件, WEPP 模拟的 3 种情景的年均径流和侵蚀量都有显著的增长, 且径流和侵蚀具有相似的变化趋势(表 2)。

径流的增长范围介于 10° 坡地 GGa1 情景的 52% 到 A2a 情景 5 坡地的 119%, 土壤侵蚀的增长范围介于 GGa1 情景 10° 坡地的 37% 到 A2a 情景 5 坡地的 170%。3 种情景中, A2a 预测的径流和侵蚀增长最大, B2a 次之, GGa1 最小, 主要是两个方面的原因: (1) 径流和侵蚀增长与 8—10 月降水方差变化具有相似的趋势, 说明降水方差变化导致的暴雨变化对径流和侵蚀具有很大的影响, 而 A2a 的降水方差增

幅最大,B2a 次之,GGa1 最小;(2) 径流、侵蚀与作物生长状况有关(表 2),GGa1 的作物产量最高,表明生

长状况最好,对于减少径流和土壤侵蚀有显著作用;B2a 次之;A2a 产量最小,减弱径流能力最差。

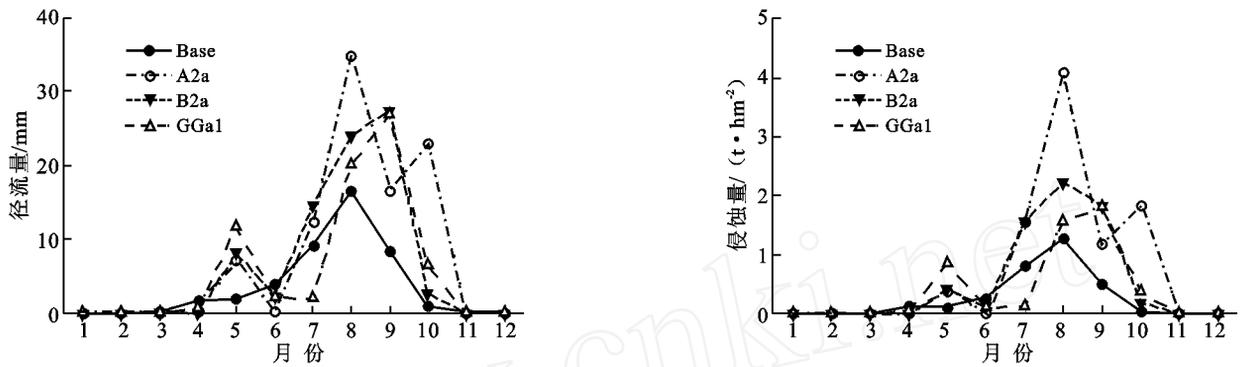


图 3 2010—2039 年不同情景下 5 坡地的逐月经流和侵蚀量

表 2 3 种气候情景下不同坡度年径流、土壤侵蚀和作物产量对气候变化的响应

情景		Base (350)		A2a (592)		B2a (416)		GGa1 (445)	
		5°	10°	5°	10°	5°	10°	5°	10°
径流	径流量/ mm	43	51	94	105	79	89	70	77
	变化率/ %	0	0	119	105	84	74	62	52
土壤侵蚀	侵蚀率/ (t·hm <sup>-2</sup> )	3.1	9.3	8.4	23.6	6.3	17.3	4.8	12.8
	变化率/ %	0	0	170	154	104	86	56	37
小麦	产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	2.9	2.8	2.9	2.8	3.5	3.4	4.1	3.9
	变化率/ %	0	0	- 1	- 1	23	22	41	41
玉米	产量/ (t·hm <sup>-2</sup> )	7.0	6.8	8.0	7.8	8.6	8.3	9.6	9.5
	变化率/ %	0	0	15	14	23	22	38	38

注:表头括号内为不同排放情景的 CO<sub>2</sub> 使用浓度(ml/ m<sup>3</sup>)。

### 3 结论

长武县 2010—2039 年年降水量可能增长 1.8%~17.5%,其中 GGa1 增长最大,A2a 增长最小;方差增大 1.13~1.25 倍,特别是在暴雨发生的主要月份 7—10 月,A2a 变化最大,B2a 次之,GGa1 最小。最高温度和最低温度分别增长 0.5~0.9 和 2.0~2.3,温度增长主要出现于冬季和春季,最低温度增幅大于最高温度,方差变化不大。较目前气候下的耕作条件,2010—2039 年 5 月和 8—10 月的径流和侵蚀显著增大;年径流量可能增长 52%~119%,年土壤侵蚀量可能增长 37%~170%。除了降水变化影响径流和侵蚀以外,作物生长状况也有很大的作用:A2a 情景径流和侵蚀量最大,其 8—10 月降水的平均变化最大而作物产量最低;GGa1 径流和侵蚀量最小,其 8—10 月降水的平均变化最小而作物产量最高。

评估中存在 3 个方面的不确定性:GCMs,解集方法和侵蚀模型,其中,GCMs 是不确定性的最大来源。尽管 GCMs 可以很好地模拟大尺度的气候特性,但具体到小空间尺度甚至站点,模拟结果往往有

差距。GCMs 一般能模拟出气象变量的月分布状况,但其模拟的数值与实测值有较大差距,如 HadCM3 预测长武县所在网格 1957—2001 年平均降水与长武实测值相差 100 mm 左右。因此,GCMs 的数据不能直接使用,需要按照当地条件进行校准,空间解集可以达到这种效果。解集方法和侵蚀模型是另外两个不确定性来源。本研究中的解集方法强调数据间概率分布的相似性,而不强调数据间一一对应的强相关性,可适用于具任何分布的数据组之间,再加上求得的转换函数的相关系数都在 0.98 以上,可以在最大程度上降低误差。WEPP 是一个基于物理机制的侵蚀模型,经过校准后适用于研究区域,在一定程度上降低了误差,但如果能用更长序列的实测数据校准模型,模型的精度将会更高。

近 50 a 来黄土高原气候趋向暖干,而 2010—2039 年长武的降水增加且温度升高,气候将呈暖湿状态。此种预期的变化与其它研究的结论一致,如秦大河等预估中国西部未来 50 a 降水一般呈增加趋势;丁一汇等预测未来 50 a 全国平均年降水量将增加,北方的降水日将显著增多;赵传燕等预估西北地

区未来 30 a 降水将普遍增多;同时,这些研究都认为未来的气温将继续升高<sup>[2, 23-24]</sup>。这种气候变化趋势将提供更多可用的水资源,有利于该区农业生产和生态建设;但从评估结果来看,气候变化将加剧黄土高原农田的水土流失。近年来,国家采取了大量耕地保护政策来保障粮食安全,长武县的耕地面积也呈增长趋势,而坡地和塬边农田在一定时段内也将长期存在,因此,采取措施如保护性耕作等来减缓其不利影响是非常必要的。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] IPCC. Climate change 2001: Impact, adaptation and vulnerability[R]. Contribution of Working Group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [3] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告 (II): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51-56.
- [4] IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis[R]. Contribution of Working Group I to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001.
- [5] Edwards W M, Owens, L B. Large storm effects on total soil erosion[J]. J. Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 75-78.
- [6] Zhang X C, Garbrecht J D. Precipitation retention and soil erosion under varying climate, land use, tillage, and cropping system[J]. J. Am. Water Resour. Assoc, 2002, 38: 1241-1253.
- [7] SWCS. Conservation implications of climate change: Soil erosion and runoff from cropland. A report from the Soil and Water Conservation Society[OL]. [2008-09-23]. [http://www.swcs.org/en/publications/conservation\\_implications\\_of\\_climate\\_change/](http://www.swcs.org/en/publications/conservation_implications_of_climate_change/).
- [8] 朱显谟. 重建土壤水库是黄土高原治本之道[J]. 中国科学院院刊, 2006, 21(4): 320-324.
- [9] 夏军, 谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 1-7.
- [10] 唐克丽, 张科利. 黄土高原人为加速侵蚀与全球变化[J]. 水土保持学报, 1992, 6(2): 88-96.
- [11] Hansen J W, Indeje M. Linking dynamic seasonal climate forecasts with crop simulation for maize yield prediction in semi-arid Kenya[J]. Agric. For. Meteorol., 2004, 125: 143-157.
- [12] Solman S, Nunez M. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach[J]. Int. J. Climatol, 1999, 19: 835-861.
- [13] Chen D C Y. Development and verification of a multiple regression downscaling model for monthly temperature in Sweden[C]// Chen D, Hellstrom C, Y C. Preliminary analysis and statistical downscaling of monthly temperature in Sweden, Report C16, 1999: 41-55.
- [14] Wilby R L, Hay L E, Leavesley G H. A comparison of downscaled and raw GCM output: Implications for climate change scenarios in the San Juan river basin, Colorado[J]. Journal of Hydrology, 1999, 225: 67-91.
- [15] von Storch H, Zorita E, Cubasch U. Downscaling of climate change estimate to regional scales: Application to winter rainfall on the Iberian Peninsula [J]. J. Clim., 1993, 6: 1161-1171.
- [16] Murphy J. An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate[J]. J. Clim., 1999, 12: 2256-2284.
- [17] Zhang X C, Nearing M A, Garbrecht J D, et al. Downscaling monthly forecasts to simulate impacts of climate change on soil erosion and wheat production[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1376-1385.
- [18] Yu B. Adjustment of CLIGEN parameters to generate precipitation change scenarios in southeastern Australia [J]. Catena, 2005, 61: 196-209.
- [19] Semenov M A, Barrow E M. Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios[J]. Clim Change, 1997, 35(4): 397-414.
- [20] Chen D. A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20: 1067-1076.
- [21] Wilson L L, Lettenmaier D P, Skillingstad E. A hierarchical stochastic model of large atmospheric circulation patterns and multiple station daily rainfall[J]. Journal of Geophysics Research, 1992, 97(3): 2791-2809.
- [22] Nebojsa Nakicenovic, Joseph Alcamo, Gerald Davis, et al. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]// Nakicenovic N, Swart R. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press, 2000.
- [23] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 等. 中国西部环境演变及其影响研究[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 321-328.
- [24] 赵传燕, 南忠仁, 程国栋, 等. 统计降尺度对西北地区未来气候变化预估[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2008, 44(5): 12-18.