

解集 GCMs 输出评估黄土塬区农田侵蚀的潜在变化

李志¹, 刘文兆², 张勋昌³, 郑粉莉²

(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, 73036, El Reno, Oklahoma, USA)

摘要:已经确认的极端降水事件增多等气候变化趋势,可能对黄土高原的土壤侵蚀造成重要影响。使用一种简单有效的转换函数法和天气发生器 CLIGEN (CLimate GENerator),解集 4 种 GCMs (General Circulation Models) 在 3 种排放情景下的时空尺度建立气候变化情景,结合 WEPP (Water Erosion Prediction Project) 模型评估 2010—2039 年气候变化对黄土高原沟壑区长武农田土壤侵蚀的潜在影响。结果表明,较 1957—2005 年,长武 2010—2039 年的年均降水量可能变化 $-2.6\% - 17.4\%$, 年均降水方差是当前的 $0.984 - 1.389$ 倍,降水量增多且暴雨次数增加的概率较大;最高和最低温度分别升高 $0.6 - 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.6 - 1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 方差分别是当前值的 $0.748 - 1.155$ 和 $0.736 - 1.387$ 倍,方差增大的概率较大。受气候变化影响,2010—2039 年径流普遍增长 $10\% - 130\%$, 土壤侵蚀变化 $-5\% - 195\%$, 侵蚀加剧的可能性极大;但保护性耕作可有效减少径流和侵蚀,是农田生态系统适应未来气候变化的有效措施。

关键词:气候变化;黄土高原;土壤侵蚀;GCMs;WEPP

Downscaling GCMs output to assess the potential changes of field erosion in the Loess Tableland

LI Zhi¹, LIU Wenzhao², ZHANG Xunchang³, ZHENG Fenli²

1 College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling Shaanxi 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling Shaanxi 712100, China

3 USDA-ARS, Grazinglands Research Lab., 7207 W. Cheyenne St., El Reno, OK 73036, USA

Abstract: The confirmed climate change trends, such as the increase of extreme rainfall events, may have great impacts on soil erosion through altering driving forces of soil erosion and influencing the growth condition of plants. The Loess Plateau of China is one of the most erodible areas in the world, the potential response of soil erosion to future climate change need to be assessed specifically for this information is very useful for decision-making. The objective of this study was to assess the site-specific impacts of climate change during 2010—2039 on soil erosion in Changwu County in the tableland-gully region of the Loess Plateau. A new simple transfer function method and weather generator CLIGEN (CLimate GENerator) were used to downscale the spatial-temporal scales of four General Circulation Models (CCSR/NIES, CGCM2, CSIRO-Mk2 and HadCM3) under three emission scenarios (A2, B2 and GgA). The WEPP (Water and Erosion Prediction Project) model was employed to simulate the responses of agro-ecosystems. Two tillage systems, i. e. conventional tillage and conservation tillage, were used to discuss the adaptive measures to climate change. Results showed that climate would change significantly during 2010—2039 compared with 1957—2005. The annual mean precipitation would change -2.6% to 17.4% , the variance of annual precipitation would be 0.984 to 1.389 times of the present, and it is very likely that the precipitation amount and storm frequency would increase. Annual mean maximum and minimum temperature would increase 0.6 to $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 0.6 to $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the variance ratios of 2001—2039 to 1957—2005 for maximum and minimum temperature were $0.748 - 1.155$ and $0.736 - 1.387$, respectively. The probability of variance increase was

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD09B09); 国家基础研究发展计划项目(2007CB407201)

收稿日期:2009-09-04; **修订日期:**2010-01-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lizhibox@126.com

great. The predicted climate changes would cause great changes in runoff and soil loss in slope field of the Loess Plateau. Under conventional tillage, WEPP predicted a change of 10% to 130% for runoff, -5% to 195% for soil loss during 2010—2039. However, WEPP predicted a change of -34.2% to 71% for runoff, -76.5% to -25.8% for soil loss during 2010—2039 under conservation tillage. The changed magnitudes of runoff and soil loss under conservation tillage were far less than those under conventional tillage. The results indicated that adoption of conservation tillage had great potential to reduce the adverse effects of climate changes on runoff and soil loss and thus protect agro-ecosystems. The new spatial downscaling method, emphasizing on matching the probability distributions, can be widely used in climate scenarios development based on GCMs as it relaxed the demands upon the existence of strong correlations between station-measured and GCM-projected monthly precipitation and temperature.

Key Words: climate change; the Loess Plateau; soil loss; GCMs; WEPP

政府间气候变化专门委员会(IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change)的第四次评估报告指出,近 100 a 来全球平均陆表温度升高了(0.74 ± 0.18) °C,降水在 30°N 以北呈增长趋势,温度和降水的极端事件大量增加^[1]。这些已经确定的气候变化趋势,将对土壤侵蚀带来重要的影响,直接改变土壤侵蚀的驱动力,如降水量和强度的变化将影响水蚀,而风速和方向的变化将影响风蚀;另外,气候变化和 CO₂ 浓度变化还通过改变植物生长状况间接影响土壤侵蚀^[2-4]。但这些预计的气候变化对特定地区的实际破坏是未知的,需要进行评估。

将全球环流模式(general circulation models, GCMs)与侵蚀模型结合,是进行影响评估的有效方法。但由于 GCMs 输出的是基于网格尺度的月数据,而评估模型需要输入基于站点尺度的日数据,这就导致气候变化影响评估受到了限制,为此,需要解集 GCMs 时空尺度匹配模型的输入要求^[5-8]。统计法通过建立 GCMs 与实测数据间的统计关系来预估未来的气候变化,该方法由于容易实现并可以按照当地条件校准而被广泛应用^[9]。统计方法分为 3 类:转换函数法,天气发生器和环流分型技术^[10-12]。但统计方法往往需要组合使用,如使用转换函数法进行 GCMs 的空间解集而基于天气发生器解集 GCMs 的时间尺度^[13]。另外,当前的侵蚀研究很少关注管理措施的变化,然而这是非常重要的,因为管理措施对侵蚀的影响可能要大于降水和温度变化^[14-15]。

黄土高原水土流失严重,全球变化所带来的气候异常,将直接影响水资源^[16]和土壤侵蚀发展趋势^[17]。全球变化下,黄土高原的水土资源将如何变化以及保护措施是否要改变以及如何改变? 这些问题直接关系到该区的农业生产和生态建设。拟开展的研究,基于长武农田生态系统国家野外站径流场的监测数据,使用一种新的转换函数法和天气发生器 CLIGNE (CLimate GENerator)解集 GCMs 时空尺度,并结合 WEPP (Water Erosion Prediction Project)模型评估 2010—2039 年气候变化对该区土壤侵蚀的潜在影响,以期能为生态建设和区域可持续发展提供决策依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长武实验站位于黄土高原陕西省长武县洪家乡王东沟村(E107.8°, N35.2°),海拔 946—1226 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均温 9.2 °C,无霜期 171d,全年 ≥ 0 °C 活动积温 3688 °C,年日照时数 2226.5 h,年太阳总辐射量 484 kJ·cm⁻²;年平均降水量 582.3 mm,其中 52.8% 分布在 7—9 月份,属典型的雨养农业,典型耕作系统是 3a 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,塬区黄土层厚度超过 100 m,塬面和沟壑各占 35% 和 65%。土壤属黑垆土,母质是中壤质马兰黄土,全剖面土质均匀疏松,通透性好,有利于植物生长。

1.2 选择气候模式与排放情景

气候变化具有不确定性,评估时应使用多种模式、多种情景来进行。本文选取 IPCC 第 3 次评估使用的 4

种 GCMs 的 3 种排放情景(表 1),数据来源于 IPCC 数据发布中心。4 种 GCMs 中,CCSR/NIES 为日本气候系统研究中心和日本国立环境研究所开发,CGCM2 来自加拿大气候模拟与分析中心,CSIRO-Mk2 为澳大利亚联邦科工组织开发,HadCM3 来自英国 Hadley 气候预测与研究中心。3 种情景中 A2 强调经济发展,温室气体排放量较大;B2 强调可持续发展,更注重环保,温室气体排放量相对增长缓慢;GGa 将 1860—1990 年温室气体的增长情况应用到 2099 年以前,常被作为基准气候。3 种情景的温室气体排放速度为 $A2 > GGa > B2$ 。选取此 3 种情景,旨在分析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,并进行影响评估。

表 1 气候模式及其模拟

Table 1 Description of the GCMs and their simulations

GCMs		CCSR/NIES	CGCM2	CSIRO-Mk2	HadCM3
网格尺寸 Grid size		$5.625^{\circ} \times 5.625^{\circ}$	$3.75^{\circ} \times 3.75^{\circ}$	$5.625^{\circ} \times 3.25^{\circ}$	$3.75^{\circ} \times 2.5^{\circ}$
模拟时段 Data duration	A2, B2	1890—2100	1900—2100	1961—2100	1950—2099
	GGa	1900—2099	1900—2099	1900—2100	1900—2099

* GCMs-全球环流模式, CCSR/NIES-日本模式, CGCM2-加拿大模式, CSIRO-Mk2-澳大利亚模式, HadCM3-英国模式。

1.3 解集 GCMs 空间尺度

为了尽量减小空间解集的误差,组合使用 2 种方法进行空间尺度转换,首先使用反距离权重插值法得到所在站点的 GCMs 数据;然后使用一种新的转换函数法将 GCMs 数据按照当地条件校准。下面着重介绍使用的转换函数法。常规统计方法强调实测数据与 GCMs 输出之间一一对应的强相关性,常由于相关性差导致不能进行;而本方法基于 QQ 图法,强调 GCMs 数据与实测数据两组数据之间概率分布的相似性,简单易行,经证实可以用于具体区域的气候变化影响评估^[4,13];但由于是一种统计方法,仍需假定目前气候条件下建立的转换函数适合于未来的气候。以降水量为例,具体操作如下:

①求取转换函数 使用 GCMs 输出的和长武实测的 1957—2005 年的月降水量数据。对于每个月,将实测的(y 值)和 GCMs 输出的(x 值)月降水量作 QQ 图,即分别进行排序后对每个月的两组数据求取单变量线性和非线性函数各 1 个,来获得每个月的转换函数。

②对未来气候进行空间解集 使用第 1 步得到的转换函数,将 GCMs 输出的 2010—2039 年的月降水量作为 x 值求取 y 值,即得到长武在 2010—2039 年间的月降水量数据。注意 2 个转换函数的使用:GCMs 输出的 2010—2039 年的数据如果介于 1957—2005 年的数值范围,使用非线性函数来求取 y 值;如果 GCMs 输出的 2010—2039 年的数据超出了 1957—2005 年的数值范围,则使用线性函数来转化。使用线性函数是为了使数据更加接近,不至于出现飞点。

③计算均值和方差 使用转换函数求取的 y 值就代表长武 2010—2039 年的月降水量,计算 2010—2039 年逐月降水量的均值和方差,这些参数可以应用到时间解集中来产生该区 2010—2039 年的日天气序列数据。用类似方法,可以将 GCMs 预测的月最高、最低温度进行空间尺度转换并计算均值差和方差比率用于时间解集。

1.4 解集 GCMs 时间尺度

时间解集主要通过天气发生器 CLIGEN 来实现。

第 1 步,求取基线参数。使用长武 1957—2005 年实测的逐日天气数据产生 CLIGEN 的基本输入文件,包括气象变量逐月的均值和方差等统计参数。

第 2 步,调整降水基线参数。使用空间解集得到的均值差和标准偏差比率来调整降水的基线参数,包括降水日的降水量均值、方差、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)。首先调整降水转移概率:对于每个月,将 45a 的各月份按照降水量大小分成 2 类(干旱和湿润),分别求取 2 类降水的均值和转移概率,这样每个月就有 2 组均值和转移概率,分别是降水量较少和较多情况下的值;利用这 2 组数据建立

线性关系,然后用该线性关系和空间解集获得的月降水量均值来计算未来降水的转移概率。对于降水日的平均降水量,使用空间解集得到的月均降水量(R_m)与调整得到的降水转移概率进行调整。方便起见,将调整的降水转移概率表示为非条件概率 π 和依赖性参数 r , r 被定义为日降水概率时滞为 1 的自相关系数:

$$\pi = \frac{P_{w/d}}{1 + P_{w/d} - P_{w/w}}, r = P_{w/w} - P_{w/d}$$

使用这 2 个参数,可以求取 2010—2039 年逐月降水日的平均降水量(R_d),公式如下:

$$R_d = \frac{R_m}{N_d \pi},$$

式中, N_d 为每月的天数, $N_d \pi$ 为每月的平均降水日数。

对方差的调整,张勋昌曾使用比例法^[18],将空间解集得到的方差比率与基线参数的方差相乘。由于空间解集可以直接得到 2010—2039 年的月降水方差(σ_m^2),因此,本文使用 Wilks 的方法^[19]来计算 2010—2039 年逐月的日降水方差(σ_d^2):

$$\sigma_d^2 = \frac{\sigma_m^2}{N_d \pi} - \frac{(1 - \pi)(1 + r)}{(1 - r)} R_d^2$$

第 3 步,调整温度的基线参数。均值的调整,将空间解集得到的均值差加到基线参数的相应变量上;对于方差,基于计算的方差比率放大基线参数,即获得 2010—2039 年的温度方差。

第 4 部,检验时间解集效果。通过上述调整,即获得未来气候情景的 CLIGEN 输入文件,运行 CLIGEN 产生若干年的气候文件;对该气候文件进行统计,比较降水和温度均值与第 2 步和第 3 步中相应值的差距;然后根据这些差距对 CLIEGN 的输入文件再次进行调整,直到 CLIGEN 输出的降水和温度与上面得到的结果吻合。这些差距来自两个方面:模型误差和人为操作过程中对数据的进位取舍。

1.5 CLIGEN 与 WEPP 模型校准

根据 CLIGEN 适用性评估结果^[20-21],通过比例法对其产生的数据进行调整。降水量 > 1 mm 的降水历时,产生值平均为实测值的 1/3,因此,将 CLIGEN 产生值乘以 3;降水量 > 1 mm 的 I_p (最大降水强度与平均降水强度比率),产生值是实测值的 3.14 倍,因此,将 I_p 的产生值除以 3.14;产生的风速是实测值的 2.18 倍,将产生的风速除以 2.18。通过调整,可以较好地提高 CLIGEN 产生数据的精度。

对 WEPP 加入一个 CO_2 模块以评估 CO_2 浓度变化对作物生长和蒸散的影响。长武 1988—1992 年实测的土壤性质、气候、作物管理以及径流和侵蚀数据被用来校准 WEPP 的侵蚀参数。WEPP 参数中,临界剪切压力、细沟和沟间侵蚀等均按照当地条件校准,而作物生长参数均来自于 WEPP 的技术手册。选择 2 个径流场,规格均为 $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$:一个径流场的坡度为 5° ,连续休闲;另一个径流场的坡度为 10° ,连续种植大豆。土壤侵蚀被校准到实测的年均水平, 5° 径流场实测和校准的年均土壤侵蚀量分别为 9400 t km^{-2} 和 9200 t km^{-2} ; 10° 径流场实测和校准的年均土壤侵蚀量分别为 7200 t km^{-2} 和 7400 t km^{-2} 。之后,基于校准的侵蚀参数,模拟当地的传统耕作方式,校准的生长参数,WEPP 模拟的 5° 坡地的小麦和玉米产量分别为 3150 t km^{-2} 和 6840 t km^{-2} ,而当地 1986—1999 年小麦和玉米的年均产量分别为 3160 t km^{-2} 和 6440 t km^{-2} 。

WEPP 模拟时,采用保护性耕作与传统耕作两种管理措施,区别在于秸秆移除和耕作时间的变化,传统耕作在收获后 1 周内将 90% 的秸秆移除并进行耕作;而保护性耕作在收获后一直进行秸秆覆盖,直到播种前 1 周才移除秸秆并进行耕作。通过模拟两种耕作系统并进行比较,探讨保护性耕作作为适应性措施的可行性。

1.6 变化趋势判断

本研究使用多个 GCMs 和排放情景,由于气候模式和排放情景的不确定性,水文气象变量的最终模拟结果很可能变化复杂,难以判断其趋势。因此,使用单尾 T 检验判断气象水文变量均值的变化趋势,将实测值的均值作为检验时的假定平均值,使用 $(1 - p)$ (p 显著水平)衡量气候变化趋势的概率;使用双尾 F 检验判断水文气象变量方差的变化趋势,将目前实测值的方差作为检验时的假定方差,同样使用 $(1 - p)$ 衡量其概率。

2 结果与讨论

2.1 预测的气候变化

表 2 为 4 种 GCMs 在 3 种不同情景下预测的 2010—2039 年长武气候的年均变化。较 1957—2005 年, 2010—2039 年的年均降水量可能变化 -2.6% — 17.4% , 介于 565.9—682.2 mm 之间; 12 种情景(4 种气候模式 $\times$ 3 种排放情景)中有 8 种情景预测降水增长 2.9% — 17.4% , T 检验表明降水增长的概率为 98.6%。预测的年均降水方差是当前的 0.984—1.389 倍, 除了 CGCM2 的 B2 情景略有降低以外, 其他模式和情景预测的降水方差均变大, F 检验表明方差增大的概率为 99.98%, 说明降水量变化剧烈, 暴雨次数增加的可能性变大, 从而会导致更严重的径流和侵蚀^[15]。2010—2039 年的温度呈升高趋势, 最高温度和最低温度分别升高 0.6 — $2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 0.6 — $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。各模式和情景预测的温度方差变异很大, 最高温度和最低温度的方差分别是当前值的 0.748—1.155 倍和 0.736—1.387 倍, 增大的概率均为 100%。

表 2 4 种 GCMs 预测的年均气候变化

Table 2 Averaged annual climate perturbations at three scenarios of four kinds of GCMs

GCMs	情景 Scenarios	降水 Precipitation			最高温度 Maximum temperature		最低温度 Minimum temperature	
		年均降水量/mm	变化/%	方差比率	变化/ $^{\circ}\text{C}$	方差比率	变化/ $^{\circ}\text{C}$	方差比率
		Annual amount	Change	Variance ratio	Change	Variance ratio	Change	Variance ratio
CCSR	A2	571.8	-1.6	1.022	2.1	0.884	1.5	0.797
	B2	570.0	-1.9	1.023	2.3	1.137	1.7	1.146
	GGa	632.1	8.8	1.230	2.1	1.066	1.6	0.768
CGCM2	A2	565.9	-2.6	1.223	1.7	0.781	1.1	0.798
	B2	568.4	-2.2	0.984	1.9	0.748	1.1	0.831
	GGa	605.1	4.1	1.181	2.6	1.017	1.6	1.042
CSIRO	A2	612.9	5.5	1.224	1.1	1.128	0.6	1.027
	B2	615.9	6.0	1.158	1.6	0.915	1.1	0.908
	GGa	682.2	17.4	1.389	2.6	1.061	1.7	0.736
HadCM3	A2	621.0	6.9	1.345	0.9	1.155	1.1	1.387
	B2	638.5	9.9	1.189	0.6	1.140	1.1	1.254
	GGa	597.9	2.9	1.200	1.6	1.110	1.2	1.345
增长概率/% Increase probability		98.6	-	99.98	99.99	100	100	100

* GCMs: 全球环流模式, CCSR/NIES: 日本模式, CGCM2: 加拿大模式, CSIRO-Mk2: 澳大利亚模式, HadCM3: 英国模式

2.2 传统耕作下径流和侵蚀对气候变化的响应

表 3 为预测的 2010—2039 年的年均降水量、径流深度、土壤侵蚀量以及小麦和玉米产量。较 1957—2005 年的传统耕作, 2010—2039 年两个坡地的径流普遍增长, 增幅介于 10% — 130% 。土壤侵蚀变化 -5% — 195% , 24 种情景(4 种气候模式 $\times$ 3 种排放情景 $\times$ 2 个坡地)中有 21 种情景的结果表明侵蚀增加 1.6% — 194.5% , T 检验表明两个坡地侵蚀增长的概率均为 99.98%。

径流、侵蚀变化与年降水变化之间没有很好的相关性, 如 CCSR 和 CGCM2 的 A2 和 B2 情景预测降水减少, 而模拟的径流和侵蚀增长了, 这可能是由降水方差变化与作物生长状况的综合作用导致的。方差变化会改变降水的剧烈程度, 暴雨次数受到影响从而导致径流变化, 表 2 中各情景预测的年降水方差普遍变大, 表明 2010—2039 年暴雨次数可能增加, 从而导致径流和侵蚀普遍增长(仅有 3 个情景的结果表明侵蚀减少)。同时, 作物生长状况也会对径流和侵蚀产生重要影响, 例如, 尽管 CCSR 和 CGCM2 的 A2 和 B2 情景预测降水减少, 但其作物生长状况较差, 小麦减产, 玉米增产幅度相对较小, 导致这 4 个情景的径流和侵蚀量不但没有减少反而都有较大增幅; 而 HadCM3 的 GGa 情景降水增长不大(2.4%), 但由于其作物生长状况较差, 双重作用也导致其径流和侵蚀的增长相对较大。

2.3 保护性耕作下径流和侵蚀对气候变化的响应

表 4 为预测的 2010—2039 年保护性耕作下的年均降水、径流、侵蚀以及小麦和玉米产量变化。作物残留

表 3 传统耕作下 2010—2039 年降水、径流、土壤侵蚀、小麦和玉米产量的年均值及其百分比变化

坡度 Slope		情景(CO ₂ 体积分数) Scenarios (CO ₂ Concentration)													增长概率/% Increase probability
		基线 Baseline (350 × 10 ⁻⁶)			A2 (592.2 × 10 ⁻⁶)			B2 (416.2 × 10 ⁻⁶)			GGa (444.5 × 10 ⁻⁶)				
		CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3	CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3	CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3		
径流 Runoff	深度 Depth/mm	34	54	49	41	74	48	56	44	42	39	79	51	58	99.98
	变化 Change/%	0	58	43	20	115	40	63	29	24	13	130	49	70	—
	深度 Depth/mm	40	61	57	47	81	55	63	50	49	44	88	57	65	99.98
	变化 Change/%	0	54	42	19	104	37	58	26	23	10	121	43	64	—
土壤侵蚀 Soil loss	侵蚀 Rate/(t hm ⁻²)	3	5	5	3	7	5	6	4	4	3	9	4	6	99.8
	变化 Change/%	0	67	56	0	126	53	82	14	17	2	195	31	100	—
	侵蚀 Rate/(t hm ⁻²)	8	14	13	8	17	12	14	9	10	8	22	11	15	99.8
	变化 Change/%	0	68	52	-5	106	47	74	10	18	-1	165	28	88	—
小麦产量 Wheat yield	产量 Yield/(t hm ⁻²)	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	52
	变化 Change/%	0	-1	0	24	3	-14	-13	7	-3	6	-11	22	-17	—
	产量 Yield/(t hm ⁻²)	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	2	51
	变化 Change/%	0	-2	0	25	3	-14	-13	8	-3	6	-12	22	-17	—
玉米产量 Maize yield	产量 Yield/(t hm ⁻²)	7.1	9.2	8.7	9.6	8.8	7.0	7.5	7.8	8.4	8.9	7.5	9.8	7.7	99.97
	变化 Change/%	0	29	22	35	24	-2	5	9	18	25	5	38	8	—
	产量 Yield/(t hm ⁻²)	7.0	9.0	8.5	9.4	8.6	6.9	7.3	7.6	8.3	8.8	7.2	9.7	7.5	99.96
	变化 Change/%	0	28	21	34	23	-2	4	8	18	25	3	39	7	—

表 4 保护性耕作下 2010—2039 年降水、径流、土壤侵蚀和作物产量的年均值及其百分比变化
Table 4 Mean annual precipitation, runoff, soil loss, grain yield as well as their percent changes under conservation tillage during 2010—2039

坡度 Slope		情景(CO ₂ 体积分数) Scenarios(CO ₂ Concentration)														
		基线 Baseline (350 × 10 ⁻⁶)		A2 (592.2 × 10 ⁻⁶)			B2 (416.2 × 10 ⁻⁶)			GGa (444.5 × 10 ⁻⁶)						
				CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3	CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3	CCSR	CGCM2	CSIRO	HadCM3	
径流 Runoff	5°	深度 Depth/mm	34	36	33	29	51	32	39	29	26	23	58	32	39	
		变化 Change/%	0	5	-4	-15	49	-8	15	-14	-23	-34	71	-6	13	
	10°	深度 Depth/mm	40	41	38	34	57	36	45	33	30	26	65	36	43	
		变化 Change/%	0	4	-5	-15	43	-9	12	-16	-24	-34	63	-9	9	
土壤侵蚀 Soil loss	5°	侵蚀 Rate/(t hm ⁻²)	3	1	2	1	2	1	2	1	1	1	2	1	2	
		变化 Change/%	0	-62	-51	-63	-40	-57	-43	-63	-77	-71	-26	-62	-53	
	10°	侵蚀 Rate/(t hm ⁻²)	8	3	4	3	5	4	5	3	2	3	6	3	4	
		变化 Change/%	0	-61	-50	-61	-35	-53	-44	-61	-72	-68	-31	-59	-51	
小麦产量 Wheat yield	5°	产量 Yield/(t hm ⁻²)	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	
		变化 Change/%	0	-1	-1	20	8	-3	0	12	10	7	-11	21	-1	
	10°	产量 Yield/(t hm ⁻²)	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	3	4	3	
		变化 Change/%	0	-1	0	20	8	-2	1	14	12	8	-11	22	0	
玉米产量 Maize yield	5°	产量 Yield/(t hm ⁻²)	7.11	8.7	8.0	8.5	8.4	6.6	7.2	7.1	8.0	8.3	7.4	9.4	7.4	
		变化 Change/%	0	23	12	20	19	-7	1	1	0	12	16	5	33	4
	10°	产量 Yield/(t hm ⁻²)	7.01	8.5	7.8	8.3	8.3	6.5	7.0	7.0	7.9	8.2	7.3	9.3	7.3	7.3
		变化 Change/%	0	22	12	19	18	-7	0	-1	13	17	4	33	4	4

CGCMs: 全球环流模式, CCSR/NIES; 日本模式, CGCM2; 加拿大模式, CSIRO-Mk2; 澳大利亚模式, HadCM3; 英国模式

物覆盖可以有效地减少径流和侵蚀,较 1957—2005 年传统耕作,2010—2039 年保护性耕作下径流变化 $-34.2\%—71.0\%$,12 种情景(4 种气候模式 $\times$ 3 种情景)中有 7 种情景径流减少,变化 $-4.1\%—-34.2\%$;有 5 种气候情景预测径流增加 $3.5\%—71.0\%$ 。虽然 5 种情景的径流仍呈增长趋势,但与 2010—2039 年传统耕作下同种情景的径流相比,保护性耕作使径流量减少 $25.8\%—33.6\%$ 。由于径流减少和作物残留物覆盖,2010—2039 年的保护性耕作下,土壤侵蚀大量减少,较目前的传统耕作变化 $-76.5\%—-25.8\%$ 。保护性耕作下的作物产量与传统耕作具有相似的变化趋势,只不过变幅稍有差距,小麦产量略高于传统耕作而玉米产量略低于传统耕作。

3 结论

较 1957—2005 年,长武 2010—2039 年的年均降水量可能变化 $-2.6\%—17.4\%$,12 种情景中有 8 种情景预测降水增长 $2.9\%—17.4\%$;预测的年均降水方差是当前的 $0.984—1.389$ 倍, T 检验和 F 检验表明降水量增多,且暴雨次数增加的可能性变大。2010—2039 年最高和最低温度分别升高 $0.6—2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.6—1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;方差分别是当前值的 $0.748—1.155$ 和 $0.736—1.387$ 倍,但 F 检验表明方差均增大。气候变化影响下,长武农田径流和侵蚀较当前传统耕作发生显著变化,2010—2039 年径流普遍增长 $10\%—130\%$;土壤侵蚀变化 $-5\%—195\%$, T 检验表明侵蚀加剧的可能性极大。但是保护性耕作可以缓解这种情况,较当前传统耕作,2010—2039 年农田在保护性耕作下,径流变化 $-34.2\%—71.0\%$,土壤侵蚀大量减少(变幅 $-76.5\%—-25.8\%$)。上述结果表明,长武未来 30a 的气候变化将对农田的水文和作物生长造成很大的影响,径流和侵蚀普遍增长;但通过调整耕作系统可以有效地减少径流和侵蚀,因此,保护性耕作是气候变化下农田系统有效的适应性对策。

近 50 a 来黄土高原气候趋向暖干,而 2010—2039 年长武气候将呈暖湿状态。此结论与部分研究的结果一致,如秦大河等预估中国西部未来 50 a 降水一般呈增加趋势^[22];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^[23];赵传燕等预估西北地区未来 30 a 降水将普遍增多^[24];同时,这些研究都表明未来的气温将继续升高。此气候变化趋势将提供更多可用的水资源,是该区发展农业生产和生态建设的一个机遇;但本研究表明,此种变化将同时加剧黄土高原农田的水土流失,与 IPCC 在全球范围内的评估结果^[25]以及张光辉对黄河流域降雨侵蚀力的预测^[26]一致,这也为该区的农业生产带来了严峻的挑战。因此,如何减缓和适应气候变化的不利影响,是非常值得探讨的一个问题。

同时需要注意的是,本研究存在一定程度的不确定性。最大的不确定性来自于 GCMs 本身,由于模型机理等不同,GCMs 的适用性不同^[27],但本文使用的解集方法按照实测气象数据对其进行了校准,且使用多种 GCMs 和情景来包含尽可能多的变化范围,已尽可能消除此项不确定性。其次为解集方法,解集方法对气候变化影响评估的结果有影响,如传统的比例法容易高估土壤侵蚀^[28],直接使用 GCMs 网格数据和经过不同方法解集后的 GCMs 数据进行影响评估的结果也有差异^[8, 29],因此,条件允许的情况下也应使用多种解集方法来建立气候情景。第三项不确定性来自于 WEPP 模型,虽然模拟的实测结果较好,但如果有更长序列的数据来校准模型,其模拟效果可能更好。因此,在今后的气候变化影响评估中,如何减少这些不确定性也是需要重点解决的问题。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, Cerdan O, Couturier A, Hernandez M, Le Bissonnais Y, Nichols M H, Nunes J P, Renschler C S, Souchère V, van Oost K. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. CATENA, 2005, 61(2/3): 131-154.
- [3] Scholz G, Quinton J N, Strauss P. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. CATENA, 2008, 72(1): 91-105.
- [4] Zhang X C, Liu W Z, Li Z, Zheng F L. Simulating site-specific impacts of climate change on soil erosion and surface hydrology in southern Loess

- Plateau of China. CATENA, 2009, 79(3): 237-242.
- [5] Wu J D, Wang F T. Study on the Creation of Climate Change Scenarios for Impact Analysis: A review. Meteorological Monthly, 1998, 24(2): 3-8.
- [6] Ghosh S, Mujumdar P P. Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. Advances in Water Resources, 2008, 31(1): 132-146.
- [7] Timbal B, Fernandez E, Li Z. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. Environmental Modeling & Software, 2009, 24(3): 341-358.
- [8] 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. Journal of Hydrology, 1999, 225(1/2): 67-91.
- [9] Solman S, Nunez M. Local estimates of global climate change: a statistical downscaling approach. International Journal of Climatology, 1999, 19: 835-861.
- [10] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [11] Lin E D, Xu Y L, Jiang J H, Li Y E, Yang X, Zhang J Y, Li C X, Wu S H, Zhao Z Q, Wu J G, Ju H, Yan C R, Wang S R, Liu Y F, Du B L, Zhao C Y, Qin B F, Liu C Z, Huang C Y, Zhang X Q, Ma S M. National assessment report of climate change (II): Climate change impacts and adaptation. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(2): 51-56.
- [12] Fan L J, Fu Z B, Chen D L. Review on creating future climate change scenarios by statistical downscaling techniques. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 320-329.
- [13] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Zheng S Q. Downscaling GCM output to simulate potential change of soil water balance on Loess Tableland. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3769-3777.
- [14] Schulze R. Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2000, 82: 185-212.
- [15] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3/4): 127-142.
- [16] Yu F, Zhang G H, Liu Y M. Analysis on effects of global climate change on water resource in the Yellow River Basin. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 52-56.
- [17] Tang K L, Zhang K L. Manmade accelerated erosion on the Loess Plateau and global change. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(2): 88-96.
- [18] Zhang X C, Nearing M A, Garbrecht J D, Steiner J L. Downscaling monthly forecasts to simulate impacts of climate change on soil erosion and wheat production. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): 1376-1385.
- [19] Wilks D S. Multisite downscaling of daily precipitation with a stochastic weather generator. Climate Research, 1999, 11: 125-136.
- [20] Li Z, Liu W Z, Zhang X C. Assessing the Applicability of CLIGEN non-Precipitation Parameters on Loess Tableland. Journal of Natural Resources, 2009, 24(2): 303-311.
- [21] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, Li S J, Chen J. Evaluation of CLIGEN precipitation elements on loess tableland. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(6): 31-36.
- [22] Qin D H, Ding Y H, Wang S W, Wang S M, Dong G R, Lin E D, Liu C Z, She Z X, Sun H N, Wang S R, Wu G H. A study of environment change and its impacts in western China. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 321-328.
- [23] Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, Gong P, Zheng X H, Zhai P M, Zhang D E, Zhao Z C, Wang S W, Wang H J, Luo Y, Chen D L, Gao X J, Dai X S. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8.
- [24] Zhao C Y, Nan Z R, Cheng G D, Zou S B, Zhang Y Z. Prediction of the trend of the future climate change in Northwestern China by statistical downscaling. Journal of Lanzhou University, 2008, 44(5): 12-18.
- [25] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Zhang G H. Response of rainfall erosivity to climate change in Yellow River basin. Journal of Mountain Science, 2005, 23(4): 420-424.
- [27] Cao Y, Zhang G H. Applicability evaluation of Global Circulation Models in the Yellow River basin. Journal of China Hydrology, 2009, 29(5): 1-5, 22.
- [28] Zhang X C. A comparison of explicit and implicit spatial downscaling of GCM output for soil erosion and crop production assessments. Climatic Change, 2007, 84(3/4): 337-363.

- [29] Quintana Segu P, Ribes A, Martin E, Habets F, Bo J. Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.050.

参考文献:

- [5] 吴金栋, 王馥棠. 气候变化情景生成技术研究综述. *气象*, 1998, 24(2): 3-8.
- [11] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 李玉娥, 杨修, 张建云, 李从先, 吴绍洪, 赵宗群, 吴建国, 居辉, 严昌荣, 王守荣, 刘允芬, 杜碧兰, 赵成义, 秦保芳, 刘春蓁, 黄朝迎, 张小全, 马世铭. 气候变化国家评估报告(II): 气候变化的影响与适应. *气候变化研究进展*, 2006, 2(2): 51-56.
- [12] 范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 统计降尺度法对未来区域气候变化情景预估的研究进展. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 320-329.
- [13] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 郑世清. 解集 GCM 输出模拟黄土塬区土壤水分平衡的潜在变化. *生态学报*, 2007, 27(9): 3769-3777.
- [16] 於凡, 张光辉, 柳玉梅. 全球气候变化对黄河流域水资源影响分析. *水文*, 2008, 28(5): 52-56.
- [17] 唐克丽, 张科利. 黄土高原人为加速侵蚀与全球变化. *水土保持学报*, 1992, 6(2): 88-96.
- [20] 李志, 刘文兆, 张勋昌. CLIGEN 非降水参数在黄土塬区的适应性评估. *自然资源学报*, 2009, 24(2): 303-311.
- [21] 李志, 刘文兆, 张勋昌, 李双江, 陈杰. CLIGEN 降水要素在黄土塬区的适应性评估. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6): 31-36.
- [22] 秦大河, 丁一汇, 王绍武, 王苏民, 董光荣, 林而达, 刘春蓁, 余之祥, 孙惠南, 王守荣, 伍光和. 中国西部环境演变及其影响研究. *地学前缘*, 2002, 9(2): 321-328.
- [23] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 官鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈德亮, 高学杰, 戴晓苏. 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. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3-8.
- [24] 赵传燕, 南忠仁, 程国栋, 邹松兵, 张永忠. 统计降尺度对西北地区未来气候变化预估. *兰州大学学报*, 2008, 44(5): 12-18.
- [26] 张光辉. 黄河流域降雨侵蚀力对全球变化的响应. *山地学报*, 2005, 23(4): 420-424.
- [27] 曹颖, 张光辉. 大气环流模式在黄河流域的适用性评价. *水文*, 2009, 29(5): 1-5, 22.