

黄土高原气候环境演变研究

王毅荣^{1,2} 张强¹ 江少波²

(1 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020; 2 甘肃省定西市气象局, 定西 743000)

摘要: 该领域相关研究主要基于生物地质记录、历史文献和器测资料, 研究了黄土高原气候在万年、千年和百年尺度上的演变特征, 探讨了当时自然植被状况与气候变化的联系; 分析了当代黄土高原气候变化及其区域响应的主要特点。从较为宏观的角度, 为研究黄土高原环境效应提供相关的历史背景。

关键词: 黄土高原, 气候环境, 演变, 进展

引言

黄土高原是中华文明的主要发源地, 总面积约64万km², 现承载人口1亿以上。位于黄河中上游和海河上游地区, 东起太行山, 西至日月山, 南界秦岭, 北抵鄂尔多斯高原; 可分为陇中盆地, 陇东、陕北高原, 渭河地堑平原, 山西高原; 除了一些裸岩的高山以外, 基本上覆盖了60~200m厚的细腻黄土微粒, 土质疏松, 流水侵蚀强烈, 地形破碎; 是内陆干旱向季风气候的过渡带和气候变化敏感区、生态环境脆弱带。

黄土高原的气候生物环境是气候环境因素的共同作用, 研究其演变的历史和进程对黄土高原生态环境建设和发展等具有重要价值。

1 历史气候环境演变

黄土高原风尘堆积约从22Ma BP开始, 冬季风环流就从内陆干旱区携带大量的风尘在黄河中游堆积形成黄土, 而夏季风环流从低纬海洋携带大量的水汽, 到新近纪晚期和第四纪, 北极冰盖的形成与发展使冬季风环流的强度和内陆干旱度加剧^[1]; 对最近5个间冰期黄土高原环境空间格局的研究显示, 东亚季风对黄土区降水的影响占主导地位, 而南亚季风的影响处于相对次要的地位, 第四纪最后一个间冰期的全新世期间, 黄土高原的降水较大程度地受东亚夏季风环流的控制^[2, 3]。在万年尺度上, 强盛的夏季风环流带来的水汽偏多, 东亚和南亚季风在万年尺度上的变化具有相对一致性, 季风降水从11.5ka BP之后均开始增强, 在约10~9ka BP前后达到最大值, 从约6ka BP开始逐渐下降^[4, 5]。黄土高原全新世前期总体湿润、后期呈总体变干趋势。

黄土高原全新世季风降水最多时期大致在10~9ka BP前后, 全新世中期有千年尺度的夏季风相对减弱, 但与其他时期相比仍然偏强^[6, 7]。约8ka BP以后为高温期或大暖期, 当时的季风降水可能并不是最多的, 但

年内平均温度可能是最高的^[8, 9]。在全新世总体湿润的背景下至少存在三个明显的干旱期, 分别发生在大约8.5ka BP, 7~5.6ka BP和4ka BP前后。这些干旱事件是全新世总体湿润背景下的相对干旱, 4ka BP的干旱事件可能也伴随着降温^[10, 11], 各地表现也有差异。

近千年来中世纪暖期之后出现的寒冷时期, 15世纪后期至19世纪末的气候寒冷期是中国的小冰期^[12, 13]。1400—1900AD期间, 黄土高原为冷期, 温度较20世纪可能低1.5℃左右, 且小冰期内也有显著的冷暖波动, 到1900AD后温度快速上升, 区域降水较少; 1900AD之后, 降水量迅速增加^[14, 15]。

黄土高原全新世期间以草原植被为主, 期间未出现典型森林植被, 经历了“干草原—湿润草原—干草原”的演变过程; 高原南部较湿润的地区全新世以草原和疏林草原植被为主, 落叶阔叶林可能只在气候最宜期短暂出现^[16, 17]。周朝以前黄土高原森林植被、草原植被繁盛, 黄土高原广大地区植被保持着天然状态, 保持着较好的自然生态环境; 周朝后期草场退化、植被带南移; 战国时期农耕快速发展, 黄土高原南部如关中平原、汾河中下游平原被大量开垦成耕地, 平原地区的森林、草原植被逐步为耕地所取代, 两晋、南北朝时黄土高原天然植被仍占较大比重, 隋唐时期农耕地继秦汉以后达到新的高峰并不断向黄土高原中北部、西部推进, 原有的林地、草地变为农田; 随着隋唐暖湿期的结束, 唐末黄土高原气候趋于干化, 黄土高原植被已发生很大变化, 北部毛乌素沙地南侵, 植被带界线南移, 植被覆盖度大大降低; 北宋时黄土高原植被状况进一步恶化, 明清时期、金元时期黄土高原被进一步开垦坡地, 黄土高原自然环境进一步恶化^[18, 19]。

2 当代气候环境区域响应

2.1 热量响应

全球气候变化产生不同的区域响应^[20]。黄土高原气温区域响应的一致性程度很高, 67a间(1937—2003年)各月气温以升高为主, 2月增幅最大, 3月存在降

收稿日期: 2011年4月27日; 修回日期: 2011年5月25日

第一作者: 王毅荣(1967—), Email: werice@163.com

资助信息: 国家自然科学基金: 半干旱区凝结水形成规律及其对地气水热交换的影响(41075009)

温趋势。20世纪30、40年代是最暖的阶段，从40年代起气温一直在下降，50年代由暖转冷的突变十分明显，到70年代末80年代初下降到最低，80年代为最冷的时期，80年代后才转为上升^[21]。春季气温以升温为主，1990年代最为明显，升温速度最大区和年际变化幅度最大区主要在黄土高原中部；春寒强度由西北向东南递减，高原腹地易出现强春寒，春寒空间演变中大振幅区在高原腹地；凌汛黄河兰州—银川段气温差减小，稳定低于0℃开始日期推迟、结束日期提前^[22]。

正负积温（1951—2004年）变化的区域一致性程度较高，积温大振幅区集中在黄土高原腹地，负积温分维数大于正积温，负积温变化全程较正积温复杂；积温及其持续日期存在突变式增加，中东部较快、西部较慢，在敏感区域增加最突出；积温及持续日数的增加主要体现在积温结束日期明显推迟；负积温在1982年左右发生突变、年累计量明显减少，正积温在1986年突变增加^[23]。

2.2 水分响应

黄土高原水分主要来自天然降水，年降水从西部到东部空间差别大。黄土高原地区年、季降水量的空间分布，自西北向东南逐渐增多；降水的季节分配鲜明，高原雨量主要集中在4—9月，雨热同季，降水量季节性差异北部较南部明显。

近50a，黄土高原雨量带显现出年代际演变特征，等雨量线总体上南移，20世纪70年代较60年代南移约0.6个纬度，南移幅度东部明显大于西部；80年代在70年代水平上略有北移；90年代南移突出、移幅较大，较60年代南移约1.8个纬度，高原东部地区最为突出，除关中平原外高原基本蜕变为半干旱气候区。降水响应敏感区在黄土高原腹地，降水区域响应以一致的涝或旱为主，高原东北部是干旱降水响应最敏感区，是干旱最突出的地方；高原北部是湿年降水响应最敏感区，是降水偏多最突出的地方（易涝）；旱年降水响应中局地性强，干湿年降水存在明显差异，干湿年降水相差大，湿年比干年多40%以上。干旱在高原的东北部响应变幅大于其他地方，湿涝响应在高原的北部最为明显；干年相对变率明显大于湿年。涝年降雨量自西向东递增，旱年由北向南递增；年降水频次时间分布的分维数涝年大于旱年，大地形在涝年对降水的再分配能力远大于旱年；旱涝年降水频次大雨以上降水差异更为明显^[24]。年降水在1985年附近发生气候突变，降水明显减少；其中3、6月降水增加（6月增幅最大），1977年后降水明显增多；4、8—11月递减趋势显著（其中9月减幅最大），在1985年发生突变式减少；整体减少幅度远大于增加

量。作物生长期（4—10月）降水在1985年左右发生突变，由历史上的多雨转为少雨，3~5年的降水振荡周期更明显^[25]。

黄土高原地区大雨频次是自西北向东南逐渐增多，大雨频次存在减少趋势，区域性暴雨事件趋于减少，过程雨量加大，区域性暴雨事件在1977年附近出现突变性减少，相应的短周期减弱、长周期加强。黄土高原中部分维数值较大而西北部和东南部暴雨分维数值较小，中部暴雨异常偏多的非线性机制最为复杂，而西北部和东南部地区相对简单^[26]。

干旱（1937—2004年）是该地区土壤水分最基本的特征，生长期土壤水分波动式下降，蓄水期土壤水分波动式上升，总体上以下降为主，20世纪70年代中后期土壤水分较好，80年代土壤水分较差，90年代末到21世纪初转好。土壤湿度垂直分布变化阶段性明显，土壤水分由表层向1m深层渗透一般需要4旬时间；生长期土壤水分有减少的趋势，蓄水期土壤水分存在增加的趋势^[27, 28]。

近50a黄土高原水汽呈上升趋势，西部水汽上升明显于东部；夏季增加趋势最明显，冬季次之，春秋两季增减趋势不明显。水汽1977年之前存在下降趋势，相应变幅小；1977—1987年间波动，1987年后呈明显上升趋势，相应变幅较大^[29]。

2.3 水热配置响应

秋季暖干化（1937—2005年）是区域响应最主要的特征，在高原中西部响应最敏感；降水（降水量、降水次数、连续性降水时量等）趋于减少、气温（平均、日最高、日最低、季极端最高气温等）升高、蒸发量加大，暖干趋势明显；总低云量趋于减少、日照增多、地温上升等促进暖干发展。在近70年中降水量演变出现2次明显转折，气温出现2次突变；年代际演变中降水量存在20~30年周期，气温周期不小于70年。土壤水分存在显著下降趋势，在1995年发生了突变（转向明显负距平）。土壤水分年际演变与降水同向性较好，年代际变化与气温呈反位相配置；土壤水分演变振荡周期对降水短周期和气温长周期响应明显。黄土高原半干旱区土壤水分对短期降水变化、降水气温气候变化及短周期振荡都存在明显响应^[30, 31]。

黄土高原干旱趋势趋于加重，20世纪90年代干旱加剧最为明显，干旱最容易在7—10月发展到最重，其间干旱信息由高原中部向西、向东、向北传播。干旱最敏感区（变化大值区）在高原腹地，高原周边地区干旱变幅较小；干旱变化振荡周期以2~4年为主；干旱准2年振荡的空间演变清晰，干旱移动方

向和强度变化比较明显,在5个月之内强度、范围加大,大值区数值增大并向周围扩展旱情加重,再经过5个月后干旱大值区的数值下降快于周围,从敏感区向高原四周扩散^[32]。

2.4 生产力响应

1937—2004年68年黄土高原气候生产力呈递减趋势;20世纪30—40年代高,60年代次高,90年代最低,80年代次低;气候生产力演变存在多种周期,其中4年周期最为明显;高原西部是生产力不稳定低产区、南部为相对稳定高产区、高原东部为不稳定区,高原中北部是气候生产力变化的敏感区。气候生产力的空间振幅存在传播趋势,从高原中东部向东南传播。高原中北部是气候生产力变化的敏感区;气候生产力的空间变化幅度南部明显大于北部,变化信息有从高原中东部向四周传播的趋势。黄土高原气候生产力南北部有反向变化趋势,其演变过程在1984年明显转变,南部转向降低、北部升高;东西变化过程在1982年存在变点,有东部减少、西部增多的趋势^[33, 34]。

农业可能是对气候变化反应最为敏感的产业之一,气候变化将使我国未来农业面临生产的不稳定性增加^[35, 36]。1981—2000年黄土高原地区年小麦、玉米、胡麻产量对气候变化的敏感性不强。1981—2000年20年陇东和陇中黄土高原地区油菜产量不稳定,产量变化以2~4年左右的年际振荡为主,5年周期大多对应极值产量^[36]。

黄土高原地区增温使植被生长季的延长和生长加速,近年来黄土高原植被盖度总体上呈增加趋势与增温造成植被生长在春季提前和秋季推迟有关,1981—2006年黄土高原NDVI值在春季和秋季(尤其是5月和10月)的增高趋势较为明显^[37]。温度升高对生态系统生产力的影响存在着正负两方面的效应。其正面作用是温度的增加可以延长植物生长季节,改善光合作用效率,提高植物的生产力,有利于NDVI值上升;而在半干旱地区,增温的负面效应主要在于增加水分消耗而引起干旱,水分胁迫加剧,增强了土壤干燥化的程度,使植被初级生产力随温度升高而下降。温度升高引起的干旱还可能推迟农牧交错区植被春季返青期,提早温带典型草原和农牧交错带植被的衰退期,从而缩短了生长期^[38]。

黄土高原地区植被覆盖对降水的响应较为敏感。从年际变化看,植被覆盖变化和降水变化具有很好的一致性,生长期的植被对降水具有很好的响应,尤其是6—8月降水对植被生长影响最大。从年际尺度来看,植被覆盖和降水非常密切,并表现出阶段

特征。20世纪80年代,黄土高原降水处于一个相对的多雨期,同期植被覆盖处于快速上升阶段;进入90年代之后,降水量开始趋势性的减少,植被覆盖随之不再明显上升,而转为小幅波动时期^[39, 40]。

3 结语

从黄土高原气候环境形成和演化的自然背景,以及黄土高原气候环境的区域响应特点,主要认识有:(1)2000多万年前,冬季风环流搬运内陆荒漠大量粉尘到黄河中游地区堆积而成黄土高原;黄土高原与亚洲季风环境和内陆干旱环境密切相关,半干旱一半湿润的、季节反差明显的气候特征经历了不同程度的变化,但一直没有中断而持续发展至今。(2)黄土高原数千年来气候的演化、人类活动及其环境效应,展现出在气候变化和人类活动的双重驱动下黄土高原的气候环境的演变。(3)当代黄土高原气候环境,对全球气候变化响应的敏感区主要集中在高原中部附近,水热组合变化导致明显的暖干化趋势,秋季暖干化趋势突出,等雨量带总体南移,干旱趋于加重;夏季高原西部湿润化、东部干旱化。区域性暴雨事件趋于减少,过程雨量加大,高原中部暴雨非线性机制复杂于周边;土壤水分生长期波动式下降,蓄水期土壤水分波动式上升,总体以下降为主。气候生产力呈递减趋势,变化幅度南部明显大于北部;粮食产量对气候变暖响应不显著,植被生长季延长和生长加速。

今后需要关注的问题有:(1)黄土高原是大气运动的直接产物,黄土高原同时也记载着气候的演变,应该从黄土高原内部寻找记录,可能是今后量化气候系统演变的开拓研究的重点之一。(2)随着全球气候变化,一些极端天气气候事件和突发性气候灾害等短周期气候事件对环境影响强度和频率的演变。(3)区域气候背景方面,暖干化会使原本脆弱的生态系统面临更为严峻的环境条件,干旱化趋势将使生态恢复、农业生产、人居环境面临更大的压力。(4)黄土高原农业生产及生态建设应对气候变化短期效应和长期影响的研究亟待加强。(5)定量区分自然和人为因素在过去的环境和生态变化中的作用,一直是相关研究工作中面临的难点。(6)黄土高原地区的土壤资源是全世界最丰富的,对此认识、利用和发掘相当不足。

该领域相关研究,关注的重点和讨论的不少问题可能会有不同看法,将会在以后的研究中得到解决或深入。

参考文献

- [1] Guo Z T, Ruddiman W, Hao Q Z, et al. Onset of Asian desertification by 22 Myr ago inferred from loess deposits in China. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [2] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. Millennial—and orbital—scale changes in the East Asian monsoon over the past 224, 000 years. *Nature*, 2008, 451: 1090-1093.
- [3] Hao Q Z, Guo Z T. Spatial variations of magnetic susceptibility of Chinese loess for the last 600 kyr: Implications for monsoon evolution. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 10(B12101): doi: 10.1029/2005JB003765.
- [4] 郭正堂, Fedoroff N, 刘东生. 130ka来黄土—古土壤序列的典型微形态特征与古气候事件. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(5): 392-398.
- [5] Wang H, Ambrose S H, Liu C, et al. Paleosol stable isotope evidence for early hominid occupation of East Asian temperate environments. *Quaternary Research*, 1997, 48: 228-238.
- [6] 王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. *自然科学进展*, 2000, 10(4): 325-332.
- [7] Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and north atlantic climate. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [8] Chen F H, Zhu Y, Li J J, et al. Abrupt Holocene changes of the Asian monsoon at millennial—and centennial scales: Evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(23): 1942-1947.
- [9] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件. *中国科学(B辑)*, 1992, 35(12): 1300-1308.
- [10] Chen F H, Wu W, Holmes J A, et al. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the alashan Plateau, Inner Mongolia, China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48: 1401-1410.
- [11] Wu W, Liu T. Possible role of the "Holocene Event 3" on the collapse of the Neolithic Cultures around the Central Plain of China. *Quaternary International*, 2004, 117: 153-166.
- [12] 竺可桢. 中国五千年来气候变迁的初步研究. *中国科学*, 1973, 16(2): 226-256.
- [13] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢. 中国小冰期的气候. *第四纪研究*, 1998, (1): 54-64.
- [14] 王绍武, 龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温. *自然科学进展*, 2000, 10(4): 325-332.
- [15] Yang B, Braeuning A, Johnson K R, et al. General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(9): 1324-1327.
- [16] 孙湘君, 宋长青, 王璋瑜, 等. 黄土高原南缘10万a以来的植被——陕西渭南黄土剖面的花粉记录. *科学通报*, 1995, 40 (13): 1222-1224.
- [17] 李小强, 周卫健, 安芷生, 等. 沙漠—黄土过渡带13ka BP以来季风演化的古植被记录. *植物学报*, 2000, 42(8): 868-872.
- [18] 刘多森, 李小强, 安芷生, 等. 全新世黄土高原塬区植被特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2003, 23(3): 109-114.
- [19] 吕厚远, 刘东生, 郭正堂. 黄土高原地质、历史时期古植被研究状况. *科学通报*, 2003, 48(1): 2-7.
- [20] 符凉斌, 董文杰, 温刚, 等. 全球变化的区域响应和适应. *气象学报*, 2003, 61(2): 245-249.
- [21] 王毅荣. 甘肃岷县山区气温变化趋势分析. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 119-127.
- [22] 张定全, 王毅荣. 中国黄土高原地区春季气温时空特征分析. *高原气象*, 2005, 24(6): 898-904.
- [23] 王毅荣. 1960—2005年黄土高原地区积温演变. *冰川冻土*, 2007, 29(1): 119-125.
- [24] 王毅荣, 吕世华. 黄土高原降水对气候变暖响应的敏感性研究. *冰川冻土*, 2008, 30(1): 43-51.
- [25] 王毅荣, 王锡稳. 中国黄土高原地区4—9月雨量时空变化特征分析. *高原气象*, 2006, 25(4): 737-743.
- [26] 王毅荣, 林纾, 张存杰. 中国黄土高原区域性暴雨时空变化及碎性特征. *高原气象*, 2007, 26(2): 373-379.
- [27] 王锡稳, 王毅荣, 张存杰. 黄土高原典型半干旱区水热变化及其土壤水分响应. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 123-129.
- [28] 王毅荣, 姚玉璧. 甘肃黄土高原土壤水分演变特征. *土壤通报*, 2005, 36 (6): 850-855.
- [29] 王毅荣, 林纾, 李耀辉, 等. 甘肃空中水汽含量对全球气候变化响应. *干旱区地理*, 2006, 29 (1): 47-52.
- [30] 王毅荣. 黄土高原秋季气候对全球增暖的暖干化区域响应. *高原气象*, 2008, 27(1): 104-112.
- [31] 王毅荣. 黄河上游牧草区水热变化及土壤水分响应. *自然资源学报*, 2007, 22(2): 260-267.
- [32] 王毅荣. 中国黄土高原地区干旱特征. *干旱区地理*, 2008, 31 (1): 38-43.
- [33] 王毅荣, 林纾. 近70年中国黄土高原气候生产力演变分析. *草业科学*, 2006, 23(9): 1-6.
- [34] 王毅荣, 张存杰. 中国黄土高原气候生产力次区域反向演变特征. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(4): 186-190.
- [35] 秦大河. 气候变化的事实与影响及对策. *中国科学基金*, 2003, 17(1): 1-3.
- [36] 王毅荣. 甘肃省粮油产量对气候变暖的敏感性研究. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(5): 206-207.
- [37] 信忠保, 许炯心, 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. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(11): 1504-1513.
- [38] Tao F, Yokozawa M, Zhang Z, et al. Land surface phenology dynamics and climate variation in the North East China Transect (NECT) 1982—2000. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29 (19): 5461-5478.
- [39] 齐清, 王天明, 寇晓军, 等. 泾河流域植被覆盖时空演变及其与降水的关系. *植物生态学报*, 2009, 33(2): 246-253.
- [40] 孙睿, 刘昌明, 来启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. *地理学报*, 2001, 56(6): 667-672.

A Review of Recent Study Advances in Climatic Environment on China Loess Plateau

Wang Yirong^{1,2}, Zhang Qiang¹, Jiang Shaobo²

(1 Institute of Arid Meteorology/ Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province/ Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020 2 Meteorological Bureau of Dingxi, Dingxi 743000)

Abstract: The Loess Plateau is a plateau that covers an area of about 640,000 km² in the upper and middle reaches of China's Yellow River. The Loess Plateau was formed over long geologic times, and some works of writing have provided valuable information about climate environment change from samples taken from the deep layer of its silty soil, data observed by satellite instrumentation, and historical documents. The Loess Plateau was highly fertile and easy to farm in ancient times, which contributed to the development of early Chinese civilization around the Loess Plateau. In medieval times of China, people stayed here to grow rice. Centuries of deforestation and over-grazing, exacerbated by China's population increase, have resulted in

degenerated ecosystems, desertification, and poor local economies; in fact, the soil of this region has been called the most highly erodible soil at 22 Ma BP, and the fine-grained silt was picked up by strong prevailing westerly winds. Huge dust clouds moved and redeposited over loess plateau areas. Due to the nature of loess soil and its ability to slope in vertical columns when flooding occurs, the stabilized soil-layers were eroded into the corrugated, sharply-dissected bluffs we see today. During the last Ice Age, sometime the north monsoon retreated and south-east monsoon more developed and vast amounts of water vapor and heat-resource flowed into the plateau region. The sediment was deposited on the floodplain, creating huge soil flats. When meltwaters receded, these mud flats were exposed. The Loess plateau has a rich archaeological heritage. The region in response to global climate change on China's loess plateau, showed that the climate became warmer and drier in autumn over the plateau; Winter rainfall was trending up; the west part of the plateau became wet; the east part became arid in summer. The seasonal and regional characteristics were very clear. The sensitivity regions of rainfall were different, moving westward and southward from spring to winter. Some of rain items, such as the rainfall day, maximum rainfall in a day and rainfall during continuum continual rain, had sensitivity of rainfall in response to regions in the annual timescale; the rain items had obvious differences on remarkable phases, and had interdecadal timescale periods. The water of soil absorption changed in a whole year. Different crops had different effects on vertical distribution of soil moisture. The water of soil became lost during the crop growth period, in store-water times instead. The crop output and surface air temperature data in the time-domain can detect the most predominant modes coupling them. It is more sensitive for the output and temperature in wheat, corn and flax, respectively, which implies that the output sensitivity to temperature is higher west of the Yellow River, lower in the Loess Plateau. The crops in response to the rainfall and temperatures were different in other periods. The crops do well in the long periods whereas they decay in short periods in less rainfall times. The temperature displayed obvious periods in cold times, on the contrary in warm times. The main characteristic of soil water was arid. The change of soil water had an obvious effect on the variance of rainfall and temperature with climate, decade-days and short period oscillation. The warm-drought climate developed from the fact that the quantity of total and low cloud became reduced. Whole consistent region response was most characteristic of the warm-drought climate evolution.

Key words: China Loess Plateau, climatic environment, evolution, review

(上接60页)

本书第一章介绍了化石燃料作为人类社会的主要能源，是经济、社会发展的物质基础，同时也阐释了化石燃料与全球变暖的关系；第二章就主要的温室气体，如：CO₂、黑碳，分别对其特性、来源以及相关的健康效应做了详细介绍，并结合美国的大气污染物排放清单，对这些温室气体的主要人为来源进行了对比分析；第三章从发展模式、生活方式、人口增长及大气中温室气体的变化过程等多个方面全面回顾了18世纪工业革命以来到19世纪

中期，人类社会发生的巨大变化，并叙述了这一过程对全球气候变化所造成的重要影响，从可持续发展的角度，提出了应大力发展绿色经济；第四章—第六章就目前高速发展所带来的大气污染和气候变暖问题进行了深入分析，针对不同行业分别介绍了该行业对全球变暖的应对及未来的发展方向，其中重点介绍了绿色建筑、绿色交通以及绿色能源和经济燃料等概念。并以当前环保型汽车的研发为例，指出无论是个人还是社会都应承担起应对

气候变化的责任。第七章介绍了农业对大气环境及全球变暖的影响及相应的减缓措施。第八章和第九章主要关注生物燃料、可替换能源以及环保型汽车等重点技术领域的发展，对这些领域当前的技术现状及主要研究方向进行了详细介绍，并对相关技术进行了分析对比。最后一章则对未来的能源需求以及新技术的发展方向进行了简要评述和概括，并强调了应加强对公众的气候变化知识宣传。

(作者单位：中国气象局培训中心)