

无定河区域 1981~2001 年植被生产力和 水量平衡对气候变化的响应

莫兴国¹ 郭瑞萍^{1,2} 林忠辉¹

1 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于土壤-植被-大气系统过程模型(VIP模型)和NOAA-AVHRR遥感信息,模拟了1981~2001年黄土高原无定河区域(36~40°N, 108~111°E)植被总第一性生产力(GPP)和水量平衡的时空变化特征及其对气候变化的响应。结果表明:该研究区域1981~2001年间气候有明显变暖趋势,斜率为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,降水量下降,斜率为 $-3.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。GPP年总量1998年前呈上升趋势,之后呈下降趋势,平均值为 $289\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C),最大值和最小值分别为 $377\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C)(1994年)和 $143\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C)(2001年)。年降水量、蒸散量和径流量随时间都呈下降趋势,且其空间分布有明显的由南向北梯度递减特征。

关键词 总第一性生产力 水量平衡 气候变化 VIP模型

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0477-10 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Responses of Gross Primary Productivity and Water Balance Components in Wuding River Region, the Eastern Part of the Loess Plateau from 1981 to 2001

MO Xing-Guo¹, GUO Rui-Ping^{1,2}, and LIN Zhong-Hui¹

1 *Key Lab of Ecological Net Observation and Modeling, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Based on the Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer model (VIP model) and the NOAA-AVHRR remote sensing data, the temporal and spatial characteristics of the gross primary productivity (GPP) and water balance budget in the Wuding River region, the eastern part of Loess Plateau, were simulated to explore their responses to the climate and land use/cover change. The results show that the climate warming was significant with a rate of $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$, and annual precipitation amount decreased with a rate of $3.2\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ from 1981 to 2001. The trend of annual GPP increased before 1998 and decreased after 1998, with a mean value of $291\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) and the maximum and the minimum $377\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) (1994) and $143\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) (2001), respectively. The annual values of precipitation and evapotranspiration show a decreasing trend in this period. On the spatial pattern, GPP and evapotranspiration have similar patterns with precipitation, namely decreasing from south to north. It is concluded that the responses of GPP and water balance in Wuding River region were significant incurred by global change from 1981 to 2001.

收稿日期 2004-08-25 收到, 2006-04-25 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 90211007、国家重点基础研究发展规划项目 2002CB412503 和中国科学院地理科学与资源所创新项目 CXIOG-A04-12

作者简介 莫兴国, 男, 1966 年出生, 博士, 研究员, 主要从事陆地生态系统能量和物质循环研究。E-mail: moxg@igsrr.ac.cn

Key words Gross primary productivity, water balance, climate change, VIP model

1 引言

植被生产力是指植物叶片利用太阳能同化 CO_2 , 制造有机物的能力, 可分为总第一性生产力和净第一性生产力。总第一性生产力 (GPP) 是指绿色植物在单位时间、单位面积上所生产的全部有机物质; 植被净第一性生产力 (NPP) 是指绿色植物在单位时间、单位面积上由光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。实际蒸散量则表示植物蒸腾和地表蒸发所消耗的总水量。植被第一性生产力很大程度上受土壤、气候和植被类型等因子的影响; 区域植被的 NPP 和蒸散量反映植被生产力和水分利用状况, 对区域生态系统功能评价, 自然资源合理规划和持续利用具有重要意义。

植被生产力的估算模型大致可分为 3 类, 即统计模型 (气候相关模型)、参数模型 (光能利用率模型) 和过程模型 (陆地生态系统模型)。其中, 陆地生态系统模型从植物光合作用与环境因素的关系出发, 根据植物生理、生态学原理来对生态系统的能量收支转化、水文循环和生物地球化学循环等过程进行动态模拟, 计算陆地生态系统中水分和其他重要元素如碳、氮等的通量和库的大小。由于过程模型综合考虑植物的生理生态和生物物理过程, 以及与碳氮通量有关的土壤特性等因素, 理论框架完整、结构严谨、物理意义清晰, 其开发和应用已经成为生态系统研究的重要方向。20 世纪 90 年代后最有代表性的植被生产力估算模型都是生态系统过程模型, 如 CENTURY 模型^[1]、TEM 模型^[2]、BGC 模型^[3,4]、BEPS 模型^[5]和 CEVSA 模型^[6]。过程模型因涉及植物生理生态、太阳辐射、植物冠层、土壤及气象等诸多方面, 因此使得模型参数较多, 且有些难以获取, 模型参数化和经验函数调试比较复杂, 这些构成了过程模型发展不利的一方面。但是, 随着对地观测试验数据的积累和遥感数据同化研究的深入, 过程模型在地理信息系统数据支持下, 已经开始广泛采用遥感数据解释区域或全球尺度的生态系统过程。这样, 既简化了模型参数输入

的要求, 又可以保持模拟结果的机理性和可解释性。

结合遥感和 GIS (Geoscience Information Society) 背景资料, 基于生态系统过程模型的区域及全球尺度的植被生产力和物质通量研究是目前最为活跃的研究方向。Nemani 等^[7]用 PEM 模型分析了气候变化与全球 NPP 的关系, 结果表明, 气候变暖减缓了环境对植被生长的限制作用, 全球 NPP 呈增加趋势。在国内也已经开始利用过程模型研究植被生产力。周才平等^[8]利用 TEM 模型计算了青藏高原主要生态系统的 NPP, Cao 等^[6]用 CEVSA 模型模拟了气候变暖对植被 NPP 的影响, Tian 等^[9]用 TEM 模型模拟了亚洲季风区 NPP 的变化。Cao 等^[10]用 CEVSA 模型按 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 对中国陆生态系统的 NPP、NEP 和土壤呼吸进行了模拟。高志强等^[11]用 CEVSA 和 GLO-PEM 模型对中国农牧过渡区 1981~2000 年的 NPP 进行了估计。Gao 等^[12,13]利用其开发的模型也对中国的 NPP 进行了研究。

无定河流域及其周边地区 (这里统称为无定河区域) 位于黄土高原东部, 是农田、林地向草地、荒漠过渡的地带, 水土流失严重, 生态系统脆弱。近几十年来在退耕还林、还草和水土保持等方面投入了大量的人力和物力, 区域植被生产力格局发生了明显的变化。本文以该地区为研究对象, 基于我们开发的生态系统过程模型 (VIP 模型^[14~17]), 在地理信息系统的支持下, 利用遥感信息, 模拟分析该区域植被生产力和水量平衡的时空演变特征及其对气候变化的响应。

2 模型介绍

VIP 模型是自主开发的基于生态系统过程的综合模型, 用于模拟区域尺度的生态水文过程和植被生产力, 包括两个模块: 1) 土壤-植被-大气交换模块, 其中包括区分受光叶和荫蔽叶的碳同化机理模式、双源能量平衡模式和 3 层土壤水分模式; 2) 遥感、地理信息和气象要素尺度扩展模块, 其中冠层叶面积指数由遥感植被指数反演, 气象要素由反距离平方梯度法

空间插值而得。模型运行的时间步长为 1 h, 空间分辨率可根据需要进行调整。模型具体描述见文献 [14~17]。

3 研究区概况

无定河区域位于黄土高原与毛乌素沙漠的过渡带, 属于风沙丘陵区, 土壤侵蚀严重, 自然生态环境脆弱。气候属于东部季风气候区和西北干旱气候区的过渡带, 大风和沙暴多, 年均温度在 7.9~11.2 °C 之间, 年降水量在 300~550 mm 之间。降水集中在夏季 (约占全年的 60%), 变幅大且空间分布不均匀, 东南多, 西北少。该地区地带性植被为草原, 从南向北由草原植被向荒漠植被过渡, 且植被稀疏低矮, 植物群落结构简单, 种群贫乏。区内沙质荒漠化严重, 分布着固定、半固定和流动沙丘, 荒漠化是无定河区域最主要的环境问题。

本文选择的研究区范围为 (36~40°N, 108~111°E), 面积约 131 328 km² (图 1, 见文后彩图)。

4 资料说明

本文所使用的资料主要包括: 1) 1981 年到 2001 年 NOAA/AVHRR NDVI 8 km 分辨率旬最大值合成的遥感数据; 2) 美国 USGS 的 GTOPO30 DEM 数据; 3) 基于 Terra-MODIS 影像的土地利用分类图; 4) 研究区内 22 个基本气象站的逐日气象资料 (日平均气温、最高和最低气温、水汽压、风速、降水、日照时数和大气压); 5) 1:1400 万中国土壤质地图。

5 结果与分析

5.1 气候变化

在 1981~2001 年间, 无定河区域的年降水量表现为波动性变化 (图 2)。依据该 21 年的降水距平发现, 20 世纪 80 年代降水量大于多年平均降水量的年份小于多年平均降水量的年份多 1 年, 即基本持平, 而 90 年代则完全持平, 说明降水量是在一定的范围内波动, 没有出现极端的湿年或

早年。但年平均降水量呈明显下降趋势, 斜率为 $-3.2 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。年平均气温最大值为 10.4 °C (1998 年), 最小值为 7.8 °C (1984 年), 最大波动为 2.7 °C, 总体呈现上升趋势, 斜率为 $0.08 \text{ °C} \cdot \text{a}^{-1}$ 。20 世纪 80 年代, 气温负距平值出现的次数较正距平值多, 而 90 年代正距平值出现的次数较多, 增温现象更为明显。

5.2 植被指数动态特征

就无定河区域植被指数 (NDVI) 年均值而言, 其年际间变化不显著, 最高值为 0.19 (1994 年), 最低值为 0.09 (2001 年), 最大值与最小值相差 0.1, 变异系数为 13%, 小于同期年降水量的变异系数 (16%)。就该地区而言, 年平均 NDVI 与年降水量的线性关系不明显, 降水量多的年份并不一定对应高的植被指数 (如图 3a), 譬如 1985 年降水量达 500 mm, 但 NDVI 较小, 说明降水量的季节分配和暴雨强度等原因对植被的状况也有相当大的影响^[18]。1981 年到 1994 年间 NDVI 表现出波动中上升的趋势, 1994 年后, NDVI 表现出波动中缓慢下降的趋势, 说明植被的生长状况略微变差。

植被指数的年内变幅较明显, 接近于正态分布, 高值区在 7~9 月之间, 低值区在 12 月和次年 1 月, 不同植被类型的植被指数年内总体变化趋势相近, 多数年份 6 月中旬都有一明显低值点 (图 3b)。这是由于夏收作物的收获而造成植被指数突降, 其他植被类型的 NDVI 下降很可能是由于 8 km 像元混合了部分农田的缘故。对不同土地利用类型, 裸地的 NDVI 最低, 灌丛次之, 草地和农田居中, 阔叶林、针叶林、混交林这三者的 NDVI 基本接近, 且远高于其他覆被类型。

NDVI 的地理差异显著 (如图 4a, 见文后彩图), NDVI 在 0.2~0.45 之间的高值区主要分布于南部的汾川河和延水一带, 面积较小, 而大多数地区的 NDVI 值在 0.1~0.15 之间。1981~2001 年间, NDVI 变化趋势也较为显著 (如图 4b, 见文后彩图), 东南大部分区域和西北局部地区 NDVI 值表现出减少的趋势, 这部分地区占整个区域面积的 72%, 其中显著减少的地区为总面积的 14%, 增加区主要在东北部的孤山川河、榆溪河和西南部的无定河流域的少数地区, 成带状分布, 占总面积的 28%, 其中显著增加的面积仅

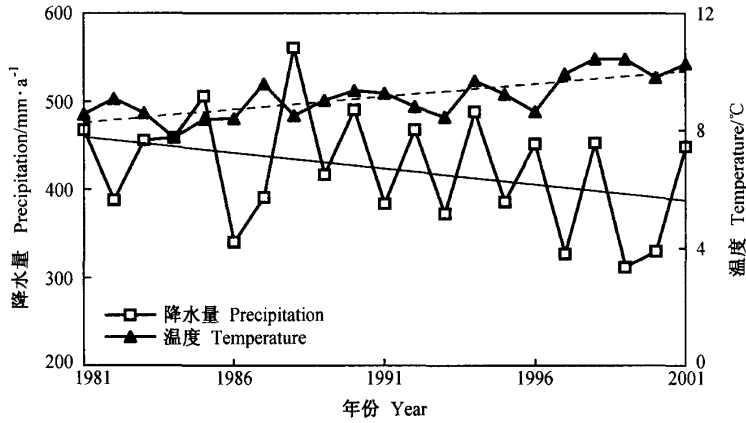


图2 1981~2001年降水量和年平均温度的时间变化趋势

Fig. 2 Trends of the annual precipitation amount and annual mean temperature from 1981 to 2001

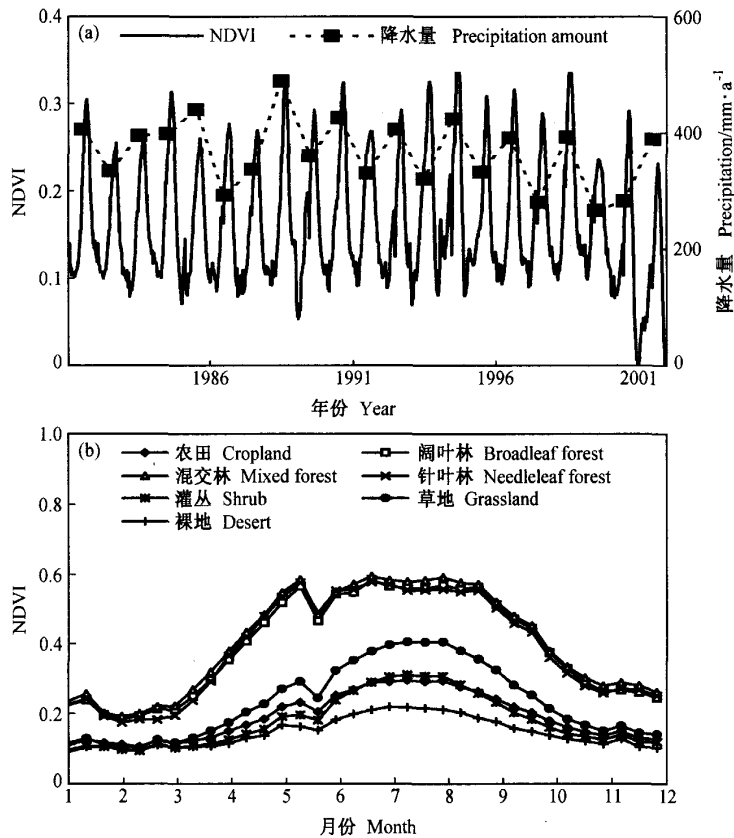


图3 (a) NDVI 旬平均值和 (b) 1998 年不同植被类型 NDVI 的年变化

Fig. 3 (a) Fluctuation of ten-day mean NDVI from 1981 to 2001 and (b) variations of NDVI for different vegetation types in 1998

为 2.4%，这是土地覆被变化最明显的地区，表征多年来退耕还草、植被建设的成就。NDVI 的变化趋势清晰地显示出该区域植被因气候和人类活动而导致的植被变化状况。

5.3 无定河区域 GPP 的时空分布

该区域年 GPP 从 1981 年的 $300\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) 上升到 1998 年的 $367\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C)，之后由于 1999 年的降水量只有 270 mm，因而导致随后 3 年的 GPP 连续下降，到了 2001 年只有 $143\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) (图 5)。20 世纪 80 年代和 90 年代的 GPP 值略有差异，分别为 282 和 $297\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C)，后者比前者增加了 5%。GPP 值主要集中在 $72\sim192\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (C) 的范围之内，80 和 90 年代此值域的比例分别约为 51%和 45% (图 6)。

依相关分析发现，GPP 变化相关性最好的因子是年平均植被指数 ($R=0.99$)，其次为年降水量 ($R=0.21$)、年平均温度 ($R=0.12$)。GPP 与

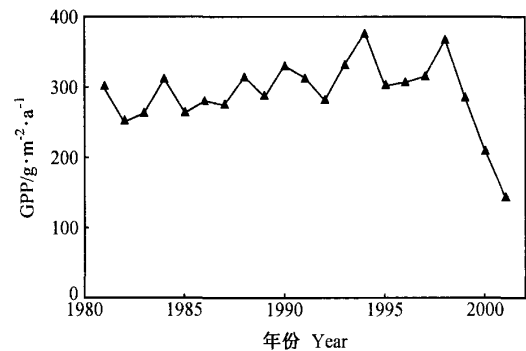
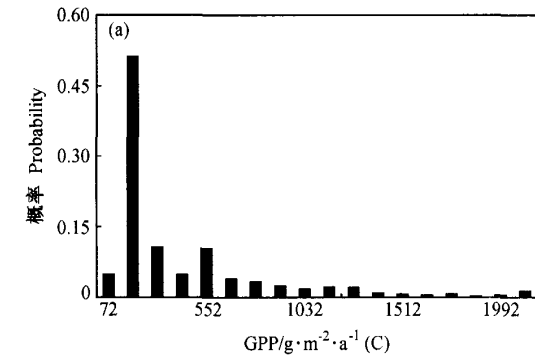


图 5 1981~2001 年 GPP 年总量的变化
Fig. 5 Variation of annual GPP from 1981 to 2001



年降水量和与年平均温度的相关性远小于其与年平均 NDVI 的相关性。

21 年平均的 GPP 分布如图 7a 所示 (见文后彩图)。环境因子的地理分异性导致了不同地区 GPP 的差异，即自东南向西北递减，随纬度增加而减少。以草地、农田为例 (如图 8)，两者的 GPP 总体变化趋势一致，从低纬到高纬逐渐减少，但农田的减少速率比草地快，其中在纬度低于 37°N 的区域，农田的 GPP 较草地高，随后草地的 GPP 高于农田。就整个研究区域而言，灌丛草地面积所占比例最大，约为 71%，其相应的 GPP 总量也最大；草地其次，面积占到 22%，GPP 总量仅次于灌丛，阔叶林和混交林所占比例较小，分别为 0.9%和 0.6%。但就单位面积而言，7 种植被类型中针叶林、阔叶林、混交林的生产能力较强 (表 1)。

图 7b (见文后彩图) 表示 1981~2001 年间无定河区域 GPP 的变化趋势。纵观整个区域，21 年来约有 59%的地区植被 GPP 呈减少趋势，其中显著减少的地区约占总面积的 9%，而 41%的地区植被 GPP 呈增加趋势，但其中仅有不到 6%的地区的 GPP 显著增加。NPP 增加的地区主要集中在东北部的孤山川河流域、西南部以及无定河流域西北部，这些地区处于农牧交错带，近年来植被恢复效果显著，而 GPP 减少地区很大一部分是荒漠区和低矮灌丛区。

5.4 水量平衡的变化趋势和空间分布

降水量、蒸散量在 1981~2001 年间表现为波动式缓慢下降的变化趋势 (图 9)。降水量 20 世纪 80 年代集中在 $360\sim420\text{ mm}$ 之间，90 年代集中在

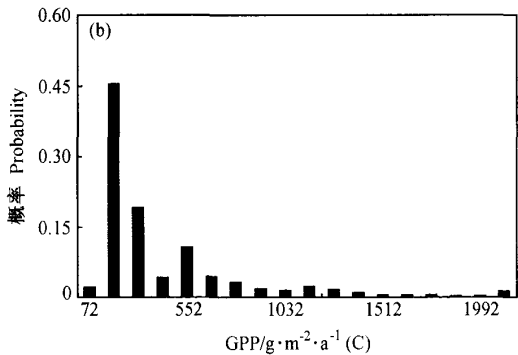


图 6 20 世纪 (a) 80 年代和 (b) 90 年代的 GPP 年均值概率分布
Fig. 6 Probabilities of the GPP values of (a) the 1980s and (b) the 1990s in the Wuding River region

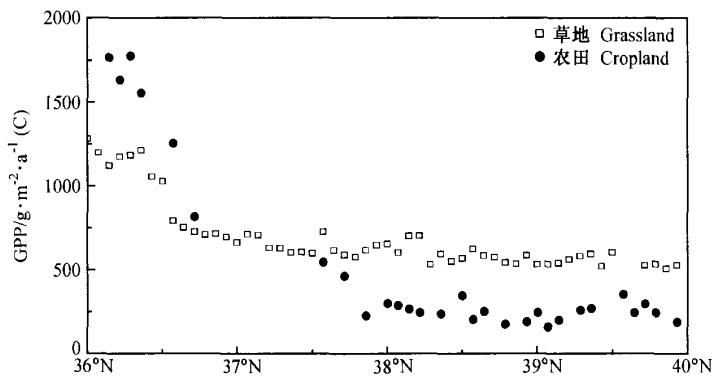


图 8 草地和农田 GPP 随纬度分布
Fig. 8 Latitudinal distribution of annual GPP of grassland and cropland

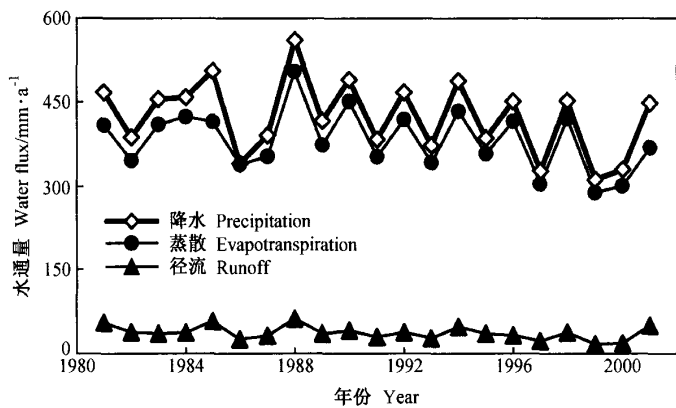


图 9 水量平衡的年际变化
Fig. 9 Annual variation of water balance components

表 1 不同植被类型的年平均 GPP 分布

Table 1 Annual GPP of each vegetation type

植被类型 Vegetation type	栅格数 Grid numbers	平均 GPP Average GPP/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)	标准差 Standard Deviation/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)	总 GPP Total GPP/ $\text{kg} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)
灌丛 Shrub	1283	332	191	426
草地 Grassland	402	774	257	311
针叶林 Needleleaf forest	33	1997	342	66
阔叶林 Broadleaf forest	16	1614	372	26
混交林 Mixed forest	10	1449	302	14
农田 Cropland	42	566	588	24
荒漠 Desert	32	214	95	7

340~400 mm, 但 80 年代和 90 年代的年蒸散量分别为 402 mm 和 364 mm, 下降了近 10%。蒸散量的分布概率与降水量类似, 二者的空间分异性 80 年代比 90 年代更显著。80 和 90 年代蒸散量最大概率分别在 320~380 mm (占 49%) 和 300~

360 mm (占 53%) 间, 其中冠层蒸散量 80 年代和 90 年代的最大概率分布在 80~140 mm 之间 (占 40%) 和 40~140 mm 之间 (占 64%), 径流量的分布概率差别较大, 90 年代的分布较 80 年代更为分散 (图略)。

无定河区域的降水量、蒸散量(图 10, 见文后彩图)有显著的空间变异性, 降水量由南向北呈现明显梯度递减, 年降水量相差 340 mm 左右, 低雨区在西北部, 最低降水量为 $257 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 高值区在东南部, 最高降水量为 595 mm, 蒸散量分布与降水量分布相似, 南部的高值区在 $450 \sim 550 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 西北部在 $200 \sim 300 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 左右。

6 讨论

无定河区域属于半干旱气候区, 水分匮乏和土壤侵蚀严重地影响当地植被的繁茂。更为不利的是, 20 世纪以来气候变暖加剧了该区域的干旱程度, 影响了生态环境的恢复。本文利用 1981~2001 年的气温、降水和 NOAA/AVHRR 资料, 分析了黄土高原无定河区域的气候变化及其对植被 GPP 和地表水量平衡的影响。分析表明, 在 1981~2001 年中该区域年际气候变化表现为增温和降水量下降的趋势, 实际蒸散量和地表径流均表现出下降的特征, 而植被 GPP 在 1998 年之前有明显的上升趋势, 之后呈下降趋势。主要原因是, 在黄土高原地区, 因海拔高度的影响, 年平均气温较低, 温度上升延长了植物适宜生长时间, 提高了生产潜力; 此外, 农牧交错带地区植被恢复明显, 说明防沙治沙措施是有一定成效的; 1998 年后, 该地区因退耕还林、草政策的推行, 短时期内导致该区域东南部植被盖度下降。

参考文献 (References)

- [1] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 785~809
- [2] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, et al. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, **363**: 234~240
- [3] Running S W, Coughlan J C. A general model of the forest ecosystem processes for regional applications I: hydrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecology Modelling*, 1988, **42**: 125~154
- [4] Running S W, Gower S T. FOREST-BGC. A general model of forest ecosystem processes for regional applications II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 1991, **9**: 147~160
- [5] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **62**: 158~175
- [6] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 185~198
- [7] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science*, 2003, **300** (5625): 1560~1563
- [8] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算. *地理学报*, 2004, **59** (1): 74~79
Zhou C P, Ou Y H, Wang Q X, et al. Estimation of net primary productivity in Tibetan Plateau. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **59** (1): 74~79
- [9] Tian H, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. *Global and Planetary Change*, 2003, **37**: 201~217
- [10] Cao M K, Tao B, Li K R, et al. Interannual variation in terrestrial ecosystem carbon flux in China from 1981 to 1998. *Acta Botanica Sinica*, 2003, **45** (5): 552~560
- [11] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对农牧过渡区生态系统生产力和碳循环的影响. *中国科学 (D 辑)*, 2004, **34** (10): 946~957
Gao Z Q, Liu J Y, Cao M K, et al. The effect of land use and climate change on ecosystem productivity and carbon cycle in Farming-pastoral Zone. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 2004, **34** (10): 946~957
- [12] Gao Q, Yu M, Yang X. A simulation analysis of the relationship between regional primary production and vegetation structure under climatic change scenarios. *Ecological Modelling*, 2000, **131** (1): 33~45
- [13] Gao Q, Yu M, Wang J, et al. Relationships between regional primary production and vegetation patterns. *Ecological Modelling*, 2004, **172** (1): 1~12
- [14] Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology*, 2004, **285** (1-4): 125~142
- [15] Mo X G, Liu S X. Simulating evapotranspiration and photosynthesis of winter wheat over the growing season. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, **109** (3): 203~222
- [16] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉, 等. 无定河流域水量平衡变化的模拟. *地理学报*, 2004, **59** (3): 341~348
Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating the Water Balance of the Wuding River Basin. *Acta Geographica Sinica*

- ica (in Chinese). 2004, **59** (3): 341~348
- [17] 莫兴国, 刘苏峡, 林忠辉. 基于 SVAT 模型的冬小麦光合作用和蒸散过程研究. 应用生态学报, 2002, **13** (11): 1394~1398
- Mo X G, Liu S X, Lin Z H, et al. Simulating photosynthesis and evapotranspiration of winter wheat with a SVAT model. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2002, **13** (11): 1394~1398
- [18] 高志强, 刘纪远. 基于遥感和 GIS 的中国植被指数变化的驱动因子分析及模型研究. 气候与环境研究, 2000, **5** (2): 155~164
- Gao Z Q, Liu J Y. The Study on Driving Factors and Models of NDVI Change Based on Remote Sensing and GIS in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2000, **5** (2): 155~164

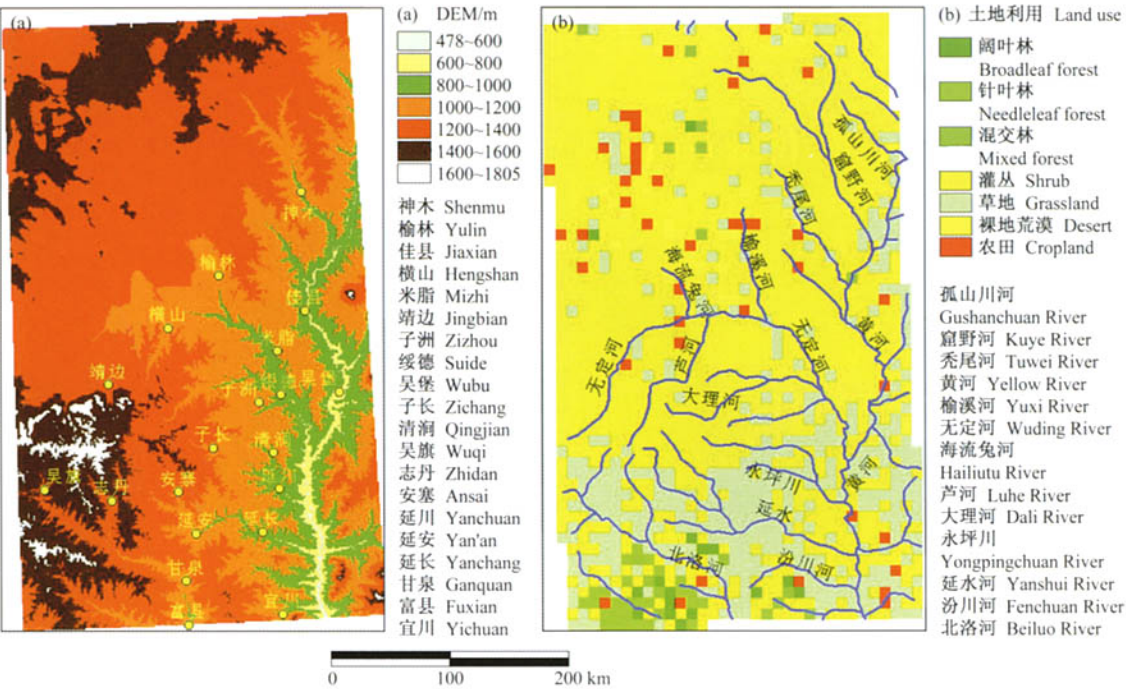


图 1 无定河区域数字高程模型 (DEM) (a) 和土地利用 (b)
Fig.1 DEM (a) and Land use (b) of the Wuding River region

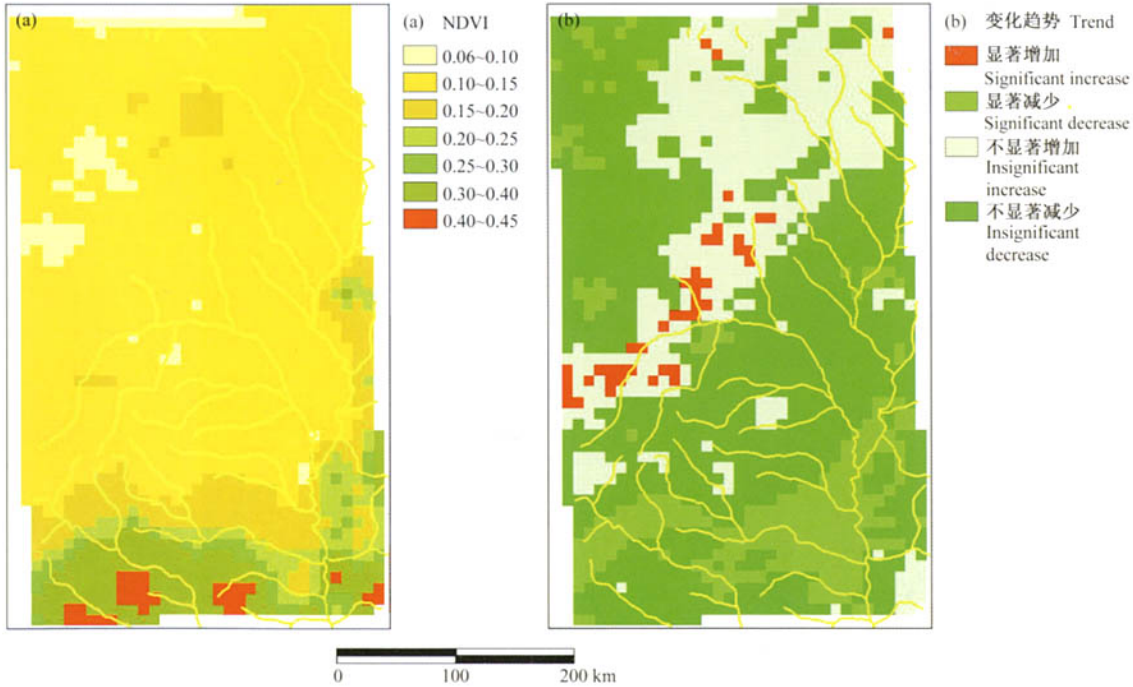


图 4 21 年平均 NDVI (a) 空间分布和 (b) 变化趋势表示为年平均 NDVI 与时间相关系数的 t ($P<0.01$) 检验结果
Fig. 4 (a) Spatial pattern of the 1981–2001 averaged NDVI and (b) its variation trend derived by t test

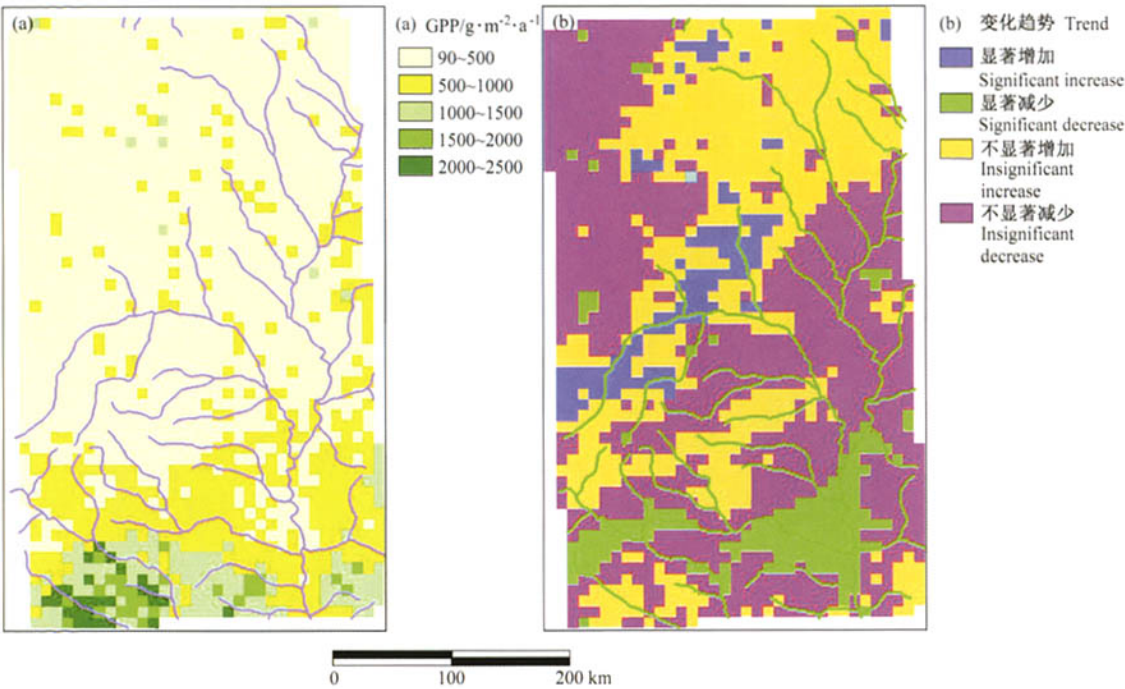


图 7 无定河区域年 GPP 分布 (a) 和变化趋势 (b)。图 b 表示年 GPP 与时间相关系数 t 检验结果
Fig. 7 Spatial pattern of annual GPP (a) and its temporal trend (b) derived by t test

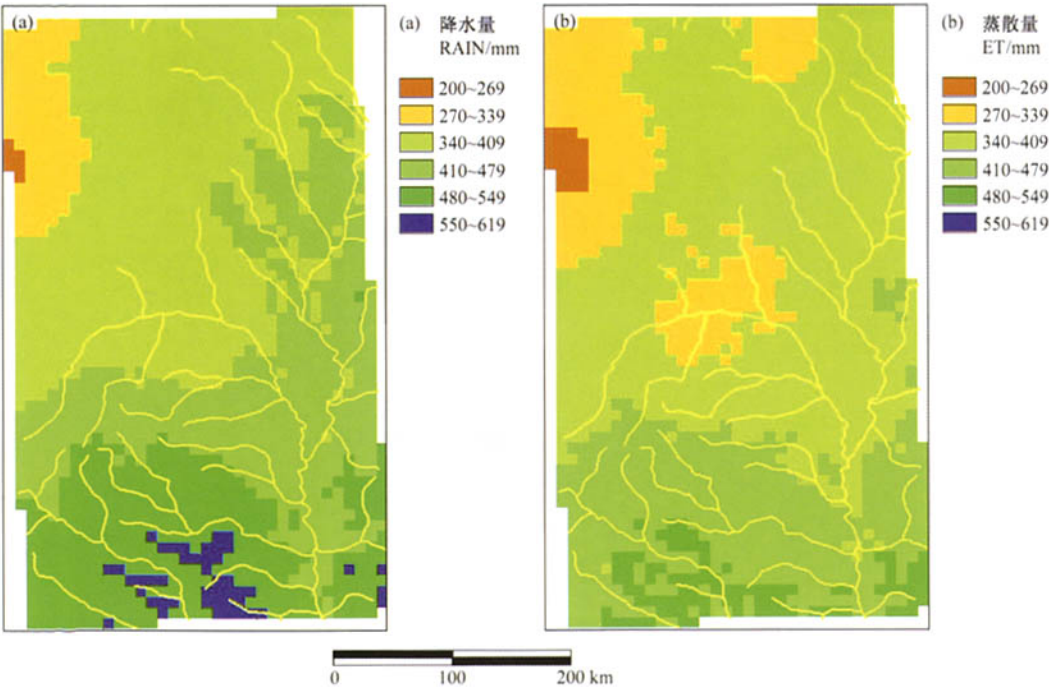


图 10 21 年平均 (a) 降水量和 (b) 蒸散量的空间分布
Fig. 10 Spatial pattern of (a) precipitation and (b) evapotranspiration from 1981 to 2001