

## 黄河源区气候温暖化及其对植被生产力影响评价\*

李英年, 赵新全, 汪诗平, 周华坤

(中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001)

**摘要:** 在分析黄河源区气温、降水变化的基础上, 用 Turc 经验模式计算黄河源区的蒸散量, 同时分析了近十几年来土壤湿度、植被地上净初级生产力的变化特征。结果表明, 1959 - 2005 年, 黄河源区年平均气温按  $0.0284 \text{ }^\circ\text{C/a}$  的变率升高, 降水变化态势平稳, 但蒸散量增加趋势明显, 上升倾向率达  $0.7315\text{mm/a}$ , 气温上升趋势与年代增加具有明显的相关性。从 1987 年以来土壤湿度的监测结果分析得知, 黄河源区下垫面蒸散量的加大使土壤向干暖化发展。这种气候因素的影响, 导致近十几年来植被地上净初级生产力按  $9.506\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$  的倾向率下降。

**关键词:** 黄河源区; 气候变化; 蒸散量; 生态环境

### Impact Assessment of Climate Warming up on Primary Productivity in Yellow River Source Region

LI Ying-nian, ZHAO Xin-quan, WANG Shi-ping, ZHOU Hua-kun

(Northwest Institute of Plateau Biology, CAS, Xining 810001, China)

**Abstract:** On the basis of analysis of the variations of temperature and precipitation in the Yellow River Source Region, the evapotranspiration was calculated by Turc experiential model and the soil humidity and net primary productivity aboveground in the last ten years were analyzed. The results suggested that temperature and evapotranspiration were significantly correlated and increased by  $0.0284 \text{ }^\circ\text{C}$  per year and  $0.7315\text{mm}$  per year respectively, while the precipitation was stable in 1959-2005. This drier and warmer tendency could be proved by the soil moisture monitoring results since 1987. The net plant primary productivity aboveground decreased by  $9.506 \text{ g m}^{-2}$  per year as meteorological factors changed.

**Key words:** Yellow River source regions; Climate change; Evapotranspiration; Ecosystem

全球变化包括了地球环境中诸如气候、土地生产力、水资源、大气化学、生态系统等自然和人类活动所引发的变化过程。半个多世纪以来, 许多温室效应气体浓度上升很快, 其中主要的温室气体  $\text{CO}_2$  平均浓度已从工业革命前的  $280\mu\text{l/l}$  上升到 1992 年的  $356\mu\text{l/l}$ ,  $\text{CO}_2$  浓度增加会导致全球温暖化加剧和整个地球气候系统发生迅速变化, 并将影响人类赖以生存的环境, 如全球范围的森林衰退、土地退化与荒漠化、生态系统退化、植被带迁移等<sup>[1-3]</sup>。目前, 全球  $\text{CO}_2$  浓度仍以平均每年  $1.2 \sim 1.8\mu\text{l/l}$  的速度增长。据有关模型预测<sup>[4]</sup>, 到本世纪中叶  $\text{CO}_2$  浓度可达  $550\mu\text{l/l}$ , 如果温室气体按目前速度继续增加, 整个地球环境可能会加速变化。由此引起的气候变化 (如气温升高、降水分布改变等) 将会对地表植被诸如生产力、植被带迁移等产生间接和直接的影响。

三江源位于青藏高原腹地, 在独特的自然环境影响下生态系统极其脆弱, 成为全球变化的最敏感区域, 为世界科学界所关注。以往研究者常以气温和降水量观测数据为基础分析青海三江源区的气候变化特征, 以及未来气候变化对生态系统的影响<sup>[5-6]</sup>, 与植物生理方面

结合研究的较少。因此, 本文拟以黄河源区典型站点自 20 世纪 60 年代以来的气象站观测资料为基础, 进一步分析其下垫面蒸散、土壤湿度以及植被地上净初级生产力的变化特征。

#### 1 资料与方法

由于条件限制, 对青藏高原土壤实际蒸散观测极少, 在讨论黄河源区的实际蒸散时常用经验公式计算。文中采用黄河源区玛多、大武、达日和久治 4 个气象站 1959 - 2005 年的降水和气温资料, 利用 Turc 经验公式法<sup>[7]</sup>计算地表实际蒸散量; 利用甘德气象站 1988 - 2004 年植被生长期观测的土壤湿度和 1990 - 2004 年植被地上净初级生产力资料, 分析其近十几年来变化特点, 以及在区域气候变化过程中的响应。Turc 公式为

$$E = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + \left(\frac{1.05R}{E_0}\right)^2}}$$

式中,  $R$  为年降水量 ( $\text{mm}$ );  $E_0$  为年最大蒸散量 ( $\text{mm}$ ),  $E$  为年平均实际蒸散量 ( $\text{mm}$ )。有

$$E_0 = 300 + 25T + 0.05T^2$$

\* 收稿日期: 2007-02-01

基金项目: 中科院西北高原生物研究所百人计划; 中科院西部行动计划; 西部之光人才培养计划项目

作者简介: 李英年 (1962 - ), 青海乐都人, 高级工程师, 主要从事生物气象及全球变化研究。E-mail: ynli@mwipb.ac.cn

式中,  $T$  为年平均气温 ( ); 规定:  $R > 0.316E_0$  时, 上式成立; 若  $R < 0.316E_0$  时,  $E = R$ 。

土壤湿度测定采用烘箱烘干法, 在指定区域每年植物生长季 5 - 9 月的每月 8、18、28 日进行观测, 6 个重复, 分 10cm、10 - 20cm、20 - 30cm、30 - 40cm、40 - 50cm 5 个土层, 为重量百分比 (%)。在植物生长期的每月中和月末分别采用收割法测定植被地上混合生物量, 以年内生物量最高测定值为地上净初级生产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 1959 年来黄河源区陆面蒸散量的气候变化特征

#### 2.1.1 1959 - 2005 年年平均气温变化

关于近半个世纪以来黄河源区的气温变化可见诸多的报道<sup>[5-6]</sup>, 其总的特点是, 自 1959 年器测开始以来, 区域气温是随年代进程而增加的。图 1 给出的玛多、大武、达日、久治 4 气象台站 1959 - 2005 年年平均气温变化过程, 由图可见, 黄河源区 4 站的年平均气温随时间进程 ( $t$ ,  $t$  为时间序列, 以 1959 年为 1, 1960 年为 2, ...) 表现出极显著的增加趋势 ( $T = 0.0284t - 1.8332$ ,  $n = 47$ ,  $r$

$= 0.6038$ ), 其气温升高的倾向率为  $0.0284 / a_0$ 。1965 年为有资料观测以来的最低值, 4 站平均仅为  $-2.4$ 。进入 20 世纪 80 年代以来, 年均气温最高值阶段性刷新, 1988 年和 1989 年分别为  $-0.17$  和  $-0.14$ , 1998 年和 1999 年分别为  $-0.07$  和  $-0.06$ , 到 2003 年达到最高, 为  $0.21$ 。从各年代平均值来看 (表 1), 年均气温逐年代明显提高, 这与以往研究结果一致, 而且据研究这种变化趋势在冬半年 (冷季) 明显高于夏半年 (暖季)<sup>[8]</sup>。

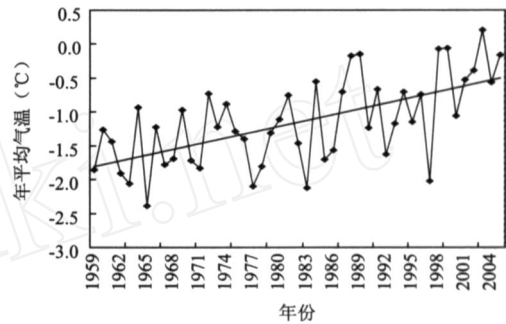


图 1 黄河源区 4 站 1959 - 2005 年年平均气温变化

表 1 黄河源区 4 站平均气温、降水量、实际蒸散量的年代际变化

	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2005	1959 - 2005
平均气温 ( )	- 1.6	- 1.4	- 1.0	- 1.0	- 0.4	- 1.2
距平 ( )	- 0.4	- 0.3	0.1	0.2	0.7	-
降水量 (mm)	544.4	523.7	556.2	515.8	526.5	532.8
距平百分率 (%)	2.0	- 2.0	4.0	- 3.0	- 1.0	-
实际蒸散量 (mm)	236.5	237.8	247.5	245.8	255.6	243.4
距平百分率 (%)	- 3.0	- 2.0	2.0	1.0	5.0	-

#### 2.1.2 1959 - 2005 年年降水量、陆面蒸散量变化

图 2 为黄河源区 4 站 1959 - 2005 年平均年降水量和陆面蒸散量的年变化过程。由图可见, 年降水量的总体变化趋势不明显 ( $R = - 0.0047t + 533.06$ ,  $n = 47$ ,  $r = - 0.2182$ , 未达到显著性检验水平), 但具有阶段性特征。年代际 (表 1) 间平均降水量的距平百分率在  $\pm 4\%$  的范围内, 属正常的气候稳定性变化范围。

由于黄河源区没有植被实际蒸散的观测, 太阳辐射的观测资料较少, 对于净辐射、土壤热通量等的资料观测更少, 本文选择 Turc 法计算历年的蒸散量。这是因为, 在众多估算下垫面蒸散的经验公式中, Turc 法<sup>[7]</sup>的计算值更接近于实际蒸散量; 另外, Turc 法所用参数较少, 只需要气温和降水量资料, 而下垫面性质的改变及其对水热平衡的影响已集中反映在气温和降水上。Turc 经验模式计算的黄河源区 4 站蒸散 1959 - 2005 年的多年平均值为  $243.4\text{mm}$ , 而用高桥一郎的经验模

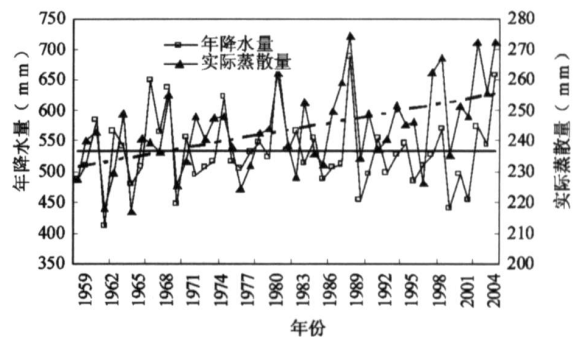


图 2 黄河源区 4 站 1959 - 2005 年平均年降水量和陆面蒸散量的年际变化

式<sup>[9]</sup>、伊万诺夫经验模式<sup>[10]</sup>、桑斯维特法计算<sup>[11]</sup>、彭曼 - 蒙特斯 (Penman-Monteith) 法<sup>[12-13]</sup>估算的结果明显偏低 (幅度达  $150\text{mm/a}$  以上), 因无辐射观测资料难于采用周广胜法<sup>[14]</sup>等模式进行蒸散量的估算。利用 Turc 模式计算的蒸散量年变化过程见图 2, 可以看到, 1959 -

2005年,蒸散量的变化趋势与降水相反,具有极显著的增加趋势 ( $R = 0.7315t + 330.16, n = 47, r = 0.5142, P < 0.01$ ), 上升倾向率为  $0.7315\text{mm/a}$ , 其年代际变化趋势也很明显 (表 1)。

植被蒸散量 ( $E$ )与年降水量 ( $R$ ) (图 3a,  $n = 47, r = 0.5446$ )、年平均气温 ( $T$ ) (图 3b,  $n = 47, r = 0.9283$ )间均具有极显著的正相关关系,但与  $T$ 间相关系数更大,因此认为,气温升高比降水变化对植被蒸散量的影响更明显。以上分析显示,当地降水变化态势平稳,具有一定的降水气候稳定性,但同期蒸散量上升明显,说明 47a 来在气候温暖化加剧的状况下,土壤植被的蒸散加剧,其蒸散具有一定的气候不稳定性,与气温的气候不稳定性相比更突出。说明气候在向温暖化发展的同时,由于下垫面蒸散的加大土壤在向干燥化方向发展。

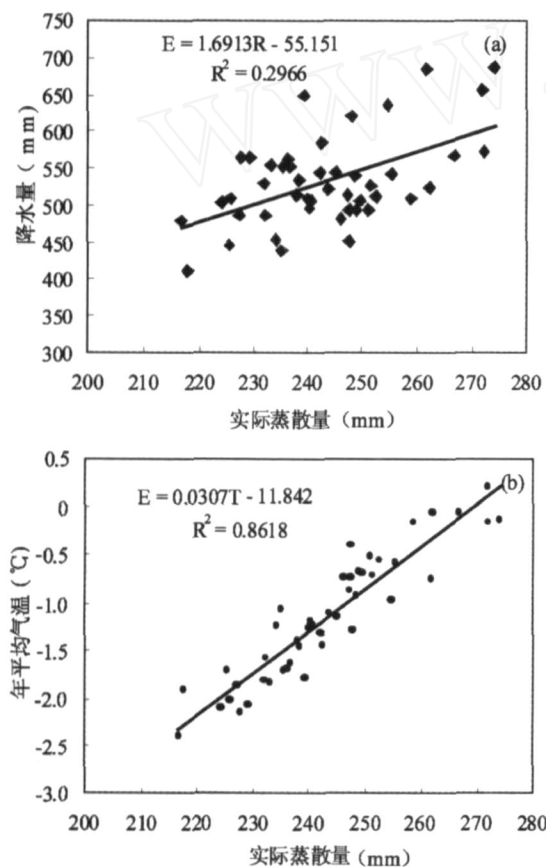


图 3 实际蒸散量与降水量 (a)和年平均气温 (b)的关系

### 2.2 1987年以来土壤湿度的变化特征

由于甘德气象站气象资料从 1970年开始,年代短,但该站处在上述 4个站的中部,故上述的基本气候变化特征可代表甘德气象站,同时甘德气象站自 1987年开始在植物生长季进行了土壤湿度的观测。为此,采用该站的土壤湿度和植被生产量来分析黄河源区土壤湿度和植被生产量的变化特征。1987 - 2005年甘德牧业气象观测场每年 4月 28日 - 10月 8日观测的 0 - 60cm平

均土壤湿度见图 4,为便于比较,同时给出了同期的降水量平均值。

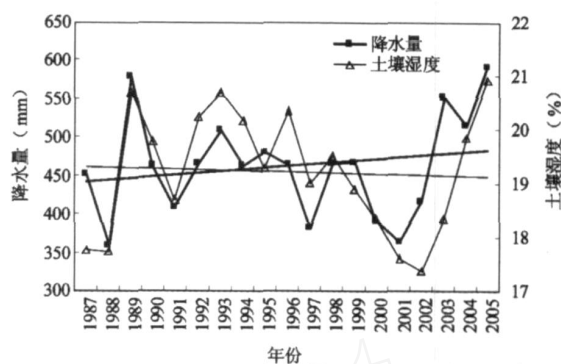


图 4 植物生长期 0 - 60cm 平均土壤湿度 ( $S_t$ ) 和降水量 ( $R$ ) 的年际变化

经分析,每年 4月 28日 - 10月 8日的平均土壤湿度 ( $S_t$ )与同期降水量 ( $R$ )具有显著的正相关 ( $S_t = 34.562R - 205.49, n = 19, r = 0.6247, P < 0.01$ ),表明土壤湿度依降水量而变。但是,20世纪 80年代以来,与全球温度上升一样,甘德地区也存在明显的升温,温度升高导致蒸散量明显加剧,致使土壤湿度下降明显。从图 4可以看到,1987 - 2005年,在时间进程中降水量基本在多年平均值上下波动,并略有升高的趋势,而同期土壤湿度则略有下降 ( $S_t = -0.0447t + 19.539, n = 19, r = -0.2171$ )。虽然两者变化趋势均不显著(未通过 0.05 水平的显著性检验),但不同的变化趋势表明在气候温暖化状况下,土壤蒸发量远大于降水的补给量,土壤在向暖干化方向发展。

### 2.3 1990年以来植被地上净初级生产力的变化特征

1990年以来甘德气象站进行了草甸植被生物量的监测,结果见图 5。由图可见,该站 1990 - 2004年植被净初级生产力 (NPP)年际波动明显,且具有极显著的下降趋势 ( $n = 15, r = -0.6210, P < 0.01$ ),下降的倾向率为  $9.506\text{g}/(\text{m}^2 \text{a})$ 。

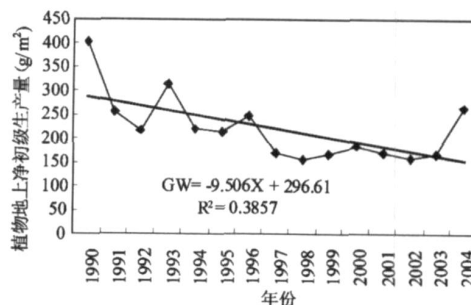


图 5 1990 - 2004年黄河源区甘德站植被净初级生产力变化

### 3 结论与讨论

近半个世纪以来黄河源区的气温升高的倾向率为  $0.0284 \text{ } ^\circ\text{C/a}$ ,而年降水量的变化趋势不明显,属正常的

气候稳定性变化范围。气温和降水量变化造成下垫面蒸散量发生明显变化,1959-2005年蒸散量变化与降水的趋势相反,表现出明显增加的趋势,上升的倾向率为 $0.7315\text{mm/a}$ 。由计算公式本身可知,植被蒸散量主要受当地年降水量和年平均气温的双重影响,相关分析结果显示,气温升高的影响更大一些,说明气候在向温暖化发展的同时,下垫面蒸散有加大的趋势,土壤可能向干燥化方向发展。甘德气象站1987年以来土壤湿度观测结果证明了这一点。

水分条件不足造成当地气候生产力水平下降,据对1990年以来植被地上净初级生产力的观测,近十几年内植被地上净初级生产力下降明显,在时间进程中按 $9.506\text{g}/(\text{m}^2\text{a})$ 的倾向率下降,而且这种下降趋势与时间序列相关显著。可见,在目前这种气候趋势下,对广泛分布于黄河源区的高寒草原和高寒沼泽草甸植被生长等有不利的影 响,气温升高,尤其是夏季气温升高将使蒸发强度增大,相同时期降水量没有增加甚至减少,将造成植被因干旱而退化,沼泽草甸因干旱而疏干,湿生草甸植被向中旱生植被演替。

#### 参考文献:

- [1]钟永德,李迈和, Norbert K 全球暖化促进植物迁移与入侵[J]. 地理研究, 2004, 23(3): 347-356
- [2]Williams JW, Webb T, Richard PH, et al Late quaternary biomes of Canada and the eastern United States[J]. Journal of Biogeography, 2000, 27(3): 585-607.
- [3]Zavaleta ES, Shaw MR, Chiarillo NR, et al Additive effects of simulated climate changes, elevated  $\text{CO}_2$ , and nitrogen deposition on grassland diversity[J]. PNAS (Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America), 2003, 100: 7650-7654.
- [4]IPCC. Climate Change 2001: The scientific basis[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 881.
- [5]杨建平,丁永建,沈永平,等.近40年来江河源区生态环境变化的气候特征分析[J].冰川冻土, 2004, 26(1): 7-16
- [6]沈永平,王根绪,吴青杨,等.长江—黄河源区未来气候情景下的生态环境变化[J].冰川冻土, 2002, 24(3): 308-314.
- [7]贺庆棠.中国森林气象学[M].中国林业出版社, 2001: 212-241.
- [8]樊启顺,沙占江,曹广超,等.气候变化对青藏高原生态环境的影响评价[J].盐湖研究, 2005, 13(1): 12-18
- [9]高桥浩一郎.用月平均气温、月降水量估算蒸发量的经验公式[J].天气, 1979, 26(12): 29-32
- [10]欧阳海,郑步忠,王学娥,等.农业气候学[M].气象出版社, 1990, 174-220.
- [11]Thomthwaite CW. An approach toward a rational classification of climate[J]. Geogra Review, 1948: 38
- [12]Penman HL. Natural evaporation from open water, bare soil and grass[J]. Proc. of royal society of London, 1948: 193.
- [13]Allen RG, Pereira LS, Raes D, et al FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) [M]. Rome: FAO, 1998
- [14]周广胜,张新时.自然植被第一性生产力模型初探[J].植物生态学报, 1995, 19(3): 193-200.

## 2006年本刊评价指标

CNKI 中国知识资源总库		编号: CAJ-SR 2007Z BJ1400								
<b>中国学术期刊综合引证年度报告(2007)</b>										
('2007 Chinese Academic Journal Comprehensive Citation Annual Report)										
期刊名称: 中国农业气象										
主办单位: 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所										
标准刊号: ISSN 1000-6362 CN 11-1999/S										
类名名称: 农业科学\综合(NK1.1)										
计量指标统计表:										
总被引 频次	影响因子	5年 影响因子	即年指标	他引 总引比	被引 期刊数	被引 半衰期	2006 基金 论文量	Web 下载率	即年 占指数 (CN)	
694	1.042	1.099	0.094	0.76	182	5.9	85	0.84	24.2	10

上表所列本期刊的各项计量指标是中国科学文献计量评价研究中心和中国学术期刊电子杂志社根据《中国学术期刊综合评价数据库(CAJCD)》2006年6500余种统计刊源析出的290余万条中国期刊引文数据及CNKI“中国期刊网”中心网站2006年1-12月全文下载记录(2.1亿余篇次)的大样本数据统计分析得到的。