

黄河源区径流减少的原因探讨

周德刚^{1,2} 黄荣辉¹

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

2 中国科学院研究生院, 北京 100093

摘 要 分析了黄河源区 1960~2000 年气候变化特点, 对蒸发进行了估算, 并分析了植被和冻土的变化, 对径流在 20 世纪 90 年代后明显减少的原因进行了探讨。结果表明, 黄河源区气温在 20 世纪 80 年代中期后明显增加, 降水在 90 年代偏少, 气候向暖干方向发展, 但蒸发变化不大, 径流减少的直接原因是降水的减少; 在 90 年代后降水强度的减弱也可能是径流减少的重要原因; 归一化植被指数 (NDVI) 数据显示植被在 90 年代后期呈现退化的趋势, 冻土在 80 年代以后表现出的明显的退化趋势, 植被冻土的退化可以使得冻结层上水位下移, 土壤水向土壤下层的渗漏增加, 也会造成径流的减少。

关键词 气候变化 径流 黄河源区 植被 冻土

文章编号 1006-9585 (2006) 03-0302-08 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Exploration of Reason of Runoff Decrease in the Source Regions of the Yellow River

ZHOU De-Gang^{1,2} and HUANG Rong-Hui¹

1 *Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093*

Abstract The characteristic of climatic variation in the source regions of the Yellow River during 1960—2000 is analyzed, the evapotranspiration of the source regions is estimated, and the variations of vegetation and frozen soil are studied, then the reason of runoff obvious decrease after the 1990s is explored. The results indicate that air temperature in the source regions of the Yellow River has increased evidently since the mid 1980s, and the mean precipitation after 1990 in this area is lower than before. Climatic variation has a warming and drying trend. The estimation of evapotranspiration shows that evapotranspiration in the source regions varies inapparently, so the direct reason of runoff decrease is the reduction of precipitation. The intensity of precipitation weakens after the 1990s. This may be another important reason of runoff decrease. The variation of normal different vegetation index (NDVI) in the source regions shows vegetation has a deteriorating trend in the late 1990s. Frozen soil is degenerating seriously since the 1980s and the upper limit of frozen soil is descending gradually, while the lower limit of frozen soil is ascending. The degeneration of vegetation and frozen soil may cause water level of frozen crust descent, and water in near surface soil leakage into lower soil, which may also influence runoff to decrease.

Key words climatic variation, runoff, source regions of the Yellow River, vegetation, frozen soil

收稿日期 2006-03-20 收到, 2006-04-18 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要创新项目 KZCX3-SW-218

作者简介 周德刚, 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要从事气候与生态环境以及水文变化的研究。E-mail: degangzhou@163.com

1 引言

黄河源区在水文上指黄河流域在唐乃亥断面以上的集水区域,位于青藏高原东北部,其间群峦叠嶂,海拔大部在 3 000 m 以上,源区集水面积为 $12.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,只占黄河流域面积的 15%,但多年平均径流量却占到黄河总径流的 1/3 以上,是黄河重要的产水区,被形象称为“黄河水塔”。随着我国干旱化趋势的加剧,黄河中下游水资源短缺频频告急,尤其是在 20 世纪 90 年代以来黄河上游(特别是源区)径流大幅减少^[1,2],造成黄河中下游用水供需矛盾愈加突出,严重影响了黄河流域的经济发展。因此,研究黄河源区水资源变化的原因,对于合理开发利用黄河流域水资源及南水北调工程的实施有着十分重要的意义。

最近,有些学者对黄河上游及源区的气候变化特点及对径流的影响进行了研究,这些研究表明,气温在 80 年代以后为明显增加的趋势,而降水在 90 年代偏少,但是径流在 90 年代有跳跃性的减少^[3~5]。但是,对径流减少的主要原因存在着不同的观点,如张士锋等^[3]认为气温增加将导致蒸发增加,从而导致径流减少;也有观点认为,降水的减少是径流减少最主要、最直接的原因^[4,5];此外,还有观点综合认为是由于气候变化,草场退化和人类活动等共同的作用造成的^[6]。上述这些研究多采用相关分析的方法来探讨径流与气候因子之间的关系,很少从系统能量和水文平衡的角度来进行分析。基于此,本文将从系统的能量和水分平衡的观点来分析黄河源区气候、水文、生态和冻土环境整个系统的变化和它们之间的相互作用,从而来初步探讨源区径流减少的原因。

2 黄河源区气候与水文年代际变化之间的关系

2.1 黄河源区降水和气温的年代际变化

本文所用的气象资料为黄河源区 1951~2000 年常规气象观测资料,观测站点包括有泽库、玛多、中心站、达日、红原、若尔盖、玛曲、郎木

寺、兴海、同德、久治及河南站一共 12 个测站,气象要素包括有降水、气温、风速、日照时数和相对湿度,并且考虑有些测站在 50 年代缺测较多,故观测时间统一选取为 1960~2000 年。

首先对源区各站点观测的气温、降水和风速等气象要素取区域变化,之后再行年平均,这样可得到各要素的年平均变化(见图 1)。图 1a 为气温的变化,可以看到黄河源区气温在 20 世纪 80 年代初中期以后存在明显的升高趋势,气温在 41 年来平均线性趋势为 $0.21 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,这和谢昌卫等^[7]的结果是一致的;并且,从各季节来看,黄河源区气温在春季变化不明显,而夏、秋、冬季温度在近 40 年来存在明显的升高,特别是在秋冬两季。黄河源区年平均降水量变化如图 1b 所示,降水量在 20 世纪 60~70 年代趋于正常(虽然在 70 年代初偏少),在 80 年代降水偏多,到了 90 年代,降水又偏少,90 年代以后平均值较以前相对减少了 6.2%,有较明显的减少,但是对降水序列做均值突变检验,降水并没有发生明显的变化趋势;从各季节来看,降水在冬季明显增加,春季变化不大,夏、秋季在 80 年代末以来有减少的趋势。黄河源区平均风速无论是在年平均还是各季节上都存在明显的年代际变化,如图 1c 所示,黄河源区风速在 60 年代中期偏小,到 60 年代后期之后风速突然增加,此后风速呈现逐渐减弱的趋势,线性减小趋势为 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

此外,黄河源区年平均相对湿度也没有明显的变化趋势(图略),从各季节来看,冬、春季的相对湿度有增加的趋势,而秋季呈现明显的减小的趋势;日照时数在夏、秋、冬季存在增加的趋势,冬季增加趋势明显,而春季则存在减弱的趋势,其年平均变化在 60 年代初偏少,在 90 年代有增加的趋势(图略)。

从以上分析可以看到,黄河源区的气温 20 世纪 80 年代中期以来明显增加,降水在 90 年代偏少,风速在 60 年代末以后呈减弱趋势,气候变化总体向暖干方向发展。

2.2 黄河源区径流的年代际变化及其与气候因子的相关关系

黄河源区水文观测的径流资料显示,在 1990 年以后径流发生了明显的跳跃现象^[8],以唐乃亥

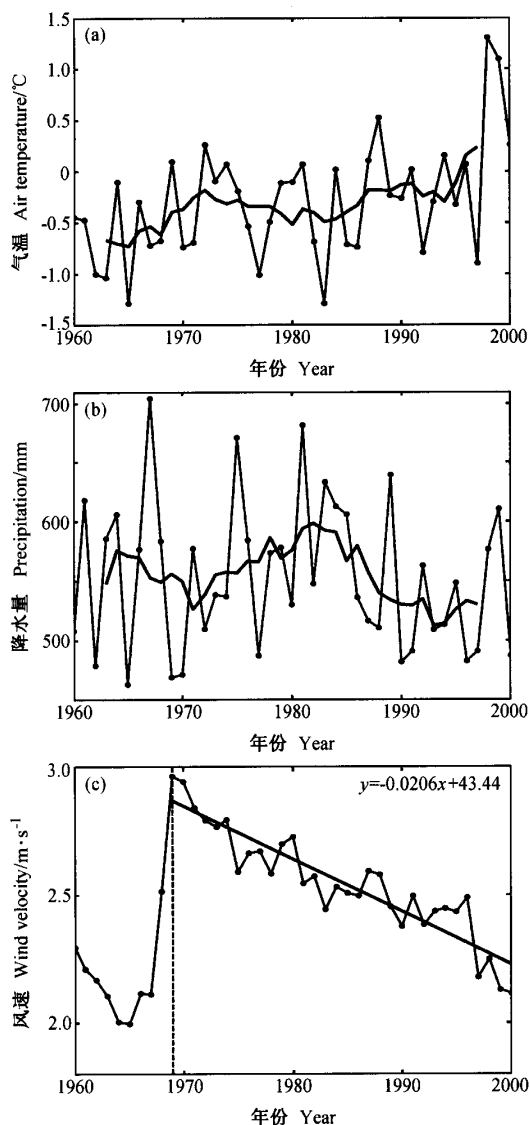


图1 黄河源区平均的 (a) 年平均气温、(b) 年降水量和 (c) 年平均风速的年际变化。(a) 和 (b) 中粗实线表示 7 年滑动平均

Fig.1 Interannual variation of (a) annual mean air temperature, (b) annual precipitation and (c) annual mean wind in the source regions of the Yellow River. Bold lines in (a) and (b) mean 7-point smooth

站的径流为例, 90 年代后平均径流较以前减少了 21%, 径流减少的幅度相对降水更为明显。如果以唐乃亥站径流代表源区总的径流, 与源区同期的平均降水作相关, 如图 2 所示: 两者相关系数达 0.849, 通过了 0.001 的信度检验, 这说明了降

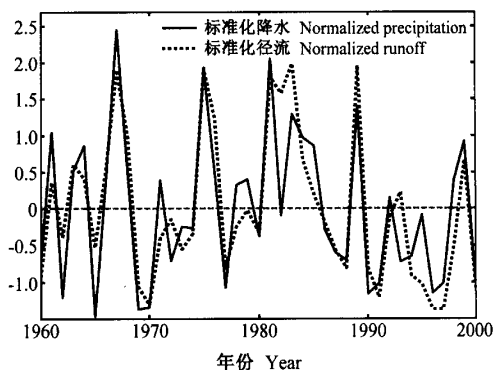


图2 黄河源区径流与降水的相关关系

Fig.2 The correlation between runoff and precipitation in the source regions of the Yellow River

水和径流之间有密切的关系。如果分年代来看的话, 径流与降水的相关系数在 60 年代最好, 之后它们的相关系数逐渐减小, 到 90 年代也达到了 0.71。源区平均气温和径流的相关关系不是很明显, 未能通过 0.1 的信度检验。这意味着在源区降水是影响径流变化最直接的因子, 降水的多少直接影响径流的变化, 这与黄荣辉等^[8]的研究结果相同。然而, 在 2.1 节中的分析可以看到黄河源区在 20 世纪 90 年代降水只减少了 6.2%, 却为何造成径流减少 21%, 这是值得进一步探讨的问题。为此, 下面从蒸发、降水强度、生态和冻土等因子来分析此问题。

3 蒸发的年代际变化

蒸发既是水文平衡的重要变量, 又是地面能量交换过程中的重要环节, 它受气象条件以及下垫面条件的综合作用, 是一个复杂的水分输送过程。与源区气候和径流变化的研究相比, 对源区蒸发的研究相对很少, 气候变暖对源区蒸散发的影响也还存在着较大的分歧, 李林等^[9]和张士锋等^[3]认为随着黄河源区气候的变化, 蒸散量呈现逐年增加的趋势。但是, 邱新法等^[10]对黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的变化分析表明, 虽然气温增加, 蒸发皿蒸发量在黄河上游和下游区域却呈现下降趋势。由于这两种观点存在着明显的差别, 为此, 本研究采用 FAO Penman-Monteith 方法^[11]对蒸发进行估算, 方程如下:

$$E_{T_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, \quad (1)$$

式中, $R_n = R_{ns} - R_{nl}$, R_{ns} 为净短波辐射, R_{nl} 为净长波辐射, 由下式计算:

$$R_{nl} = \sigma(T+273)^4(0.1 + 0.9n/N)(a + b\sqrt{e_a}), \quad (2)$$

式中 a 、 b 为与辐射有关的参数。一般取 $a = 0.34$, $b = 0.14$, e_a 的单位为 kPa。但是在高原上, 大气逆辐射小于平原地区, 仅为平原地区的 50% ~ 70%^[12], 如果参考拉萨的辐射状况, 取 $a = 0.417$, $b = 0.052$, e_a 的单位为 hPa, 利用黄河源区气温、风、湿度、日照时数等气候资料进行计算, 计算结果同原始的计算方案进行对比, 如图 3 所示, 两种方法在年代际变化趋势上有很好的—

致性。从图 3 可以看到, 蒸发在 20 世纪 60 年代中期前较小, 70 年代初较大, 此后变化相对平稳, 在 90 年代略有增加的趋势。对比两种估算结果的大小, 图 3b 估算的蒸发更接近源区降水与径流深之间的差值, 这表明图 3b 的结果比较合理。虽然黄河源区气温在 90 年代明显增加了, 但源区的风速在减弱, 气候系统变化总的作用使得蒸发变化不大, 因而径流的变化将直接依赖于降水量的变化。

以上分析可以看到, 黄河源区的蒸发在 20 世纪 90 年代并没有明显增强, 因此, 蒸发变化并不是黄河源区径流减少的原因。

4 降水强度的变化及其对径流的影响

降水是水文过程中最重要的因子之一, 不仅降水量的多少可以影响其他水文过程, 降水强度的变化也会影响水文过程的分配。在前面已经分析了降水量与径流的关系, 指出黄河源区的径流很大程度依赖于降水。但是在 90 年代源区降水并没有明显减少, 为何却造成径流明显减少, 这可能是由于能够造成径流的较强降水频率减少所致, 为此本节进一步分析黄河源区降水强度的变化。考虑到黄河源区冬季降水较少, 大部分降水集中在 3~10 月, 故本研究把降水的时间选取为每年的 3~10 月, 并参照日降雨强度的定义, 把降水的强度分为弱降水(日降水量小于 10 mm)、中等强度降水(日降水量在 10~25 mm 之间)和强降水(日降水量大于 25 mm)3 类。区域平均下, 不同强度降水发生天数的年代际变化如图 4 所示。从图 4 可以看到, 弱降水的天数在 90 年代同 80 年代相比没有明显的变化, 但是中等强度降水和强降水的天数从 90 年代以后均有较大程度的减少, 特别是强降水减少的更为明显。如果把降水时间选取在 6~9 月, 中等强度和强降水的天数从 90 年代后都存在明显减弱的趋势。因此, 无论在汛期或是全年, 黄河源区降水的强度均有减弱的趋势, 特别是强降水的次数明显减少。

一般来说, 在降水过程中, 当降水强度减弱时, 地表直接径流出现的时间变长, 形成地表直接径流的比例也减少, 甚至不会形成地表径流,

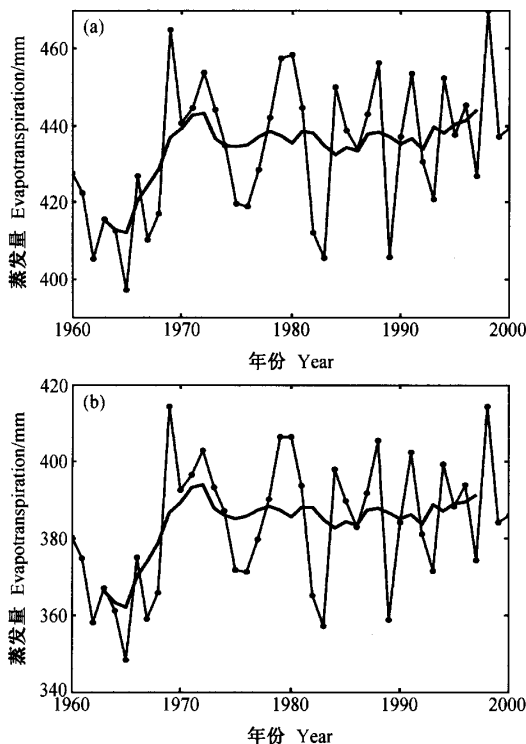


图 3 (a) FAO Penman-Monteith 方法和 (b) 对长波辐射参数修改后的该方法对黄河源区蒸发的估算。粗实线意义同图 1a

Fig. 3 (a) Estimate of the evapotranspiration in the source regions of the Yellow River with FAO Penman-Monteith method and (b) with same method but with the revised longwave radiation references. Bold line as in Fig. 1a

更多的降水将入渗到土壤中去。因而, 黄河源区降水强度的降低可能是黄河源区年径流和汛期径流明显减少的一个重要原因。

5 黄河源区生态、冻土环境变化及其对径流的影响

5.1 黄河源区植被的变化趋势

黄河源区在 20 世纪 90 年代以来生态严重恶化, 如黄河源区鼯鼠对土壤和植被大肆破坏, 使得许多草原上鼠洞遍布, 这会增加土壤表面的积水容量, 从而在降水过程中, 地表出现积水后不能马上形成径流, 可以造成直接径流减少。近几年通过卫星遥感影像资料对比研究^[13]表明, 近十多年来黄河源区高寒草地生态系统已严重退化。杨建平等^[14]利用归一化植被指数 (NDVI) 资料分析了达日以上区域的植被变化, 指出在源头区 NDVI 显著减小, 在达日植被活动性增加明显。为了分析植被在时间上的连续变化, 这里选取 8 km 分辨率从 1982~2001 年之间的 Pathfinder NOAA-AVHRR/NDVI 数据, 对黄河源区植被的变化进行分析。

NDVI 是表征植被生长状态和植被空间分布密度的指示因子。根据牧业气象观测和 NDVI 数值在年内的变化, 把植被的生长期定义在每年的 5~10 月, 对于 1994 年 9~10 月缺损的数据用前后两年的值平均来代替, 这样可得 20 年来 NDVI 平均值的分布。如图 5a 所示, NDVI 在东南方向值较大, 最大值在玛曲、若尔盖和久治一带, 而在源头区 NDVI 值很小。如果用 1997~2001 年的 NDVI 平均值减去 1982~1986 年的 NDVI 的平均值来表示植被的变化状况, 则可得黄河源区植被的变化趋势。如图 5b 所示, 在源头区以及在源区的东北方向兴海和唐乃亥一带植被呈退化趋势, 而在达日以下的东南大部分区域植被活动性有增加的趋势。由于在源头区 NDVI 值很小, NDVI 的减小意味着在源头区植被呈现明显的退化趋势, 在达日以下的区域 NDVI 值较大, NDVI 增加的趋势相对来说没有源头区植被退化的速度明显。对源区 NDVI 取区域平均, 则区域平均的 NDVI 变化曲线如图 5c 所示, NDVI 在 1993 和 1994 年较大, 之后呈现出减小的趋势。植被的退化一方

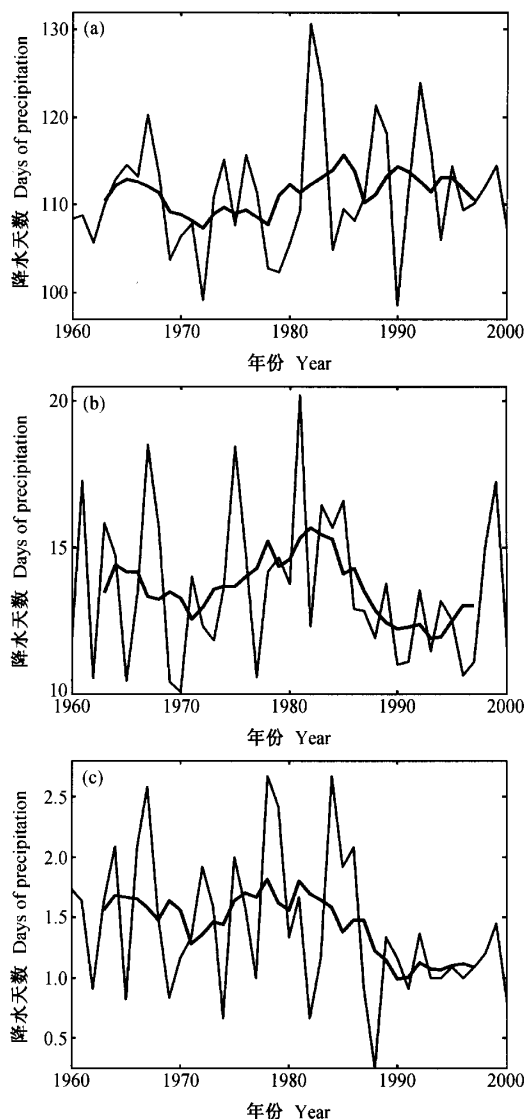


图 4 (a) 弱、(b) 中等强度和 (c) 强降水年发生次数的变化。粗实线意义同图 1a

Fig. 4 (a), (b) and (c) are the variation of days of annual small, middle and strong precipitation, respectively. Bold lines as in Fig. 1a

面可能使得土壤蒸发能力增加, 另一方面也可以造成冻土的退化, 从而影响水文过程的变化。

5.2 黄河源区冻土层的变化趋势

第 2 节的分析表明了黄河源区的气温在 20 世纪 80~90 年代有明显的增加, 增温幅度超过 1.0°C , 这就可能使此区域的冻土层发生变化。为此, 本研究对黄河源区冻土层的变化趋势进行

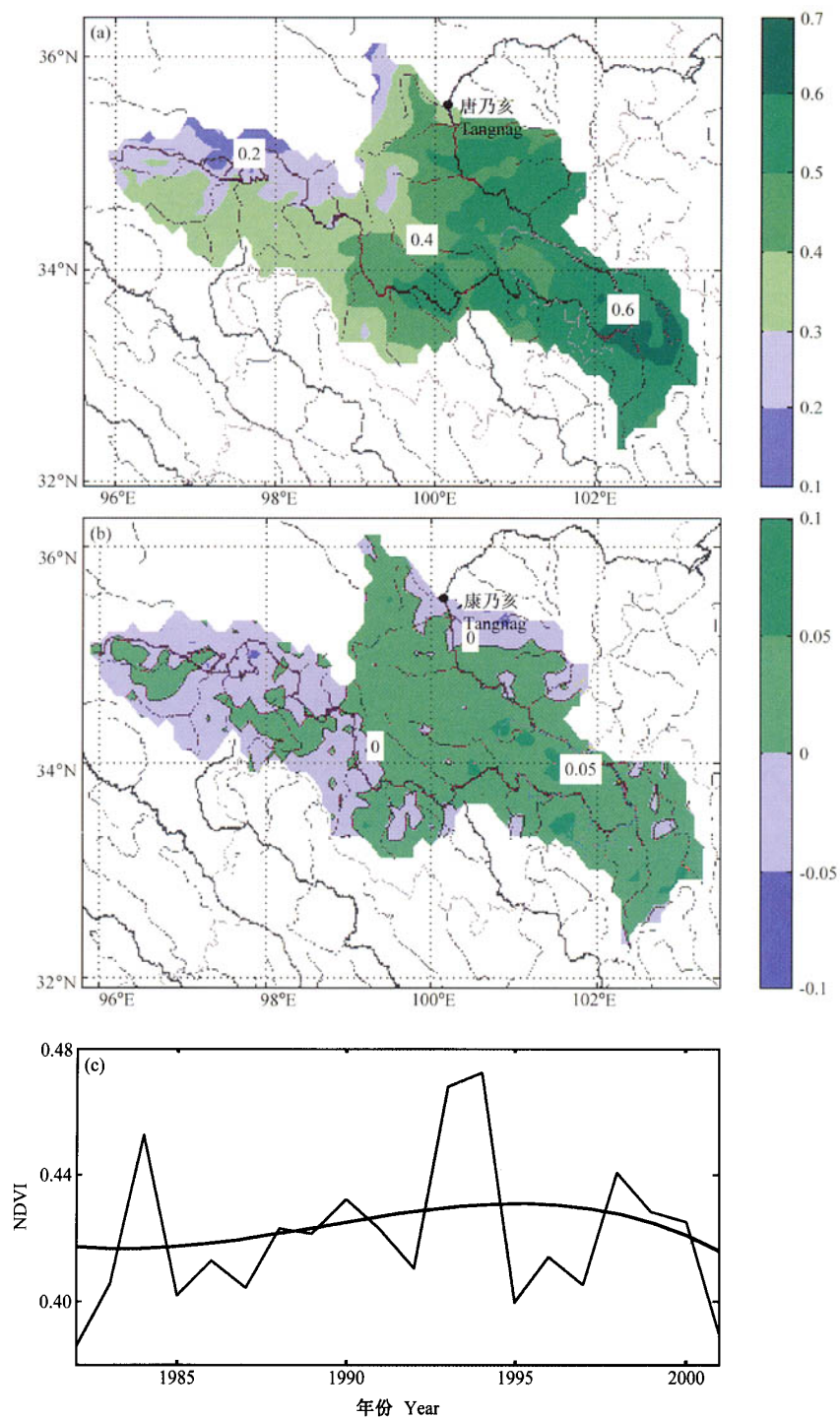


图 5 (a) 黄河源区近 20 年平均的 NDVI 分布和 (b) 1997~2001 年平均的 NDVI 相对 1982~1986 年平均的变化以及 (c) 区域平均的 NDVI 近 20 年的变化。(c) 中粗实线表示 3 次样条拟合

Fig. 5 (a) The distribution of mean NDVI in recent 20 years in the source regions of the Yellow River, (b) the variation of mean NDVI in 1997—2001 relative to mean NDVI in 1982—1986 and (c) the variation of mean NDVI over the source regions. Bold line in (c) is cubic spline fit curve

分析。从图 6 所示的达日和玛曲站的冻土深度年代际变化可以看到, 80 年代以来, 达日和玛曲最大冻土深度正在不断减小 (分别见图 6a 和 6b), 以 1~3 月的变化最为明显, 平均每 10 年冻土深度变浅 11 cm 左右; 在 4 月, 玛曲站的冻土上层的位置存在明显下移的趋势 (见图 6c), 每 10 年

冻土上层下移 6.7 cm。由于最大冻土深度的不断变浅和冻土上层位置的下移, 使得多年冻土层变薄, 甚至多年冻土层消失, 季节性冻土层变厚。由于冻土层上层位置的下移, 这就使得冻结层上方的水位下移。其结果是, 一方面可以造成土壤水向土壤深处渗漏, 从而导致径流减弱; 另一方面, 原来冻结层上水埋藏较浅的沼泽草甸区由于水位的下移, 会造成上方植被相继退化, 这就造成土壤蒸发能力增加, 这种变化也可以导致径流减少。这些有待于通过数值模式作进一步的研究。

6 结论和讨论

本文针对黄河源区径流自 20 世纪 90 年代以来明显减少的现象, 分析了黄河源区气候和植被冻土的变化, 初步探讨了黄河源区径流减少的原因。黄河源区降水量在 60~70 年代为正常, 在 80 年代偏多, 90 年代又偏少; 气温从 80 年代中期之后明显增加; 风速在 60 年代后期以来呈现减弱的趋势。本文利用经验公式对黄河源区的蒸发进行估算, 表明了黄河源区蒸发值变化不大, 因而源区径流量的变化直接取决于降水量的变化。黄河源区降水强度从 90 年代初之后明显减弱, 这可能是径流减少的重要原因; 另外黄河源区植被呈现退化和冻土层呈现下移的趋势, 这可能使得蒸发能力增加, 以及土壤水向土壤深处的渗漏增加, 从而造成径流减少。

这里应指出, 陆面实际蒸散发过程是一个非常复杂的过程, 本文对蒸发的估算代表的是参考作物的蒸散量, 定性表征了蒸发的变化趋势, 而源区陆面实际蒸散发的变化状况如何? 还有待于通过数值模式结合实际观测来模拟。影响径流减少的因子很多, 它们对径流减少的影响不一, 其过程是一个非常复杂的过程, 这还有待于通过一个包含有气候、植被和水文过程的模式作进一步的模拟分析。

致谢 感谢王澄海老师为本文提供黄河源区冻土数据资料。

参考文献 (References)

- [1] 韩添丁, 叶柏生, 丁永建. 近 40 a 来黄河上游径流变化特

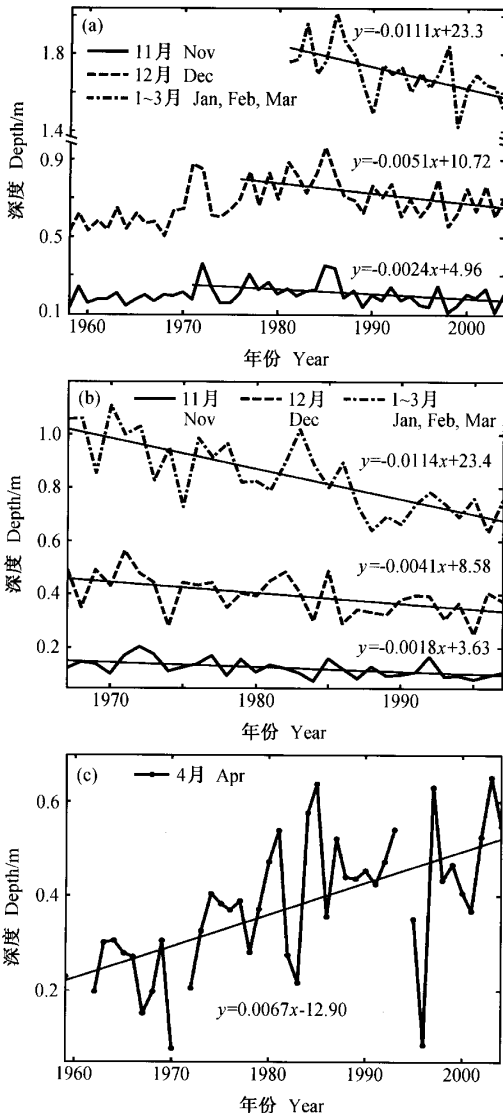


图 6 黄河源区 (a) 达日和 (b) 玛曲站冻土下限的变化趋势以及 (c) 玛曲在 4 月冻土上限的变化趋势

Fig. 6 (a), (b) are the variation of lower limit of frozen soil in Dagri and Maqu station in the source regions of the Yellow River, respectively, (c) is the variation of upper limit of frozen soil in April in Maqu

- 征研究. 干旱区地理, 2004, **27**: 553~557
- Han Tianding, Ye Baisheng, Ding Yongjian. Study on the change of streamflow in the upper reaches of the Yellow River in recent 40 years. *Arid Land Geography* (in Chinese), 2004, **27**: 553~557
- [2] 钱云平, 林银平, 金双彦, 等. 黄河河源区水资源变化分析. 水利水电技术, 2004, **35**: 8~10
- Qian Yunping, Lin Yinping, Jin Shuangyan, et al. Analysis of water resources changes in the source of the Yellow River. *Water Resources and Hydropower Engineering* (in Chinese), 2004, **35**: 8~10
- [3] 张士锋, 贾绍凤, 刘昌明, 等. 黄河源区水循环变化规律及其影响. 中国科学 (E 辑), 2004, **34**: 117~125
- Zhang Shifeng, Jia Shaofeng, Liu Changming, et al. The variation and its effects of water circulation in the source regions of the Yellow River. *Science in China (Ser. E)* (in Chinese), 2004, **34**: 117~125
- [4] 张国胜, 李林, 时兴合, 等. 黄河上游地区气候变化及其对黄河水资源的影响. 水科学进展, 2000, **11**: 277~283
- Zhang Guosheng, Li Lin, Shi Xinghe, et al. Climatic changes over the upper Yellow River and its effects on water resources. *Advances in Water Science* (in Chinese), 2000, **11**: 277~283
- [5] 蓝永超, 丁永建, 沈水平, 等. 气候变化对黄河上游水资源系统影响的研究进展. 气候变化研究进展, 2005, **1**: 122~125
- Lan Yongchao, Ding Yongjian, Shen Yongping, et al. Review on impact of climate change on water resources system in the upper reaches of Yellow River. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, **1**: 122~125
- [6] 王昭, 陈德华. 影响黄河源区径流变化的因素分析. 水文地质工程地质, 2001, **3**: 35~37
- Wang Zhao, Chen Dehua. Analysis of the factors affecting runoff change in the source regions of Yellow River. *Hydrogeology and Engineering Geology* (in Chinese), 2001, **3**: 35~37
- [7] 谢昌卫, 丁永建, 刘时银. 近 50 年来长江—黄河源区气候及水文环境变化趋势分析. 生态环境, 2004, **13**: 520~523
- Xie Changwei, Ding Yongjian, Liu Shiyin. Changes of weather and hydrological environment for the last 50 years in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers. *Ecology and Environment* (in Chinese), 2004, **13**: 520~523
- [8] 黄荣辉, 韦志刚, 李锁锁, 等. 黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响. 气候与环境研究, 2006, **11** (3): 1~14
- Huang Ronghui, Wei Zhigang, Li Suosuo, et al. Interdecadal variability of climate and hydrology in the upper reach and source regions of the Yellow River and its impact on water resource in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), **11** (3): 1~14
- [9] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因子研究. 气象, 2000, **26** (2): 6~10
- Li Lin, Zhang Guosheng, Wang Qingchun, et al. Dry climate impact on evapotranspiration in the upper valley of the Yellow River. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2000, **26** (2): 6~10
- [10] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征. 自然资源学报, 2003, **18**: 437~442
- Qiu Xinfu, Liu Changming, Zeng Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River basin. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 2003, **18**: 437~442
- [11] 毛飞, 张光智, 徐详德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较. 应用气象学报, 2000, **11**: 128~136
- Mao Fei, Zhang Guangzhi, Xu Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2000, **11**: 128~136
- [12] 季国良, 江灏, 吕兰芝. 青藏高原的长波辐射特征. 高原气象, 1995, **14** (4): 451~458
- Ji Guoliang, Jiang Hao, Lü Lanzhi. Characteristics of longwave radiation over the Qinghai-Xizang plateau. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1995, **14** (4): 451~458
- [13] 李道峰, 刘昌明. 黄河源区近 10 年来土地覆被变化研究. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2004, **40**: 269~275
- Li Daofeng, Liu Changming. Study on land-cover change of the source regions of the Yellow River basin in the past 10 years. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 2004, **40**: 269~275
- [14] 杨建平, 丁永建, 陈仁升. 长江黄河源区高寒植被变化的 NDVI 记录. 地理学报, 2005, **60**: 467~478
- Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng. NDVI reflection of alpine vegetation changes in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2005, **60**: 467~478