

文章编号: 1673-1719 (2011) 05-0357-06

# 降水变化和人类活动对延河流域 径流影响的定量评估

邱临静<sup>1,2</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 尹润生<sup>3</sup>, 俞方圆<sup>4</sup>

(1 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100; 2 中国科学院 - 水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 3 Department of Forestry, Michigan State University, East Lansing 48824, USA; 4 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 利用 Mann-Kendall 突变检验法对延河流域 1952—2008 年降水量与甘谷驿站径流量进行分析, 并以 1952—1994 年为基准期, 定量分析 1995—2008 年降水变化和人类活动对径流的影响。结果表明: 57 年来延河流域正常降水发生概率达 80.7%, 径流年型以偏枯和枯水年为主; 年降水量和径流量均呈减少趋势; 突变分别发生在 1995 和 2005 年; 与 1952—1994 年相比, 1995—2008 年的降水量和径流量较基准期分别减少 11.1% 和 27.3%; 降水变化和人类活动对径流减少的贡献率分别为 46.2% 和 53.8%。

**关键词:** 延河流域; 径流; 降水; 人类活动; 影响

中图分类号: P344 文献标识码: A

## 引言

降水变化和人类活动是影响径流的主要因素。全球变暖加快了区域的水循环, 使降水的频率和强度发生变化, 从而影响径流过程<sup>[1-2]</sup>。有研究表明, 黄河流域大多数观测站点的降水量有明显的减少趋势<sup>[3]</sup>, 且降水减少引起径流量的时空变化<sup>[4]</sup>。同时, 人类活动对下垫面的改造, 包括土地利用变化、水利建设及水土保持措施的实施等, 皆对流域水循环过程和径流变化产生影响; 再者, 区域用水量的增加, 也会改变流域水文过程<sup>[5-6]</sup>。在降水变化和人类活动的共同作用下, 黄河流域水资源供需关系日益紧张。因此, 区分二者的水文效应是解决水资源供需失衡的必要前提。目前, 定量分析环境变化的水文效应, 主要采用流域对比、水文模型及时间序列分析法, 其中时间序列分析法以其简单、易操作的

优点广泛应用于环境效应的评估中<sup>[7]</sup>。刘昌明等<sup>[8]</sup>研究了 1956—2000 年黄河干流的径流量, 结果表明: 降水变化对黄河上游径流量减少的影响占 75%, 而人类活动仅占 25%; 但在黄河中游降水作用占 43%, 人类活动占 57%。李志等<sup>[7]</sup>研究了 1972—2000 年黑河流域(泾河支流)径流量的变化, 发现降水变化和人类活动对 1993—2000 年径流减少的贡献率分别为 24% 和 76%。以上研究表明, 径流对降水变化和人类活动的响应程度因地制宜。因此, 在特定区域开展针对性的研究对当地水资源的合理配置具有重要意义。

延河是黄河中游的一级支流, 是陕北黄土丘陵沟壑区的重要水源。本研究基于 Mann-Kendall 突变检验法, 分析延河流域 1952—2008 年气象水文要素的变化趋势, 探讨降水变化和人类活动对流域控制站甘谷驿站径流的影响, 以为延河流域水资源

收稿日期: 2011-04-18; 修回日期: 2011-06-04

资助项目: 科技部“973 计划”项目(2007CB407201); 农业部“948”项目(2010-S16)

第一作者: 邱临静(1982—), 男, 博士生, 主要从事流域水文水资源研究及水文过程模拟。通信作者: 郑粉莉, E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

的可持续利用提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 流域概况与资料来源

延河全长 284.3 km, 发源于陕西省靖边县天赐湾乡的周山, 流经志丹、安塞、延安和延长 4 县, 在延长县汇入黄河(图 1)。延河流域位于北纬 36°21' ~ 37°19', 东经 108°38' ~ 110°29', 海拔 495 ~ 1795 m, 平均海拔 1218 m, 年降水量为 506.7 mm, 年平均气温为 9.0 °C, 年蒸发量为 1000.0 mm<sup>[9]</sup>。土壤类型以黄土母质发育的黄绵土为主。植被类型在流域南部为辽东栎、刺槐和油松为主的森林带, 中部(延安至安塞)为柠条、狼牙刺和白羊草为主的草灌过渡带, 北部(安塞以北)为百里香和长芒草为主的草原带<sup>[10]</sup>。

本文所用降水数据来自陕西省气象局, 包括延安(1952—2008年)、志丹(1956—2008年)、靖边(1965—2008年)、安塞(1970—2008年)、延长(1956—2008年)的逐日资料。径流数据来自黄河水利委员会, 为流域控制站甘谷驿站(集水面积为 5891 km<sup>2</sup>) 1952—2008 年的逐月径流量。

### 1.2 研究方法

为了得到与延安站相同时间序列的降水数据, 利用线性回归法<sup>[11]</sup>用延安站气象数据插补其余气象站点所缺的历史资料, 延长这 4 个站点序列为 1952

—2008 年。本文采用泰森多边形法在 ArcGIS 9.3 平台下计算流域面降水量<sup>[12]</sup>, 下文简称降水量。根据年降水和年径流的距平百分率判定旱涝年和径流的丰枯特征, 其分级标准见表 1。利用 Mann-Kendall 突变检验法<sup>[3]</sup>检测降水和径流的变化趋势和突变。

表 1 降水和径流年型划分标准<sup>[13-14]</sup>

Table 1 Criteria for the classification of annual precipitation and streamflow<sup>[13-14]</sup>

| 降水年型 | 降水距平百分率 $R_p$         | 径流年型 | 径流距平百分率 $R_t$         |
|------|-----------------------|------|-----------------------|
| 涝    | $R_p > 50\%$          | 丰水   | $R_t > 20\%$          |
| 偏涝   | $25\% < R_p < 50\%$   | 偏丰   | $10\% < R_t < 20\%$   |
| 正常   | $-25\% < R_p < 25\%$  | 正常   | $-10\% < R_t < 10\%$  |
| 偏旱   | $-50\% < R_p < -25\%$ | 偏枯   | $-20\% < R_t < -10\%$ |
| 旱    | $R_p < -50\%$         | 枯水   | $R_t < -20\%$         |

为了区分降水变化和人类活动对河川径流的影响, 先用 Mann-Kendall 法检验降水量与径流量发生突变的年份, 将突变发生前的时期假定为基准期, 将突变后的时期作为研究期。然后, 利用双累积曲线法<sup>[15]</sup>来判定基准期的合理性, 若证实基准期假设成立, 则建立基准期年降水量与年径流量的线性回归方程, 利用所建立的回归方程模拟研究期的径流  $R_n$ , 可认为  $R_n$  相对于基准期实测径流的变化是该时期径流对降水变化的响应; 而径流对人类活动的响应值  $R_h$  用该时段实测径流  $R_m$  与模拟径流  $R_n$  的差值来表示。研究期总径流变化量  $R_t$  是该时段实测径流量与基准期实测径流量差值, 期间人类活动对径流变化的贡献率为  $R_h/R_t \times 100\%$ , 而剩余部分则为降水变化对径流变化的贡献率。

## 2 结果分析

### 2.1 延河流域 1952—2008 年降水与径流的变化特征

降水是延河径流的主要补给源, 受季风气候影响, 降水与径流年内分配极不均匀。从 1952—2008 年平均的月降水量和径流量的分配(图 2)可以看出, 降水与径流主要集中于汛期(6—9月), 最大降水量和径流量皆出现在 8 月, 分别占全年降水量

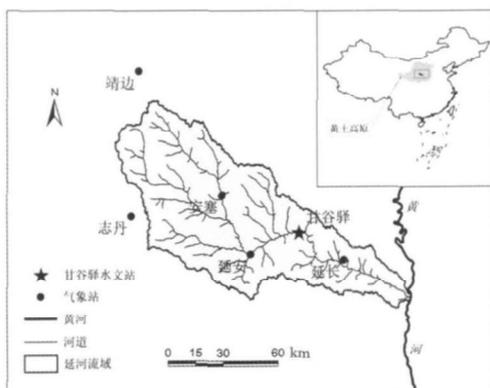


图 1 延河流域位置及气象水文站点分布图

Fig. 1 Geographic location of the Yanhe River basin and its meteorological and hydrological stations

和径流量的 22% 和 24%。延河流域 1952—2008 年期间多年平均降水量为 506.71 mm, 变差系数为 0.20 (表 2); 甘谷驿站多年平均径流量为 20578.41 万 m<sup>3</sup>, 变差系数为 0.36。由最大值和最小值可知, 降水和径流的极值比分别为 2.55 和 4.75。径流距平百分率有较大的年际变化, 变幅在 -48.6% ~ 144% 之间, 而降水的年际变化相对较小, 降水距平百分率在 -37.6% ~ 58.8% 之间 (图 3)。以上结果表明, 延河流域径流量较降水的年际变化大。

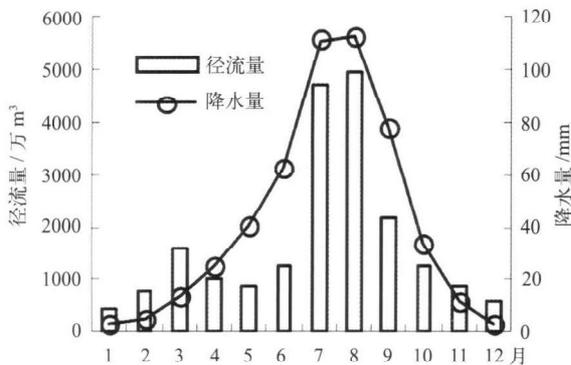


图 2 延河流域径流量和降水量的年内分配特征

Fig. 2 Monthly streamflow and precipitation in the Yanhe River basin

表 2 延河流域 1952—2008 年降水量与径流量的变异特征  
Table 2 Annual statistical values of precipitation and streamflow in the Yanhe River basin during 1952-2008

| 项目   | 降水/mm  | 径流/万 m <sup>3</sup> |
|------|--------|---------------------|
| 多年均值 | 506.71 | 20578.41            |
| 变差系数 | 0.20   | 0.36                |
| 最大值  | 802.99 | 50188.55            |
| 最小值  | 315.38 | 10574.76            |

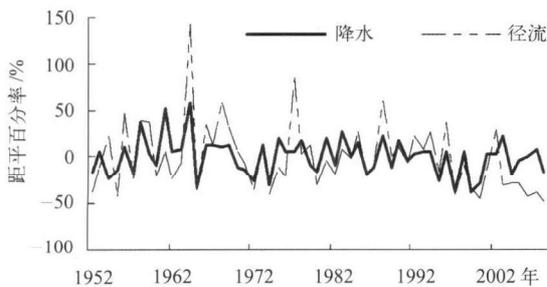


图 3 延河流域 1952—2008 年降水和径流距平百分率变化  
Fig. 3 Anomaly percentage variations of annual precipitation and streamflow in the Yanhe River basin during 1952-2008

根据表 1 中旱涝判定的 5 级标准, 延河流域 57 年来, 2 年为涝年, 分别是 1961 年 (761.70 mm) 和 1964 年 (802.00 mm); 2 年偏涝, 分别是 1958 年 (690.00 mm) 和 1983 年 (641.47 mm); 没有旱年出现, 但有偏旱年, 分别是 1965, 1972, 1974, 1995, 1997, 1999 和 2000 年。正常降水年份发生概率达 80.7%, 说明流域内降水的波动比较平缓。

从径流的丰枯标准来看, 甘谷驿站 57 年来, 15 年为丰水年, 4 年为偏丰年, 12 年为平水年; 6 年为偏枯年, 20 年为枯水年。从径流丰枯年份占研究期的比例来看, 丰水及偏丰年分别占 26.3% 和 7%, 偏枯和枯水年分别占 10.5% 和 35.1%, 而平水年占 21.1%。

## 2.2 突变分析

通过 Mann-Kendall 突变检验可以清楚地辨析延河流域 1952—2008 年降水量与径流量的变化趋势及突变发生的年份 (图 4)。自 20 世纪 50 年代起, 流域降水量的变化大致经历了 4 个阶段: 50 年代中期至 60 年代中期降水量呈明显的上升趋势, 且超过

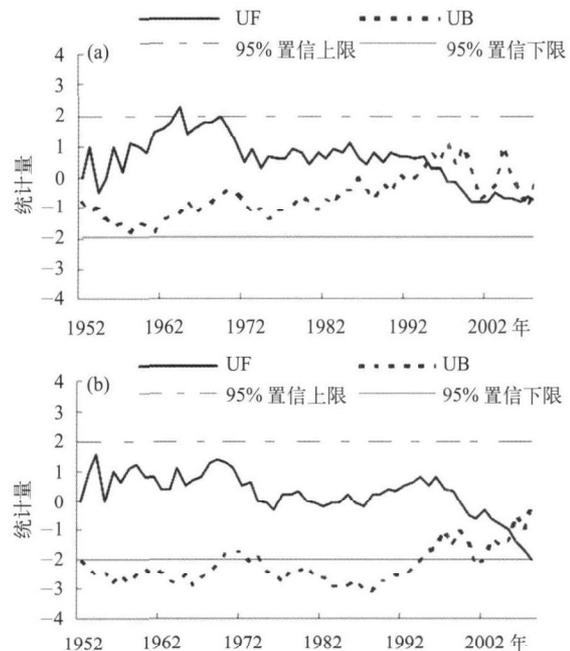


图 4 延河流域 1952—2008 年降水 (a) 和径流 (b) 的变化趋势及其突变点检测

Fig. 4 The trend and abrupt change analysis of annual (a) precipitation and (b) streamflow in the Yanhe River basin during 1952-2008

0.05 显著性水平临界线；60年代后期到70年代中期呈下降趋势；在70年代后期至90年代中期处于平稳波动期；此后又呈现下降趋势。根据UF和UB曲线的交点位置，确定90年代中期以后流域降水量下降趋势的突变出现在1995年附近。从径流UF曲线可以看出：50年代初到60年代中后期，甘谷站径流量呈上升趋势；60年代后期到70年代中期有所下降；70年代后期到90年代中期又有所回升；而后呈下降趋势，突变发生在2005年附近，此后径流量进入相对减少期。总体来看，57年来甘谷站径流变化基本与降水变化相对应，但径流突变的年份相对于降水有所滞后，这与人类活动和降水变化的综合作用有关。

### 2.3 降水变化和人类活动对甘谷站径流的影响

根据Mann-Kendall突变检验结果，将流域降水变化过程分为两个阶段：1952—1994年为基准期，1995—2008年为研究期。从基准期降水量与径流深的双累积曲线(图5)可以看出，累计年径流深与累计年降水量呈显著的线性关系( $P < 0.001$ )，说明在此阶段人类活动对径流的干扰程度较小，因此将此阶段设定为基准期是可行的。从各阶段降水与径流的回归方程(表3)可以看出，基准期的系数 $C_1$ 较大，为0.0820；而研究期的 $C_1$ 较小，为0.0369，说明在1952—1994年，人为因素对径流影响较小，而在1995—2008年，人为因素干扰程度加大，导致单位降水量所产生的径流量有所降低。

1995—2008年平均降水量较基准期减少了57.8 mm/11.1% (表4)，而径流深比基准期减少了10.21 mm/27.3%。Najjar<sup>[16]</sup>研究发现，降水的增加或减少会导致径流的明显变化，因而甘谷站径流量的减少与降水量的减少直接相关。通过分离降水变化和人类活动对径流的影响可知：降水变化导致1995—

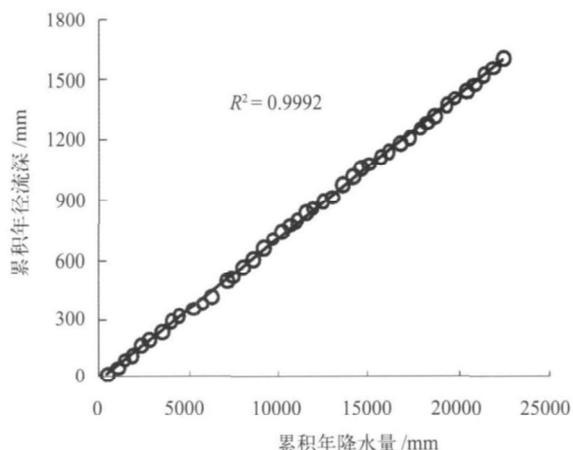


图5 1952—1994年间年降水量和径流深的双累积曲线图  
Fig. 5 The double mass curve of annual precipitation and runoff depth in the Yanhe River basin during 1952—1994

表3 延河流域不同时段降水与径流的回归方程

Table 3 Precipitation - streamflow regression equation in the Yanhe River basin for different periods of time

| 时期         | 回归方程                 | 显著性         |
|------------|----------------------|-------------|
| 1952—1994年 | $Y=0.0820X - 5.1364$ | $P < 0.001$ |
| 1995—2008年 | $Y=0.0369X + 10.189$ | $P=0.171$   |

注：回归方程中所用的降水(x)、径流(y)单位均为mm。

2008年期间的径流深减少了4.72 mm，贡献率为46.2%；而由人类活动引起的减少量为5.49 mm，贡献率为53.8%。

### 3 结论与讨论

延河流域1952—2008年期间的正常降水发生概率达80.7%，但总体上呈下降趋势，其中1995—2008年期间的平均降水量较1952—1994年减少11.1%。57年来甘谷站年径流量变化较大，偏枯和枯水年为主要径流年型。总体来看，径流的变化过程基本与降水的变化过程相对应，也呈减少趋势。1952—

表4 降水变化和人类活动对延河流域径流影响的定量评估

Table 4 Quantificative evaluation of the impacts of precipitation change and human activities on streamflow in the Yanhe River basin

| 时期         | 平均降水量/mm | 实测径流深 $R_m$ /mm | 回归径流深 $R_n$ /mm | 径流深变化 $R_t$ /mm | 降水变化影响/mm     | 人类活动影响/mm     |
|------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| 1952—1994年 | 519.37   | 37.43           |                 |                 |               |               |
| 1995—2008年 | 461.57   | 27.22           | 32.71           | -10.21          | -4.72 (46.2%) | -5.49 (53.8%) |

2008年期间的平均径流量较1952—1994年减少了27.3%，人类活动在1995—2008年期间对径流变化的影响程度稍大于降水变化，其对径流减少的贡献率为53.8%，而降水变化的贡献率为46.2%。

延河流域径流量的减少是降水变化和人类活动综合作用的结果。邱临静<sup>[9]</sup>等的研究表明，延河流域春季（3—5月）、夏季（6—8月）及秋季（9—11月）的降水量呈减少趋势。自20世纪80年代起，延河流域的水土保持力度日益加大，有效地控制了水土流失<sup>[17]</sup>。1998年以后，流域内开展了大规模的退耕还林还草建设项目，提高了林草植被的蓄水固土能力。此外，随着社会经济的快速发展，人类对水资源的过度开发与利用也会导致河川径流量的减少。由于大棚果疏设施农业及林果业已成为延河流域主要的农业生产模式，河川径流的减少将会影响国民经济和生态用水。此外，河川径流减少也会加剧天然植被退化和荒漠化扩张。因此，定量分析人类活动对径流的干扰，将有助于采取应对措施维护水文生态系统的良性循环。人类活动在基准期对径流的干扰程度很难估计，双累积曲线显示人类活动对基准期的干扰较小，可能与人类活动和降水变化对径流的影响效应相互抵消有关。此外，径流变化的影响因素是极其复杂的，而本文仅考虑了气象要素中对径流起关键作用的降水因素，未考虑温度等其他因素，使得人类活动对径流影响的贡献率包含了温度等其他气象因素的贡献，这也许会夸大人类活动对径流的影响程度。因此，在流域尺度加强人类活动因子和气候因子的耦合分析是今后工作的重点。 ■

#### 参考文献

[1] 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 [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007: 45-50
- [2] IPCC. Climate change 2001: the scientific basis. Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2001: 30-31
- [3] Liu Q, Yang Z, Cui B. Spatial and temporal variability of annual precipitation during 1961-2006 in Yellow River basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 361 (3-4): 330-338
- [4] Wang H J, Yang Z S, Saito Y, *et al.* Interannual and seasonal variation of the Huanghe (Yellow River) water discharge over the past 50 years: connections to impacts from ENSO events and dams [J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50 (3-4): 212-225
- [5] Bi H, Liu B, Wu J, *et al.* Effects of precipitation and landuse on runoff during the past 50 years in a typical watershed in Loess Plateau, China [J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24 (3): 352-364
- [6] Xu J. The water fluxes of the Yellow River to the Sea in the past 50 years, in response to climate change and human activities [J]. *Environmental Management*, 2005, 35 (5): 620-631
- [7] 李志, 刘文兆, 郑粉莉, 等. 黄土源区气候变化和人类活动对径流的影响 [J]. *生态学报*, 2010, 30 (9): 2379-2386
- [8] 刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少的成因分析 [J]. *地理学报*, 2004, 59 (3): 323-330
- [9] 邱临静, 郑粉莉, 尹润生. 1952—2008年延河流域降水与径流的变化趋势分析 [J]. *水土保持学报*, 2011, 25 (3): 49-53
- [10] 曹剑侠, 温仲明, 李锐. 延河流域典型物种分布预测模型比较研究 [J]. *水土保持通报*, 2010, 30 (3): 134-139
- [11] 宋小燕, 穆兴民, 高鹏, 等. 松花江流域哈尔滨站降雨径流历史演变及其驱动力分析 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8 (2): 46-51
- [12] 汪丽娜, 穆兴民, 张晓萍, 等. 陕北黄土丘陵区流域面平均雨量推算方法 [J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6 (2): 39-42
- [13] 王绍武, 黄朝迎. 长江黄河旱涝灾害发生规律及其经济影响的诊断研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1993: 55
- [14] 中华人民共和国行业标准SL250—2000水文情报预报规范 [S]. 北京: 水利部水利信息中心, 2000
- [15] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题 [J]. *水文*, 2010, 30 (4): 47-51
- [16] Najjar R G. The water balance of the Susquehanna River basin and its response to climate change [J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 219 (1-2): 7-19
- [17] 常丹东, 刁鸣军, 王礼先. 黄河流域水土保持减水定额研究 [J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3 (2): 57-64

## Quantification of Impacts of Precipitation Change and Human Activities on Streamflow in the Yanhe River Basin

Qiu Linjing<sup>1, 2</sup>, Zheng Fenli<sup>1, 2</sup>, Yin Runsheng<sup>3</sup>, Yu Fangyuan<sup>4</sup>

(1 College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100; 2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming in the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100; 3 Department of Forestry, Michigan State University, East Lansing 48824, USA; 4 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100)

**Abstract:** Based on the observational precipitation and streamflow data in the Yanhe River basin during 1952 - 2008, the Mann-Kendall test was applied to investigate the trends of precipitation and streamflow. The effects of precipitation change and human activities on streamflow were quantified during the period of 1995 - 2008. The results indicate that the normal precipitation year accounted for 80.7 %, and most years were characterized by lower and low flow. Annual precipitation and streamflow both exhibited decreasing trends, and their abrupt changes occurred in 1995 and 2005, respectively. Compared with the baseline period of 1952 - 1994, the reduction of precipitation and streamflow in the period 1995 - 2008 was 11.1% and 27.3%, respectively; precipitation change contributed 46.2% to streamflow reduction, while human activities resulted in 53.8% of streamflow reduction.

**Key words:** Yanhe River basin; streamflow; precipitation; human activities; impact

### 信息与动态

#### 全球变暖对海洋食物网的影响

想搞清全球变暖对海洋生命的影响是不容易的,因为情况很复杂。

新的试验证明:在比较温暖、富含营养成分的水域中,位于海洋食物链最底层的浮游植物繁殖得较少;浮游动物则会加速繁殖,这可能对某些鱼类有利。

食物网理论基于这样的一个设想:温度会影响以其他生物为食的有机体,如浮游动物;而温度对光合生物(如浮游植物)不会有什么影响。这意味着,温暖水域的浮游动物通常会繁殖得更为迅速,它们会吃掉更多的浮游植物,浮游植物的数量就会减少。

加州圣塔芭芭拉市美国国家生态分析与合成中心的博士后 Mary O'Connor 及同事设计了一个试验来检验上述理论。他们将浮游动物和浮游植物放进水缸里。一些水缸保持环境温度,其他的水缸分别升高2、4、6℃。由于海洋中的水含营养成分的水平不同,他们在每一组的半数水缸中额外加入氮和磷。

随着温度的升高,在没有额外添加营养成分的水缸中,生物群落的繁殖能力几乎没有变化,食物网也没有变

化。该情况表明营养成分贫乏的食物网对全球变暖的反应不敏感。额外加入营养成分的水缸情况就不一样了:在比较温暖的水中,浮游动物的数量上升,而浮游植物的数量下降了。研究小组在《公共科学图书馆——生物学》(*PLoS Biology*)在线版上发表的论文中报道:浮游动物跟浮游植物的比值上升了10倍。他们还指出:尽管随着温度的升高生物的总体繁殖能力在降低,但是在富含营养成分的水域中浮游动物会增加,以此为食的鱼类可能会受益。

德国基尔市莱布尼茨海洋科学研究所的浮游生物生态学家 Ulrich Sommer 及同事也做过类似的试验,只不过他们调节了水中的光线强度,而不是改变了其中的营养成分。Sommer 指出:鱼只吃某些种类的浮游动物,所以需要进行更多的分析,才能测定全球变暖对鱼类食物供应的影响。在不同的地区,水的物理性质(如水体的流动与分层)也会有所差异,这也将使鱼类对食物网的反应复杂化。

河北邢台学院外语系 胡德良 编译  
自美国《科学》杂志网站 <http://news.sciencemag.org/sciencenow/>

原作者: Erik Stokstad