黄土高原藉河流域 1962 — 2008 年径流变化特征

李庆云[1]，余新晓[1]，张 璐[2]，信忠保[1]，贾国栋[1]，王友生[1]，郑江坤[1]

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室，
北京 100083；2. 华北水利水电学院 资源与环境学院，河南 郑州 450011)

摘 要：采用 1962—2008 年近 50 a 的径流资料，应用统计分析方法，对黄土高原第三副区藉河流域的径流变化进行了分析。结果表明，流域径流呈明显下降趋势，20 世纪 70，80，90 年代和 2000 年以来径流分别是 60 年代的 62.3%，61.1%，30.2%和 35.2%，年均递增率为－2.1%，年际变差系数为 0.75；流域径流年内分配极不平衡，汛期径流占全年总量达 50.8%～95.2%，平均 76.5%，不均匀系数为 1.13；根据径流丰枯等级划分，藉河流域 60 年代至今分别经历了丰水期、平水期、偏丰期和枯水期，1990 年以来流域径流急剧下降，出现连续 9 a 的枯水年，这与流域内近些年大规模水土保持综合治理密切相关，深入分析土地利用/覆被变化的水文要素响应也是该区未来的研究重点。

关键词：藉河；径流；变差系数

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2011)01-0098-05 **中图分类号**：P332

Runoff Variations in Jihe River Watershed of Loess Plateau from 1962 to 2008

LI Qing-yun[1], YU Xin-xiao[1], ZHANG Lu[2], XIN Zhong-bao[1], JIA Guo-dong[1], WANG You-sheng[1], ZHENG Jiang-kun[1]

(1. *School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, and Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating of the Ministry of Education, Beijing* 100083, *China*;
2. *North China University of Water Resources and Electric Power, Resources and Environment Institute, Zhengzhou, He'nan* 450011)

Abstract: Based on the runoff data during the period between 1962 and 2008, runoff variations in the Jihe river watershed (1 019 km^2), located in the third sub-region of the Loess Plateau, were characterized using statistical analysis. The results indicate that the runoff presented a evident decreasing trend during the research period, and the runoff in the 1970s, 1980s, 1990s and 2000s accounted for 62.3%, 61.1%, 30.2% and 35.2% of the 1960s respectively, with an annual increasing rate of －2.7% and and a variation coefficient of 0.75. It was observed that inter-annual distribution of runoff was greatly unsteady, and the runoff percentages in flood seasons ranged from 50.8% to 95.2% with an average of 76.5% and a monthly variation coefficient of 1.13. According to wet and drought year classification of the runoff, Jihe river watershed has gone since the 1960s through the periods of wet year, average year, sub-wet year and drought year, respectively. The runoff decreased dramatically after 1990, lasting a nine-year period of drought, in coincidence with the large-scaled implementation of soil and water conservation. Thorough descriptions of the response of hydrological factors to land use and cover changes are another requirement for future study in the watershed.

Keywords: **Jihe river; runoff; variation coefficient; anomaly**

河川径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用，其演变过程既表现出确定性的规律，同时也有强烈的随机性，不同河流及同一河流的不同年份径流年内分配的不均匀程度不同，这一径流变化特征直接影响着水利工程的规模与水资源的合理配置及开发利用[1-3]。在气候变化以及人类活动的驱动下，河川径流的年际年内分布也将产生相应的变化，必然会给水资源管理、农业以及人类社会系统带来一系列的影响[4]。目前国内已有相当多关于河流径流分布特性的研究。例如，尤卫红[5]分析了怒江跨境径流量的变化特征与规律；王金星等[4]基于 1950 年以来的全国 6 大流域 19 个重点控制水文站

收稿日期：2010-07-17 **修回日期**：2010-08-17
资助项目：国家自然科学基金项目“黄土高原地区典型多尺度耦合流域土地利用/覆被的水文生态响应研究”(40871136)
作者简介：李庆云(1983—)，女(汉族)，河南省济源市人，博士研究生，主要研究方向为生态水文。E-mail：qingyunlyjs@163.com。
通信作者：余新晓(1961—)，男(汉族)，甘肃省平凉市人，教授，博士生导师，主要研究方向为水土保持、生态学、生态水文。E-mail：yuxinxiao111@126.com。

实测月径流量观测资料,以 1980 年为界,分析各站实测径流量年内分配不均匀系数、集中度以及集中期的变化[4];燕华云[6]根据长江源区 1956—2000 年河流月径流资料,分析了年内分配不均匀系数、完全调节系数、变化幅度等。

本文以位于黄土高原第三副区的藉河流域为研究区,基于 1962—2008 年 47 a 的天然径流序列数据,采用滑动平均、累积距平、分配不均匀系数等方法分析流域径流年际年内分布特征,为进一步研究该区水土保持措施的生态水文响应提供一定参考。

1　研究区概况

藉河流域位于甘肃省天水市,属黄土高原第三副区,流域面积 1 019 km^2,地处 105°07′50″—106°00′45″E,34°20′19″—34°38′59″N,海拔在 1 069～2 717 m 之间。研究区属暖温带半湿润半干旱的过渡地带,年均气温 l0.8 ℃左右,呈现较大的日变化但较小的季节波动。年降水量 450～680 mm,平均为 566.8 mm,年降雨量的 50%以上集中在 7—9 月。由于雨强大、土质疏松、植被稀少,导致该区土壤流失严重,年土壤侵蚀模数高达 2 800 t/km^2[7]。区域内土壤类型比较复杂,海拔由高至低依次分布的土类为褐色土、黑垆土、黄绵土、红土、淀土。近年来水土保持措施的大力实施使流域生态环境有所改善,但干旱和长期不合理垦殖仍对植被恢复造成很大影响,除了流域中上游主要分布着林地草地,研究区用地主要是农用地,近年来流域下游有大范围的果园经济林分布。

2　资料及方法

2.1　数据来源

流域内只有一个水文站位于流域下游,也是藉河流域的水文控制站,资料精度高,观测历时长,资料较为完整。本研究选取该站 1962—2008 年逐日径流观测数据进行分析,站点资料见表 1。

表 1　藉河流域水文站点信息

水文站点	经度(E)	纬度(N)	高程/m	河长/km	河道比降/%	集水面积 /km^2
天水(2)	105°55′	34°27′	1 176	61	2.7	1 019

2.2　研究方法

2.2.1　径流年内分配　径流变化通常包含“量”和“结构”的变化。前者通常是指径流总量、流量等数值上的变化,而后者则注重从径流过程线的“形状”上进行分析,它反映不同时段内径流的比例。径流年内分配特征的标度有多种不同方法,本文采用年内不均匀系数、变化幅度、汛期—非汛期占年径流的百分比数等不同指标分析径流年内分配特征的变化规律[8]。

本文用径流年内分配不均匀系数 C_{vy} 来衡量径流年内分配的不均匀性,计算公式为:

$$C_{vy}=\delta/\bar{x} \tag{1}$$

其中:$\mathrm{var}(\delta)=\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}(x_i-\bar{x})^2$

$$\bar{x}=\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}x_i$$

式中:x_i——年内各月径流量($i=1,2,3,\cdots,12$);$\bar{x}$——月平均径流量,C_{vy} 值越大说明径流年内分配越不均匀,各月径流相差悬殊。

变化幅度包括相对变化幅度和绝对变化幅度,计算公式如下:

$$\begin{cases}C_m=Q_{\max}/Q_{\min}\\ \Delta Q=Q_{\max}-Q_{\min}\end{cases} \tag{2}$$

式中:C_m,ΔQ——相对和绝对变化幅度;$Q_{\max}$,$Q_{\min}$——年内最大月和最小月径流量。

2.2.2　径流年际变化　本文用流域年径流量变差系数 C_v 值、累积距平等指标来表征和分析径流量的年际变化。C_v 的表达式为:

$$C_v=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{(k_i-1)^2}{n-1}} \tag{3}$$

式中:n——观测年限;k_i——第 i 年的年径流变率,即第 i 年平均径流量与正常径流量的比值。$k_i>1$ 表明该年水量比正常情况多,$k_i<1$ 则相反。年径流量的 C_v 值反映年径流量总体系列离散程度,C_v 值大,年径流的年际变化剧烈,这对水利资源的利用不利,而且易发生洪涝灾害;C_v 小,则年径流量的年际变化小,有利于径流资源的利用[8]。

累积距平是一种常用的,由曲线直观判断变化趋势的方法。对于序列 x,其某一时刻 t($t=1,2,3,\cdots,n$)的累积距平表示为:

$$\hat{x}=\sum_{i=1}^{t}(x_i-\bar{x}) \tag{4}$$

其中:$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$。

将 n 个时刻的累计距平值全部算出,即可绘出累积距平曲线图进行趋势分析。

2.2.3　年代丰枯变化　按照水利部信息中心新编制的水文预报规范,对径流丰枯情况的划分标准规定要按距平百分率 p 表示[9],具体表达式为:

（某年径流量－多年平均流量）/多年平均流量×100%

具体划分等级如表 2 所示。

表 2 径流丰枯期划分等级

距平百分率 p/%	等 级
$p>20$	丰水期
$10<p\leqslant 20$	偏 丰
$-10\leqslant p\leqslant 10$	平水期
$-20\leqslant p<-10$	偏 枯
$p<-20$	枯水期

3 结果与分析

3.1 藉河流域径流的年际变化

由于受降水及流域下垫面土地利用/覆被等的综合作用，径流序列是一非线性，弱相关且高度复杂的动态系统。藉河流域多年平均径流量为 7.3×10^7 m^3，而最大、最小流量分别为 1.96×10^8 m^3（1964 年）和 2.00×10^6 m^3（1996 年），差异十分显著。图 1 及图 2 分别表示流域 1962—2008 年径流年际变化与季节变化趋势。径流量趋势线的斜率 $k=-0.021$，说明流域年径流量总体上呈下降趋势，平均每年递减率为 2.1%，其中秋季径流量的减幅最大；其次是夏季和春季，春季径流在 90 年代以后减幅越来越大；冬季径流量比较平稳，减幅最小。分析表明，径流的季节分配呈现出秋季＞夏季＞春季＞冬季的特征，平均径流量分别为 3.24×10^7，2.43×10^7，1.05×10^7，5.98×10^6 m^3。

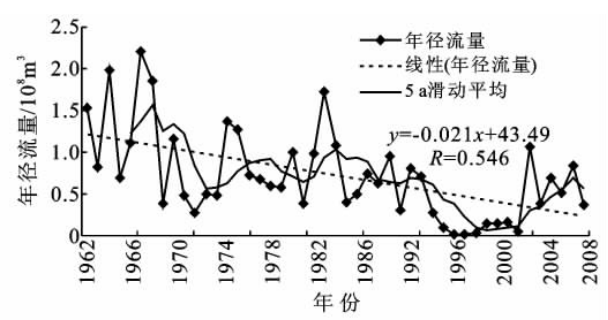


图 1 藉河流域 1962 — 2008 年径流量年际变化

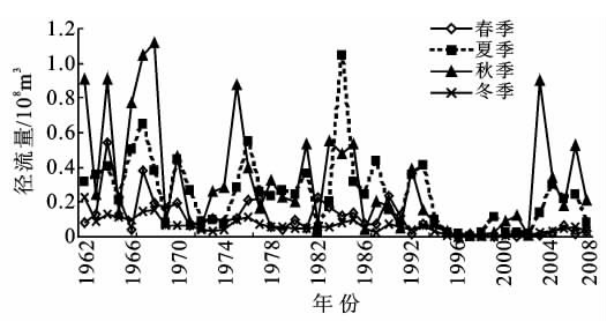


图 2 藉河流域 1962 — 2008 年径流量的季节变化

径流年际变化的总体特征常用变差系数 C_v 或年际极值比 K_m 来表示。C_v 反映了一个地区径流的相对变化程度。C_v 值大表示径流的年际丰枯变化剧烈，反之则表示径流的年际变化平缓。经计算，藉河流域的年际变化特征值见表 3。由表 3 可看出其年际极值比 K_m 和 C_v 值都很大，分别为 117.30，0.75，但相对于其它研究的 852.31 和 0.99[1]，本研究区径流年际波动相对不是很大，但径流量的年代变化特征十分明显。通过图 3 的年径流量累积距平图可看出，80 年代中期以前径流量相对较多，但之后下降明显。研究期间有 28 a 为负距平，约占 63%，特别是 1993—2002 年期间连续为负距平值，这和降水有直接关系。据统计，这 10 a 年均降雨量为 430 mm，1996 年仅为 321.8 mm，远低于多年平均降水量（566.7 mm），同时也与人类活动影响密切相关。

3.2 藉河流域径流的年内分配

降水是流域径流的主要补给来源，因受降水的影响，径流的年内分配差异很大，夏秋两季是降水量较多而且集中的时期，也是一年中径流较大的时期。根据分析，藉河的径流主要集中在 7—10 月（见图 4），汛期水量占年总量的 76.5%，其中径流量最大的 9—10 月占年总量的比例约为 37%，这和其它研究 7—9 月份径流量占最大比例有所不同[5,10]，也是季节变化中秋季径流比例较大的原因。最小月径流量出现在 1，2 月及 12 月份，仅占年总量的 8%左右，分别为 2.3%，2.6%和 3.3%；7，8 月份约占全年径流的 27%。

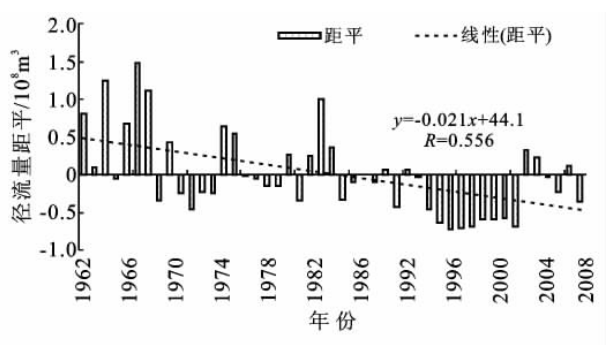


图 3 藉河流域 1962 — 2008 年年径流量距平分析

表 3 藉河流域径流年际变化特征值

时间	多年平均径流量/（$m^3\cdot s^{-1}$）	递增率 Δ/（$m^3\cdot s^{-1}\cdot a^{-1}$）	极值比 K_m	变差系数 C_v
全年	2.36	－0.03	117.30	0.75
春季	1.35	－0.01	272.35	1.02
夏季	3.12	－0.07	115.78	0.84
秋季	4.16	－0.20	139.41	0.97
冬季	0.77	－0.05	25.14	0.78

对表 4 的数据进行分析可以得出藉河流域径流年内分配特征。径流年内分配不均匀系数,1960s 的不均匀性最小,1990s 的不均匀性最大,达到 1.46,其次为 2000s 达到 1.30,其它各年代介于二者之间,并且各年代之间差别不是很大。

从径流年内变化幅度看,流域年内相对变化幅度总体呈增大趋势,从 1960s 的 25.43 增加到 2000s 的 53.83,特别是 1990s 达到 73.73,远远高于其它相似研究[10];绝对变化幅度也有相似规律,即呈现比较明显的下降趋势,从研究初期的 3.5×10^7 m^3 下降到近几年的 1.8×10^7 m^3,特别是 1990s 的变化幅度仅为 8.00×10^6 m^3,绝对变化幅度的下降是因为近 50 a 的径流量呈不断下降趋势。

以 1960s 为基准期,分析表明 1970s,1980s,1990s,2000s 的径流量分别是 1960s 的 62.3%,61.1%,30.2%和 35.2%,从 1990s 开始下降是十分明显的。

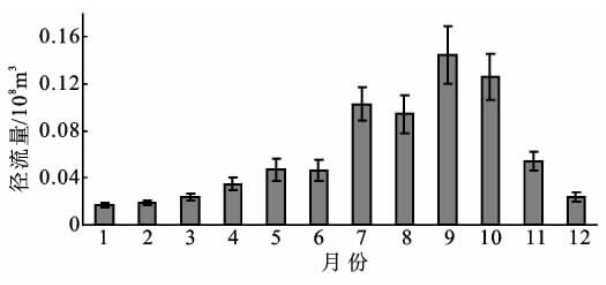


图 4　藉河流域多年平均月径流量分配

表 4　藉河流域多年径流年内分配统计特征

年 代	C_{vy}	C_m	$\Delta Q/10^8$ m^3	汛期比重/%
1962—1969	0.89	25.43	0.35	50.8～84.7
1970—1979	0.98	21.58	0.20	59.6～80.5
1980—1989	1.04	49.70	0.24	51.2～87.1
1990—1999	1.46	73.73	0.08	50.9～95.2
2000—2008	1.30	53.83	0.18	71.7～93.2
1962—2008	1.13	39.34	0.21	50.8～95.2

3.3　藉河流域径流丰枯变化

按照表 2 的径流丰枯率划分标准,藉河流域不同年代径流丰枯变化如表 5 所示。以 1980s 为界,之前径流量比较丰富,特别是 1960s 距平百分率 p 值达到 86%,但进入 1990s 后径流急剧下降,呈现枯水期(−63.3%),特别是 1994—2002 年连续 9 a 呈现枯水年。流域径流量在 1962—2008 年间以枯水年份居多,占 60%左右,并且主要集中在 1990 年以后。不同区域河川径流差异极大,有研究表明,怒江跨境径流量在 1956—2000 年中以正常年份居多,枯水年只出现 3 a,流量正距平年有明显增加的时间演变趋势,特别是自 1990 年以后,此发现和本研究刚好相反,这和区域降水、地质地貌差异等有重要关系[5]。

表 5　藉河流域径流不同年代的丰枯变化情况

年 代	距平百分率 p/%	丰枯程度
1960s	86.0	丰水期
1970s	2.8	平水期
1980s	14.5	偏 丰
1990s	−63.3	枯水期
2000s	−34.6	枯水期

4　讨 论

气候变化和人类活动对水文循环时空异质性的影响是近些年来水文学家关注的焦点,如何阐明这种变化过程的机制与定量化气候变化和人类活动的贡献率是研究的关键。因此首先要对降水、径流等水文要素的总体变化趋势及波动周期进行分析。本研究表明,近 50 a 藉河流域径流呈明显的减少趋势,特别是从 20 世纪 80 年代末期急剧下降,这可能与流域 80 年代中期大规模坡耕地改梯田的水土保持工程措施有关。

大量研究表明坡改梯活动减少了径流产生,张建军[11]认为,在黄土区的小流域内修建水平梯田,能够显著减少地表径流量,拦蓄的地表径流将转化为基流流出。此外,流域土壤类型、植被覆盖率、土地利用,及降水、温度等都对径流过程产生极大影响,需要对研究区降水、温度等气候变化加以深入分析。人类活动强烈地影响了土地利用及覆被变化,1990s 以来,一系列生态保护工程包括黄河流域水土保持工程、天然林防护工程、退耕还林还草工程在防止土地退化,增加植被覆盖,改善我国西北脆弱生态系统方面起到了关键作用。目前已有大量研究表明植被覆盖增加后,径流呈现下降趋势[12]。胡兴林[9]对甘肃省主要河流径流的时空分布进行了分析,得出各河年径流丰水时段较短,一般只有 2～3 a,而枯水时段很长,可达 7～26 a,并且渭河流域控制站天水站的数据显示,60—90 年代分别呈现丰水、平水、平水、枯水,与本研究流域保持一致的变化趋势。

藉河流域长时间序列土地利用/覆被变化的生态水文响应方面的研究还很少。有研究表明藉河流域 1997—2005 期间耕地面积减少了 11.1%,林地面积增加了 3.3%,草地面积增加了 7.3%[13],这势必对径流过程产生极大影响,本研究也显示流域 1993—2002 年径流急剧下降(图 1)。地表径流产汇过程是一个集降水、土壤、植被及其它因素的复杂函数,需要

考虑多种影响因素才能对该流域土地利用/覆被和气候变化的水文响应进行全面分析。

5 结 论

对黄土高原第三副区藉河流域近 50 a 的径流资料进行统计分析发现，1960 年以来该区径流发生了明显了变化。具体表现为：1960 年代径流量比较丰富，平均年径流为 1.362×10^8 m^3；1970 和 1980 年代年均径流分别为 7.53×10^7，8.34×10^7 m^3，有一定程度下降但波动不大；1990 年代以来流域径流量呈现明显减少，特别是 1994—2002 间急剧下降，连续为枯水年，1990—2008 年年均径流仅为 3.68×10^7 m^3。同时，流域径流年际和年内分配不平衡，变差系数及不均匀系数分别为 0.75 和 1.13；径流主要集中于 5—10 月份，占全年的 50.8%～95.2%，对水资源利用带来不利影响。

藉河流域径流变化规律是气候变化和人类活动综合作用的结果，尤其 1990 年以来流域开展大规模水土保持综合治理措施后对降雨产流量，降雨—径流型的流域间水分大循环，降雨—入渗—蒸发型的流域内水分小循环等产生了很大影响。本研究为进一步深入了解流域水文因子变化及土地利用/覆被变化的水文响应功能研究提供了较好的基础数据支持。

[参 考 文 献]

[1] 姚治君，管彦平，高迎春. 潮白河径流分布规律及人类活动对径流的影响分析[J]. 地理科学进展，2003，22(6)：599-606.

[2] 李丽娟，郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析：以潮白河为例[J]. 地理学报，2000，55(3)：309-316.

[3] 冯国章，李瑛，李佩成. 河川径流年内分配不均匀性的量化研究[J]. 西北农业大学学报，2000，28(4)：50-53.

[4] 王金星，张建云，李岩，等. 近 50 年来中国六大流域径流年内分配变化趋势[J]. 水科学进展，2008，19(5)：656-661.

[5] 尤卫红，吴湘云，郭志荣. 纵向岭谷区的怒江跨境径流量变化特征[J]. 山地学报，2008，26(1)：22-28.

[6] 燕华云，杨贵林，汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土，2006，28(4)：526-529.

[7] Wang S P, Zhang Z Q, Sun G, et al. Detecting water yield variability due to the small proportional land use and land cover changes in a watershed on the Loess Plateau, China [J]. Hydrological Processes, 2009，23：3083-3092.

[8] 吕玉香，王根绪. 贡嘎山东坡不同流域河川径流特征对比分析[J]. 山地学报，2008，26(2)：196-206.

[9] 胡兴林. 甘肃省主要河流径流时空分布规律及演变趋势分析[J]. 地球科学进展，2000，15(5)：516-521.

[10] 杨明金，张勃，王海青，等. 黑河流域 1950—2004 年出山径流变化规律分析[J]. 资源科学，2009，31(3)：413-419.

[11] 张建军，纳磊，董煌标，等. 黄土高原不同植被覆盖对流域水文的影响[J]. 生态学报，2008，28(8)：3597-3605.

[12] 张升堂，康绍忠，张楷. 黄土高原水土保持对流域降雨径流的影响分析[J]. 农业工程学报，2004，20(6)：56-59.

[13] 任宗萍，杨勤科，胡志瑞，等. 基于项目驱动的藉河流域土地利用时空变化动态分析[J]. 干旱地区农业研究，2009，27(3)：239-244.

(上接第 39 页)

[6] Evans E W. Grasshopper (Insecta: *Orthoptera*: *Acridoidea*) assemblages of tallgrass prairie: influences of fire frequency, topography, and vegetation [J]. Canadian Journal of Zoology, 1988，66：1495-1501.

[7] Fielding D J, Brusven M A. Grasshopper (*Orthoptera*: *Acridoidea*) community composition and ecological disturbance on southern Idaho rangeland[J]. Environmental Entomology, 1993b，22：71-81.

[8] 刘慧，廉振民，常罡，等. 陕西洛河流域不同生境蝗虫的群落结构[J]. 昆虫知识，2007，44(2)：214-218.

[9] 朱慧，彭媛媛，王德利. 植物对昆虫多样性的影响[J]. 生态学杂志，2008，27(12)：2215-2221.

[10] 李巧，陈又清，陈彦林，等. 紫胶林—农田复合生态系统蝗虫群落多样性[J]. 应用生态学报，2009，20(3)：729-735.

[11] Sandra T, Maria M, Maria L. Grasshopper (*Orthoptera*: *Acridoidea*) and plant community relationships in the Argentine Pampas[J]. Journal of Biogeography, 2009，29：221-229.

[12] 赵成章，周伟，王科明，等. 黑河中上游草原蝗虫生态分布与生境的关系[J]. 兰州大学学报：自然科学版，2009，45(4)：42-47.

[13] 柴来智，张和平，李瑜年. 甘肃省张掖地区草地资源[J]. 中国草业科学，1988(S)：49-87.

[14] 殷秀琴，王海霞，周道玮. 松嫩草原区不同农业生态系统土壤动物群落特征[J]. 生态学报，2003，23(6)：1071-1078.

[15] 颜忠诚，陈永林. 草原蝗虫的栖境选择：栖境选择与水平结构的关系[J]. 武夷科学，1998，14：25-257.

[16] Kemp W P, o'Neill K M, Cigliano M M, et al. Field-scale variations in plant and grasshopper communities [J]. Transactions in GIS, 2002，6：115-133.