

方建刚,侯建忠,陶建玲,李明娟,白爱娟. 秦岭地区秋季降水的气候特征分析. 气象科学, 2008, 28(4): 415-420

秦岭地区秋季降水的气候特征分析

方建刚^{1,2} 侯建忠³ 陶建玲³ 李明娟³ 白爱娟^{1,3}

(1 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075) (2 陕西省气候中心, 西安 710014)

(3 陕西省气象台, 西安 710014)

摘要 利用 1961—2005 年观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 对秦岭邻近地区秋季(9—10 月)降水的气候特征及其与大气环流关系进行分析, 结果表明: 秦岭地区秋季降水具有明显年代际变化特征, 1960 后期、1970 和 1980 初秋季多雨, 而 1950 和 1960 初前期、1980 中后期和 1990 秋少雨, 2000 年以后秋季降水略有增多。秦岭地区秋季雨涝年环流特征是高原北侧高空西风急流偏强, 乌拉尔山长波脊稳定, 西太平洋副热带高压位置偏西, 强度偏强, 对流层低层东南风气流和西南风气流为秦岭地区输送了大量水汽; 而少雨干旱年则高空高原北侧西风急流偏弱, 秦岭地区受青藏高原控制或西北气流控制, 与东亚冬季风相联系的偏北气流阻断了偏南气流的水汽输送。

关键词 气候特征 西风急流 大气环流

分类号 P426.62 **文献标识码** A

An analysis of climate characteristic of rainfall in Qinling in autumn

Fang Jiāngāng^{1,2} Hou Jiānzhōng³ Tao Jiānlíng³ Li Míngjuān³ Bai Àijūan^{1,3}

(1 Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075)

(2 Shaanxi Climatic Centre, Xi'an 710014) (3 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014)

Abstract Using observation data from 1961 to 2003 and NCEP/NCAR reanalyzed data, this paper investigates climate distribution of precipitation in autumn during Sep. and Dec. in vicinity of Qinling and drought-flood variation as well as its relationship with atmospheric circulation. It is shown that influenced by the terrain of Qinling, the rainfall amount is obviously higher on its southern side than northern side, but the annual variation of precipitation is consistent on both sides. Over recent 50 years, precipitation decreases in autumn in majority of China, precipitation in Qinling indicated an evident similar trend of decrease. In Qinling, the pluvial year of autumn normally features consecutive rain and concentrated large rainfall amount. Generally, a blocking pattern stabilizes in the westerly jet of mid-high latitude, and the subtropical high pressure locates more westward with stronger intensity, while the southeast monsoon is rather strong. However, the atmospheric circulation of a severe drought year represents the domination of Tibetan high pressure or northwest stream in this area. The powerful southward cold air cuts off the transport of water vapor from the southeast monsoon.

Key words Climate characteristic Westerly jet Atmospheric circulation

收稿日期: 2006-05-08; 修改稿日期: 2008-01-15

基金项目: 国家 973 项目 (2004CB720208); 中科院知识创新项目 (KZCX-SW-339); 科技部重大基础研究专项 (2003CCC01500); 陕西省气象局科技创新基金项目 (2006-15)

第一作者简介: 方建刚 (1960-), 男, 陕西咸阳, 高级工程师, 主要从事气象分析和研究

引言

受东亚季风影响秦岭邻近地区降水主要集中在夏秋两季,且降水随季节变化呈双峰型,秋季降水是该地区主要气候的特征之一。气象灾害也多发生在这一时段,如2003年9—10月引发渭河流域6次洪峰的持续性阴雨天气,而1977、1998的秋季干旱直接影响该地区水资源的补给和冬小麦的播种。因而秦岭邻近地区秋季降水受到了广泛关注和重视。早期高由禧等^[1-2]初步分析了我国秋雨和秋高气爽现象,指出华西秋雨的起止日期与亚洲南部上空急流的进退有关。刘富明^[3]分析了华西秋雨与大气环流季节转换的关系,表明华西秋雨与大气环流由夏到冬的季节转变有密切关系,其形成的大气环流特征是西风带环流与副热带环流不同步转变,而东亚季风与高原季风不同步转变是华西秋雨直接原因。最近林纾^[4]比较了西北区中东部2000和2001年连阴雨天气过程特征,并分析了西太平洋副热带高压和海温对西北区中东部秋季连阴雨的影响,总结了西北地区中东部连阴雨的候平均环流形势特征,指出当500 hPa乌拉尔山有脊发展,巴尔克什湖—里海为槽,孟加拉湾—青藏高原为低值区,中纬度东亚环流呈东高西低时有利于西北中东部连阴雨天气的形成。我们在分析陕西2003年陕西秋季连阴雨的环流形势时发现^[5-6],在对流层高层大气环流形势从夏季型向冬季型转变过程中,200 hPa西风急流轴在40°N附近徘徊时,高原东北侧的陕西位于急流南侧的高空辐散区,对流层低层仍维持高温高湿的高能带,对流上升运动活跃,使得该地区低层辐合高层辐散的垂直环流得以维持,从而产生了长时间的阴雨天气。

本文研究区域(105°~111°E, 31°~36°N,以下简称秦岭地区)位于秦岭山脉的南北两侧。主要覆盖陕西南部,同时包括邻近省份(自治区)的小部分地区。用1961—2005年秦岭地区79个气象站的观测资料和美国环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料,通过对该地区秋季降水主要气候特征及其与大气环流特征分析,为秋季降水的中长期天气预报提供参考。

1 秦岭地区秋季降水气候特征

秦岭地区秋季(9—10月)多年平均降水量(图1)整体分布上存在着两大特点,一是降水量分布总趋势是由南向北而递减;二是降水量自秦巴山区向

四周逐渐减少。秋季降水量300 mm的区域位于秦巴山区。秦岭山脉北侧的渭河流域和汉江谷地秋季降水量一般在200 mm左右,值得注意的是,在秦岭北侧有降水量在150 mm以下的区域。反映了秦岭山脉对偏南气流的阻挡和抬升作用,在北侧造成地形性下沉气流,导致渭北存在一少雨带。

图1 秦岭地区秋季(9—10月)多年平均降水量(实线,单位:mm)和秋季降水占年降水量的百分率(虚线,单位:%)

Fig 1 Mean yearly precipitation in Qinling Mountains in autumn during Sep. and Dec. (solid lines, unit mm) and percentage of autumn precipitation in pre year (dashed lines, unit %)

秋季降水占全年总降水的百分率高(图1)是秦岭地区秋季降水最为明显的特征之一。秦岭地区秋季降水占全年总降水的22%~28%,特别是在渭河流域有28%的高中心,约占全年总降水量的1/3,表明该地区是华西秋雨最为显著的区域之一。

秦岭南侧秋季多年平均雨日为26~30 d,北侧则为20~24 d,且多持续4 d以上的连阴雨天气。秦岭地区秋季年平均有2次连阴雨,其中近50%的连阴雨持续时间为4~6 d,25%的连阴雨持续时间为7~10 d,25%的连阴雨持续时间为10 d以上,秦岭地区典型秋季连阴雨的区域平均过程降水总量(表1)一般接近或超过秋季常年平均降水量,在典型连阴雨过程中通常有一次或多次区域性暴雨天气,表明持续时间长,雨量大,暴雨站次多是秦岭地区秋季降水主要气候特征之一。

表1 秦岭地区典型连阴雨过程的特征

Table 1 Features of representative consecutive rain in Qinling

连阴雨时间	持续时间 /d	秦岭北侧过程降水量 /mm	秦岭南侧过程降水量 /mm	暴雨站次
1975-09-21—10-03	15	138.9	221.5	10
1981-08-14—23	10	167.0	182.0	67
2003-08-24—09-07	14	194.8	257.2	87
2005-09-24—10-06	13	139.0	199.6	27
2003-09-17—20	4	67.9	71.7	29

2 秦岭地区秋季旱涝气候变化特征

2.1 秋季降水的气候变化趋势

气候趋势系数^[7-9]可以定量表示气象要素长期变化的大小。通常气候趋势系数 r_{xt} 定义为要素序列与自然数列 $1, 2, \dots, n$ 之间的相关系数,即

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}, \quad (1)$$

式中 n 为年数, x 为要素值, \bar{x} 为平均值,而 $\bar{t} = \frac{n+1}{2}$ 。当 r_{xt} 为正(负)时,表示要素在计算时段内线性增加(减少)。气候趋势系数 r_{xt} 已经广泛应用于气象要素的长期变化的相关研究中。

秦岭地区1961—2005年秋季降水(图2)呈一致负气候趋势变化,且西部小于东部,秦岭南侧小于秦岭北侧的特征。通过0.05的显著性检验的两个负中心分别位于在巴山和六盘山附近。表明在过去45 a

中,秦岭地区秋季降水呈显著减少的趋势,其减少趋势西部明显于东部,秦岭南侧明显于北侧。这一结论与有关研究结论是一致的^[10-11]。在近50 a来我国大部分地区秋季降水有减小的趋势的大背景下^[12-15],秦岭地区秋季降水减少最为明显,特别是西北黄土高原的六盘山,其秋雨本来就不多,而秋季降水减少趋势却非常明显,其干旱程度也越来越严重。

秦岭地区秋季不同时段内降水年际变化也存在明显差异。区域平均秋季9月、10月降水量之间相关性很低($r=0.24$)。这可能与秋季不同阶段影响该地区的大气环流不一致有关,而9月与整个秋季降水的变化趋势更为一致($r=0.89$)。10月与整个秋季降水变化趋势则稍差($r=0.64$)。表明秦岭地区秋季降水异常主要取决于夏末秋初的9月,即9月区域平均降水能够反映该地区秋季区域降水主要气候变化特征。

从秦岭北侧西安站(图3a)和秦岭南侧汉中站(图3b)秋季降水的时间演变曲线中可以发现,两站秋季降水气候变化趋势基本一致,并有明显年代际变化特征,1960s中后期、1970s—1980s初秋季降水明显偏多,而1950s—1960s初前期、1980s中后期到1990年秋季降水异常偏少,2000年后秋季降水有增多的趋势。特别是2003年8月下旬到10月中旬秦岭地区异常连阴雨天气,导致渭河先后出现6次洪峰,秦岭山区遭受罕见泥石流等地质灾害。

2.2 秋季旱涝特征

Z指数是比较适合西北地区旱涝划分的旱涝标准,它通过对降水量序列进行正态化处理,将Person型分布转换为以Z为变量的标准化正态分布,计算公式是^[16]

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} X_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (2)$$

其中 X_i 为降水量的标准化变量, C_s 为偏态系数

图2 秋季降水的趋势系数(绘图时放大了100倍)
(灰色为通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验的区域)

Fig 2 Distribution of trend coefficient (increase by 100 times) for rainfall in autumn (gray marked test area reveals that is higher than 0.05)

图3 1951—2005年(a)西安;(b)汉中站秋季(9—10月)降水量时间变化及其四阶多项式拟合曲线
Fig 3 Rainfall change from 1951 to 2005 and its polynomial fitting of four steps in (a) Xi'an; (b) Hanzhong

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^3}{nS^3} \quad (3)$$

这里 S 为方差

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \quad (4)$$

采用修正的西北地区旱涝等级标准^[17],将旱涝指数划分为重涝、大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱、重旱等 7 个等级。计算秦岭地区区域平均秋季降水量的 Z 指数并得到秋季旱涝等级 (表 1),秦岭地区秋季重涝和大涝年有: 1964、1968、1974、1975、1983、1984、2003 年,重旱和大旱年有: 1972、1977、1990、1991、1993、1997、1998 年。说明秦岭地区秋季易出现严重的洪涝灾害,从表 2 中还可以看到,偏涝年主要出现在 1960s、1970 和 1980 的前期,而偏旱年主要出现在 1980 后期和 1990s,与前述西安、汉中秋季降水的时间变化趋势基本一致。

3 秦岭地区秋季旱涝的异常环流特征

3.1 秦岭地区秋季降水异常的环流特征

从秦岭地区秋季雨涝年与干旱年 500 hPa 合成高度差值场分布 (图 4) 中可以看到,在乌拉尔山西侧、亚洲大陆东岸为正值区,贝加尔湖南侧到巴尔喀什湖为负值区,中心差值分别 +24 dagpm、+4 dagpm、-8 dagpm,此外青藏高原到孟加拉湾也呈弱的负值区,在贝加尔湖北部也有一正值区,形成了从乌拉尔山到我国东部沿海 + - + 的西北—东南走向波列分布,表明在秦岭地区秋季雨涝年乌拉尔山长波脊和西太平洋副热带高压偏强,亚洲极地冷空气势力偏弱并常常南压到贝加尔湖附近,在贝加

尔湖到巴尔喀什湖多低值系统活动,从而有利于高原季风和东亚季风发展,东移南下的冷空气与东亚夏季风长时间交汇于秦岭邻近地区,形成了该地区持续阴雨天气。而干旱年则相反,西太平洋副热带高压偏弱,亚洲极地冷空气势力偏强,东亚大槽偏深,秦岭地区多受高空西北气流控制,降水明显偏少。

图 4 秦岭地区典型雨涝年与干旱年 500 hPa 平均高度差值场分布 (单位: dagpm)

Fig 4 Difference distribution of mean potential height at 500 hPa for representative flood and drought years in Qinling (unit: dagpm).

3.2 秋季雨涝年的环流特征

取秦岭地区秋季大涝年和重涝年作为雨涝年。分析表明秦岭地区秋雨涝年 (图 5) 200 hPa 在青藏高原北侧 40°N 附近,有平均风速 35 m/s 西风急流,秦岭地区位于急流右侧大尺度辐散场,500 hPa 西太平洋副热带高压强盛,588 dagpm 特征线西伸到我国大陆,低层 850 hPa 秦岭地区南侧有两支偏南气流,一支为西太平洋副热带高压外围东南风气流,另一支偏南气流是位于高原东侧来自孟加拉湾的西南风气流,这两支偏南气流在秦岭附近与偏北气流相遇,表明秦岭地区秋季雨涝年不仅受东南季风影响,而且也受到西南季风影响^[18]。

表 2 秦岭地区秋季近 45 年旱涝等级表

Table 2 Rate of drought-flood in Qinling Mountains in autumn for 45 a

年份	等级								
1961	3	1970	3	1979	4	1988	4	1997	5
1962	4	1971	4	1980	4	1989	5	1998	7
1963	4	1972	5	1981	4	1990	5	1999	4
1964	1	1973	3	1982	4	1991	6	2000	4
1965	4	1974	2	1983	1	1992	4	2001	4
1966	4	1975	1	1984	2	1993	6	2002	5
1967	4	1976	5	1985	3	1994	4	2003	2
1968	2	1977	6	1986	4	1995	5	2004	4
1969	3	1978	4	1987	5	1996	4	2005	3

图 5 秦岭地区多雨年 850 hPa 平均流场图 (图中实线为 500 hPa 588 dagpm 线,阴影实线为 200 hPa 西风大于 35 m/s 的区域)
Fig 5 Mean wind vector field at 850 hPa in Qinling Mountains in pluvial years (solid lines denote 588 dagpm at 500 hPa, shaded area denotes velocity of west wind more than 35 m s^{-1} , the same thereafter)

3.3 秋季干旱年的环流特征

取秦岭地区秋季大旱年和重旱年作为干旱年。分析表明产生秦岭邻近地区秋季干旱的环流形势主要有两种,一种是青藏高原控制型,其环流特征是极涡主体位于巴芬岛上空,北美低槽、乌拉尔低槽及阿留申群岛低槽深厚,东亚冷空气势力偏弱且多偏北东移,高原到河套维持反气旋环流,并有暖中心与其配合,强大暖性大陆高压控制了我国中东部大部分地区。相应距平场中东亚中纬度地区和西太平洋为大片正距平区,高原南部到孟加拉湾为正距平区,秦岭邻近地区在这种形势下受青藏高原持续影响,高温少雨,干旱严重。像 1991、1993 年等秋季少雨干旱就属于这种类型。产生秦岭邻近地区秋季干旱另一种环流形势是西北气流控制型,其环流特征是乌拉尔山和亚洲大陆东岸为深厚的长波槽,西北太平洋副热带高压偏弱且位置偏东,秦岭地区主要受高空西北气流或弱的西西北气流控制,降水偏少。

图 6 秦岭地区少雨年 850 hPa 平均流场图 (图中实线为 500 hPa 588 dagpm 线,阴影实线为 200 hPa 西风大于 35 m/s 的区域)

Fig 6 Mean wind vector field at 850 hPa in Qinling Mountains in droughty years

秦岭邻近地区秋季典型干旱年高空 200 hPa 位于青藏高原北侧 40°N 附近的西风急流急流偏弱 (图 6),平均风速 35 m/s 范围小。500 hPa 西太平洋副热带高压较弱,其主体位置偏东且位于太平洋上空,青藏高原东部有 588 dagpm 的闭合大陆高压单体,850 hPa 秦岭地区主要受与东亚冬季风有关的偏北气流控制,有分析表明这支气流水汽含量极少^[19-20],产生了秦岭地区秋高气爽天气。

4 秦岭地区秋季连阴雨环流的特征

连阴雨是秦岭地区秋季典型降水天气过程,发生在大尺度天气系统稳定的环流背景下,按照 500 hPa 欧亚中高纬度西风槽脊分布特征,秦岭地区秋季连阴雨环流形势可分为乌山阻高型、欧亚两槽一脊型、欧亚两脊一槽型。

4.1 乌山阻高型

乌拉尔山附近为阻塞高压 (图 7a),巴尔喀什湖到威海为长波槽,东亚中纬度盛行平直西风气流,西风急流分为南北两支,北支急流位于 50°~55°N,这支西风锋区引导冷空气东移后从华北南下,使河套地区位于地面冷高压后部并形成回流天气。南支西风锋区位于 40°N 附近,威海到巴尔喀什湖低槽不断分裂短波槽经高原东移并得到发展,西太平洋副热带高压脊线位于 27°N 附近,588 dagpm 特征线西脊点位于 110°E 以西。强大而稳定的副热带高压既使得来自于巴尔喀什湖经高原东移南下的冷空气受阻于秦岭山脉附近,同时其外围西南暖湿气流也为秦岭地区降水提供充足水汽,从而产生了该地区持续阴雨天气。

4.2 欧亚两槽一脊型

西西伯利亚为阻塞高压 (图 7b),切断低压位于巴尔喀什湖附近,乌拉尔山和贝加尔湖为长波槽区,东亚西风锋区分为两支,北支急流位于 50°~55°N,南支西风锋区位于 40°N 附近,巴尔喀什湖附近的低槽不断分裂短波槽东移,这时西太平洋副热带高压强大而稳定,受西太平洋副热带高压的阻挡,东移的西风槽移速减慢,冷暖空气频繁交汇于秦岭山脉附近,形成了该地区持续阴雨天气。

4.3 欧亚两脊一槽型

中高纬度乌拉尔山以西和贝加尔湖以东为长波脊 (图 7c),贝加尔湖到中亚为长波槽区,东亚西风锋区在 40°N 附近加强并维持,贝加尔湖低压底部平直西风气流中不断有短波槽东移影响陕西南部,秦岭地区阴雨天气持续,这时弱西太平洋副热带高压

图7 秦岭地区秋季典型连阴雨的环流形势 (a) 乌山阻高型; (b) 欧亚两槽一脊型; (c) 欧亚两脊一槽型
Fig 7 Circulation pattern of representative consecutive rain in Qinling (a) blocking pattern in Ural Mountain;
(b) two troughs and one ridge pattern in Europe and Asia; (c) two ridges and one trough pattern in Europe and Asia

加强西伸或南海高压加强时,也会有暴雨天气。

5 小 结

(1) 秦岭地区秋季降水占年降水的百分率高,是华西秋雨最为明显的区域之一。其秋季降水分布呈南多北少,秦巴山区多,汉水谷地和渭河平原少的特征。

(2) 秦岭地区秋季降水的气候变化具有明显年代际特征,1960s后期、1970s和1980s初秋季降水明显偏多,而1950s和1960s初前期、1980s中后期和1990s秋季降水异常偏少,进入2000年后秋季降水有增多的趋势。

(3) 秦岭地区秋季降水的气候变化有减少的趋势,以六盘山和巴山附近减少最为明显。特别是的六盘山区秋季降水本来就稀少,降水的减少进一步加剧了该地区秋季干旱。

(4) 秦岭地区秋季雨涝年的环流特征为,位于高原北侧高空西风急流偏强,乌拉尔山长波脊和西太平洋副热带高压偏强,亚洲夏季风活跃,东南风气流和西南风气流为秦岭地区输送了大量的水汽;而干旱少雨年则为高空西风急流偏弱,秦岭地区受青藏高原高压控制或西北气流控制,与东亚冬季风有关的偏北气流控制了秦岭地区。

(5) 连阴雨作为秦岭地区秋季典型降水天气过程,具有持续时间长,雨量大,暴雨站次多的特点。其发生在欧亚中纬度稳定的阻塞高压或长波脊,西太平洋副热带高压稳定少动的大尺度环流形势下,低层东南风气流和西南风气流输送了充足的水汽。

参 考 文 献

[1] 高由禧. 我国的秋雨现象. 气象学报, 1958, 29(4): 264-270.
[2] 徐桂玉, 林育春. 华西秋雨特征及成因探讨. 气象科学, 1994,

12(4): 149-154.
[3] 刘富明. 大气环流由夏到秋的转变及四川秋雨形成的原因. 四川气象, 1982, 2(1): 35-38.
[4] 林纾, 章克俭. 西北地区中东部 2000 年与 2001 年秋季连阴雨分析. 气象, 2003, 29(2): 34-38.
[5] 方建刚, 白爱娟, 陶建玲, 等. 2003 年陕西秋季连阴雨降水特点及环流条件分析. 应用气象学报, 2005, 16(4): 509-517.
[6] 方建刚, 张弘, 白爱娟, 等. 陕西强连阴雨天气个例的综合分析. 气象科学, 2005, 26(5): 578-585.
[7] 施能, 朱乾根. 北半球大气环流的特征量的长期趋势及年代际变化. 南京气象学院学报, 1996, 19(3): 283-289.
[8] 白爱娟, 方建刚. 近 50a 陕西省冬季气候变化特征及其与北半球大气环流的关系. 气象科学, 2003, 23(2): 176-184.
[9] 刘毅, 何金海, 王黎娟. 近 40 年重庆地区夏季降水的气候特征. 气象科学, 2005, 25(5): 490-498.
[10] 李耀辉, 李栋梁, 肇庆云. 中国西北地区秋季降水异常的特征分析. 高原气象, 2001, 20(2): 158-164.
[11] 白爱娟, 施能, 方建刚. 陕西省降水量变化的区域特征分析. 高原气象, 2005, 24(4): 636-641.
[12] 刘宣飞, 袁慧珍. ENSO 对印度洋偶极子与中国秋季降水的关系. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 644-649.
[13] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322-330.
[14] 谌芸, 施能. 我国秋季降水、温度的时空分布特征及气候变化. 南京气象学院学报, 2003, 26(5): 622-630.
[15] 郑广芬, 陈晓广, 孙银川, 等. 宁夏气温、降水、蒸发对全球气候变暖的响应. 气象科学, 2006, 26(4): 412-421.
[16] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究. 应用气象学报, 1997, 8(1): 26-32.
[17] 张存杰, 王宝灵, 刘德祥, 等. 西北地区干旱指标的初步研究. 高原气象, 1998, 17(4): 381-389.
[18] 白爱娟, 翟盘茂. 中国近百年气候变化的自然原因讨论. 气象科学, 2007, 27(5): 584-590.
[19] 鲍媛媛, 阿布力米提, 李峰, 等. 2001 年华西秋雨的时空分布的特点及其成因分析. 应用气象学报, 2003, 14(2): 215-222.
[20] 徐传书, 张耀存. 秦岭山区一次冷空气过程的数值模拟. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 239-245.