

张英华,尚可政,王式功,等. 高空槽强度指数的构建及其定量化研究[J]. 干旱气象, 2014, 32(2): 169-174. [ZHANG Yinghua, SHANG Kezheng, WANG Shigong, et al. The Construction and Quantitative Study of Upper-Level Trough Strength Index[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(2): 169-174], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-02-0169

高空槽强度指数的构建及其定量化研究

张英华^{1,2}, 尚可政¹, 王式功¹, 李德帅¹, 叶培龙¹

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州 730000, 2. 中国人民解放军94582部队气象台, 河南 驻马店 463200)

摘要:利用2002~2010年25°N~35°N, 110°E~120°E范围内的NCEP 1°×1° 500 hPa高度场、涡度场和风场6 h再分析资料, 运用层次分析法, 构建出高空槽强度指数 *TSI*。结果表明, *TSI* 的大小与槽强度有很好的—致性, 即 *TSI* 越大槽越强。 *TSI* 不仅对槽有较好的指示意义, 对脊也有一定的指示意义。其中当 *TSI* > 0.6 时, 高空槽在该区域较明显; 0.35 ≤ *TSI* ≤ 0.6 时, 槽脊都不明显, 即主要表现为一致的西风环流; *TSI* < 0.35 时, 高空脊较为明显。利用2011年的数据对该指数进行检验, 检验效果较好。另外, 定量分析较强高空槽 (*TSI* ≥ 0.6) 的月分布规律发现, 较强槽冬季较多而夏季较少。

关键词:高空槽; *TSI*; 层次分析法; 检验; 月分布

文章编号:1006-7639(2014)-02-0169-06 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-02-0169

中图分类号:P434

文献标识码:A

引言

高空槽是气象学中最基本和最重要的天气系统之一, 它与许多重要天气过程和天气现象密切相关^[1-6], 其位置和强度往往是业务预报过程中重点关注的对象。如孙云等^[7]分析了2012年7月石家庄的一次暴雨过程是受到稳定副高的阻挡影响, 西风槽在东移过程中向北移动, 低层西南气流中产生暖性切变线, 切变线北部激发的强降水云团造成了石家庄的暴雨天气; 闫军等^[8]分析了2011年5月宁夏夏旱首场透雨过程中, 水汽主要来源于孟加拉湾及南海地区, 孟加拉湾低槽的建立与东移西风槽的同位向叠加、700 hPa低涡发展东移、低层偏南急流的建立和水汽输送是久旱转透雨的主要条件和影响系统。然而长期以来, 关于槽“强度”的概念模糊, 没有一个统一明确的定义; 加之槽的不规则性和易变性, 难以对其进行系统量化的统计分析。

目前, 关于高空槽强度的研究多以槽常年存在的区域如南支槽、东亚大槽等开展研究的, 这些区域高空槽的存在及变化都比较典型, 运用单一的指标即可较好地表征槽的年际或年代际强度及其变化。如, 张永莉等^[9]用15°N~27.5°N, 80°E~100°E范

围内的平均500 hPa位势高度场作为冬半年南支槽强度指数来衡量该年南支槽的强弱, 南支槽指数值大, 表示该年南支槽比较弱, 反之亦然; 杨桂英等^[10]沿槽线在35°N~55°N范围内每隔5个纬度的高度值之和减去最大高度值与最小高度值之差作为计算东亚大槽强度的公式; 高建芸等^[11]以5°N~25°N, 105°E~160°E区域内850 hPa平均相对涡度值描述南海—西太平洋季风槽强度。

然而, 无论是仅用高度场还是涡度场来表征槽强度, 均有一定的局限性。如, 若仅用高度场表征低槽, 有时研究区域内高度场负距平值不大, 但槽很明显; 若用涡度场来表征, 如果该区域有台风, 则涡度很低, 会被判断为有槽, 而台风很显然不能视为低槽。天气学中, 高度场、涡度场、风场对高空槽都有一定的指示意义。为了使表征高空槽强度的指标具有更好的普适性, 有必要构建一个包括高度场、涡度场和风场等因子在内的逐日甚至逐时次的综合槽强度指数 *TSI* (Trough Strength Index)。

1 资料与处理

1.1 资料

经统计发现, 25°N~35°N, 110°E~120°E区域

收稿日期: 2013-08-18; 改回日期: 2013-10-20

基金项目: 国家公益性(气象)行业专项项目(GYHY201206004)、甘肃省国际科技合作计划项目(1204WCGA016)、国家自然科学基金青年基金项目(41105109)和兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2013-m03)共同资助

作者简介: 张英华(1989-), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 主要从事现代天气预报技术和极端天气气候的研究。E-mail: zhangyh12@lzu.edu.cn

内的降水、强对流等天气受槽的影响较为明显;同时,该区域平均海拔较低,高空槽的演变受地形影响相对较小,且与东亚大槽、南支槽等有大槽经常活动的区域不同,研究结果更具有普遍意义,因此本文选定该区域作为试验区。

本文基于 2002 ~ 2010 年的 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 500 hPa 高度场、涡度场和风场 6 h 再分析资料,构建 TSI 指数。在此基础上,利用 2011 年的 NCEP 资料进行检验。

1.2 资料处理

1.2.1 高度场和涡度场

对研究区 121 个格点 500 hPa 的高度值、涡度值分别取平均,得到该区域内各时次平均高度和涡度值。由于高度值随季节的变化十分明显,在此要除去季节背景的影响。为此,取其前后各 4 个时次共 9 个时次进行平均,再进行多年平均,从而得到一年中每个时次平均值(平年没有 2 月 29 日,这一天的 4 个时次,用 2 月 28 日和 3 月 1 日的值进行插补)。然后,将原始值减去对应的平均值,得到距平值。高空槽过境时,高度距平为负值,且负值越大,表明槽越强,为了使用方便,取其相反数。

1.2.2 高度场梯度

另外,用 25°N 各格点上的高度值减去 35°N 对应各格点上的高度值,并取其平均,得到高度场平均梯度。由于高度场梯度同样存在明显的季节变化,冬季高度场梯度整体上强于夏季,因此用上述同样处理方法,得到平均高度场梯度距平。

1.2.3 经向风切变

风切变方面,为简单起见,以 115°E 经线为中轴,各纬度上 $116^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ 各格点的经向风分量分别减去 $110^\circ\text{E} \sim 114^\circ\text{E}$ 各格点的经向风分量,将这 5 个值进行平均,这其实相当于将 115°E 经线以东同纬度各格点的平均值减去该经线以西各格点平均值,然后将 11 个纬度上的值平均,得到平均的经向风切变。

1.2.4 标准化处理

为了使数据在 0 ~ 1 之间,对其进行了标准化处理,其公式如下:

$$\dot{x} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

式(1)中, x 为原始数据; x_{\max} 和 x_{\min} 分别为数据序列的最大值和最小值; \dot{x} 为标准化后的值。

2 高空槽强度指数的构建

采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 构建槽强度指数 (TSI), AHP^[12-13] 是由美国运筹学家 Saaty 教授于 20 世纪 70 年代初提出的,他将与决策有关的元素分解成目标、准则、方案等层次,在此基础上进行定性和定量分析。该方法是根据对一定客观现实的主观判断结构(主要是两两比较),将同一层次元素两两比较其重要性而进行的定量描述,而后利用数学方法计算该层次元素相对重要性的权重值,从而构建所需的指标。如杜子璇等^[14]利用层次分析法研究了下垫面因子对沙尘暴危险度的影响;姜大海等^[15]运用层次分析法构建出了沙尘暴危险度的公式,对沙尘暴危险度进行了定量化研究,取得了较好的效果。

常用的层次分析法是将研究对象分成了若干层次,但本文只研究一层。具体步骤为:

(1) 比较上述 4 个因子之间的相对重要性,构建判断矩阵

从 2002 ~ 2010 年 NCEP 资料中挑选出了槽较为明显的 150 个时次,计算其标准化后的平均高度场 h 、平均高度场梯度 Δh 、平均涡度 vor 和平均经向风切变 ws ;然后分别将这 150 个值平均,得出各个因子的平均值,值越大表明该因子对槽的影响越重要;最后将各因子平均值进行两两比较,确定其相对重要性,两两比较的依据采用 Saaty 1 ~ 9 标度法,如表 1 所示。

表 1 Saaty 1 ~ 9 标度法

Tab. 1 The 1 - 9 scaling method of Saaty

| 因素/因素 | 量化值 |
|------------|------------|
| 同等重要 | 1 |
| 稍微重要 | 3 |
| 较强重要 | 5 |
| 强烈重要 | 7 |
| 极端重要 | 9 |
| 2 相邻判断的中间值 | 2, 4, 6, 8 |

需要说明的是:若 i 与 j 比较的判断为 a_{ij} , 则 j 与 i 比较的判断为 $a_{ji} = 1/a_{ij}$ 。依据表 1 规则,得到判断矩阵(表 2)。

表 2 判断矩阵
Tab.2 Judgment matrix

| | <i>h</i> | Δh | <i>vor</i> | <i>ws</i> |
|------------|----------|------------|------------|-----------|
| <i>h</i> | 1 | 4 | 2 | 3 |
| Δh | 1/4 | 1 | 1/3 | 1/2 |
| <i>vor</i> | 1/2 | 3 | 1 | 2 |
| <i>ws</i> | 1/3 | 2 | 1/2 | 1 |

(2) 检验判断矩阵的一致性

层次分析法要求判断矩阵具有满意的一致性,以适应各种复杂系统。检验方法是定义一致性比率,其表达式如下:

$$CR = CI/RI \quad (2)$$

其中:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中,*CI* 表示判断矩阵不一致性的指标,*CI* 越接近于 0,矩阵的一致性越好;*RI* 表示随机一致性指标,一般认为 $CR < 0.1$ 时满足一致性; λ 为判断矩阵最大特征值,*n* 为判断矩阵阶数,其中随机一致性指标 *RI* 与判断矩阵阶数 *n* 的关系如表 3。经计算,最终得到 $CR = 0.015 < 0.1$,判断矩阵通过一致性检验。

表 3 随机一致性指标 *RI* 与判断矩阵阶数 *n* 的关系

Tab.3 Relationship between random consistency index *RI* and judgment matrix order number *n*

| <i>n</i> | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| <i>RI</i> | 0 | 0 | 0.58 | 0.9 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.45 | 1.49 |

(3) 各因子权重的计算

将判断矩阵每一列进行归一化处理见公式(4),得到归一化后的判断矩阵(表 4)。

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

表 4 归一化后的判断矩阵
Tab.4 Normalized judgment matrix

| | <i>h</i> | Δh | <i>vor</i> | <i>ws</i> |
|------------|----------|------------|------------|-----------|
| <i>h</i> | 0.48 | 0.4 | 0.5271 | 0.4615 |
| Δh | 0.12 | 0.1 | 0.087 | 0.0769 |
| <i>vor</i> | 0.24 | 0.3 | 0.2609 | 0.3077 |
| <i>ws</i> | 0.16 | 0.2 | 0.1304 | 0.1538 |

将每一列经归一化后的判断矩阵按行相加:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij}, j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$\bar{W} = [1.8632, 0.3840, 1.1088, 0.6440]^T$
将 \bar{W} 归一化处理:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{i=1}^n \bar{W}_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

得到: $W_1 = 0.4658, W_2 = 0.096, W_3 = 0.2772, W_4 = 0.161$, 即 $W = [0.4658, 0.096, 0.2772, 0.161]^T$ 为所求的特征向量,其中平均高度场、平均高度场梯度、平均涡度场和平均经向风切变对槽强度指数 *TSI* 的权重分别为 0.4658、0.096、0.2772、0.161,从而得到高空槽强度指数公式:

$$TSI = 0.4658h + 0.096\Delta h + 0.2772vor + 0.161ws \quad (7)$$

式(7)中,*h* 为平均高度场, Δh 为平均高度场梯度,*vor* 为平均涡度场,*ws* 为平均经向风切变;*TSI* 的值在 0~1 之间。

由于高空槽是关于等高线的一种描述,因此在公式(7)中,高度场的权重系数最大,几乎占到一半,另外由于高度场梯度、涡度场、风切变等物理量对高空槽也有一定的指示意义,是作为对高度场的一种修正。*TSI* 其实是反映高空槽对所研究区域的影响大小,而非槽本身的强度大小,若高空槽很强,但距离研究区较远,那么 *TSI* 也会较小。

根据公式(7)计算 2002~2010 年各时次的 *TSI*,并与天气图进行对比,发现 *TSI* 的大小与槽强度有很好的 consistency, *TSI* 越大槽越强; *TSI* 对低压中心也能反映出来,这从 *TSI* 的定义来看是合理的,况且低槽和低压中心并不互相对立,二者经常相伴出现;另外, *TSI* 对脊或高压中心也有一定的指示意义(表 5)。

表 5 *TSI* 与槽脊的关系
Tab. 5 The relationship between *TSI*
and upper-level trough and ridge

| <i>TSI</i> | 槽脊的表现 |
|------------|------------------------|
| >0.6 | 槽或低压中心较为明显 |
| 0.35 ~ 0.6 | 槽脊或高低压中心都不明显,主要表现为西风环流 |
| <0.35 | 脊或高压中心较为明显 |

3 高空槽强度指数的意义

TSI 是关于高度场、高度场梯度、涡度场和风场 4 个因子的综合指数,很多情况下,它的大小与高度场和涡度场有很好的对应关系,即当高度场和涡度场较强时,*TSI* 也较大。然而在某些情况下,与仅用高度场或涡度场表征槽强度相比,*TSI* 具有积极的修正作用。下面以 2 个个例进行说明。

3.1 *TSI* 与涡度场相比

以 2005 年 7 月 20 日 00~12 时为例,在此时段内,有一台风登陆广东、湖南区域,其范围涉及到本文所研究的范围,由于台风的影响,00、06、12 时 3 个时次的涡度较大,都达到了 $2.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上,但 *TSI* 较小(表 6)。根据统计结果,通常这样大的涡度情况下,*TSI* 在 0.6 以上,即槽较为明显,但由于 *TSI* 中其他几个因子的修正作用,使得 *TSI* 不至于太大,这几个时次的 *TSI* 都没有达到 0.6,对实际情况的描述较为客观。

表 6 2005 年 7 月 20 日 00、06、12 时(UTC)
500 hPa 平均涡度和 *TSI*

| 时次 | 平均涡度/ 10^{-5} s^{-1} | <i>TSI</i> |
|-------|--------------------------------|------------|
| 00:00 | 2.463 | 0.572 |
| 06:00 | 2.719 | 0.584 |
| 12:00 | 2.736 | 0.587 |

3.2 *TSI* 与高度场相比

以 2006 年 4 月 10 日 00 时和 06 时为例,这 2 个时次的平均高度场距平绝对值不大(表 7),但实况显示该区域内有很明显的高空槽过境,*TSI* 指数均超过了 0.6,因此 *TSI* 指数对槽的反映比较客观。

表 7 2006 年 4 月 10 日 00 时和 06 时(UTC)
500 hPa 平均高度场距平和 *TSI*

| 时次 | 平均高度场距平/dagpm | <i>TSI</i> |
|-------|---------------|------------|
| 00:00 | -3.817 | 0.633 |
| 06:00 | -4.345 | 0.657 |

4 *TSI* 检验

利用 2011 年的数据对构建的 *TSI* 进行检验。经计算,2011 年的 *TSI* 与 500 hPa 槽在 $25^{\circ} \text{N} \sim 35^{\circ} \text{N}, 110^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{E}$ 范围内的强弱有较好的对应关系。以 2011 年 10 月 14 日 06 时至 15 日 06 时为例(图 1),14 日 06 时和 12 时研究区位于槽前,*TSI* 较小;14 日 18 时和 15 日 00 时,低槽过境,*TSI* 最大;15 日 06 时已位于槽后,*TSI* 减小(表 8)。

表 8 2011 年 10 月 14 日 06 时至
15 日 06 时(世界时) *TSI* 值

| 时次 | <i>TSI</i> |
|-----------|------------|
| 14 日 06 时 | 0.597 |
| 14 日 12 时 | 0.606 |
| 14 日 18 时 | 0.690 |
| 15 日 00 时 | 0.679 |
| 15 日 06 时 | 0.586 |

5 较强高空槽的月际分布

高空槽分布具有较明显的月变化特征,通常冬季强槽较多、夏季强槽较少。对 2002~2010 年研究区域内每天 4 个时次 $TSI \geq 0.6$ 的高空槽按月份进行统计(图 2),以便了解及掌握该地区大气环流的月变化特征。由图 2 可见,较强高空槽的月分布规律很明显,冬季较多,夏季较少,最多的是 1 月,为 115 次;最少的是 7 月,仅为 15 次,这符合一般规律。

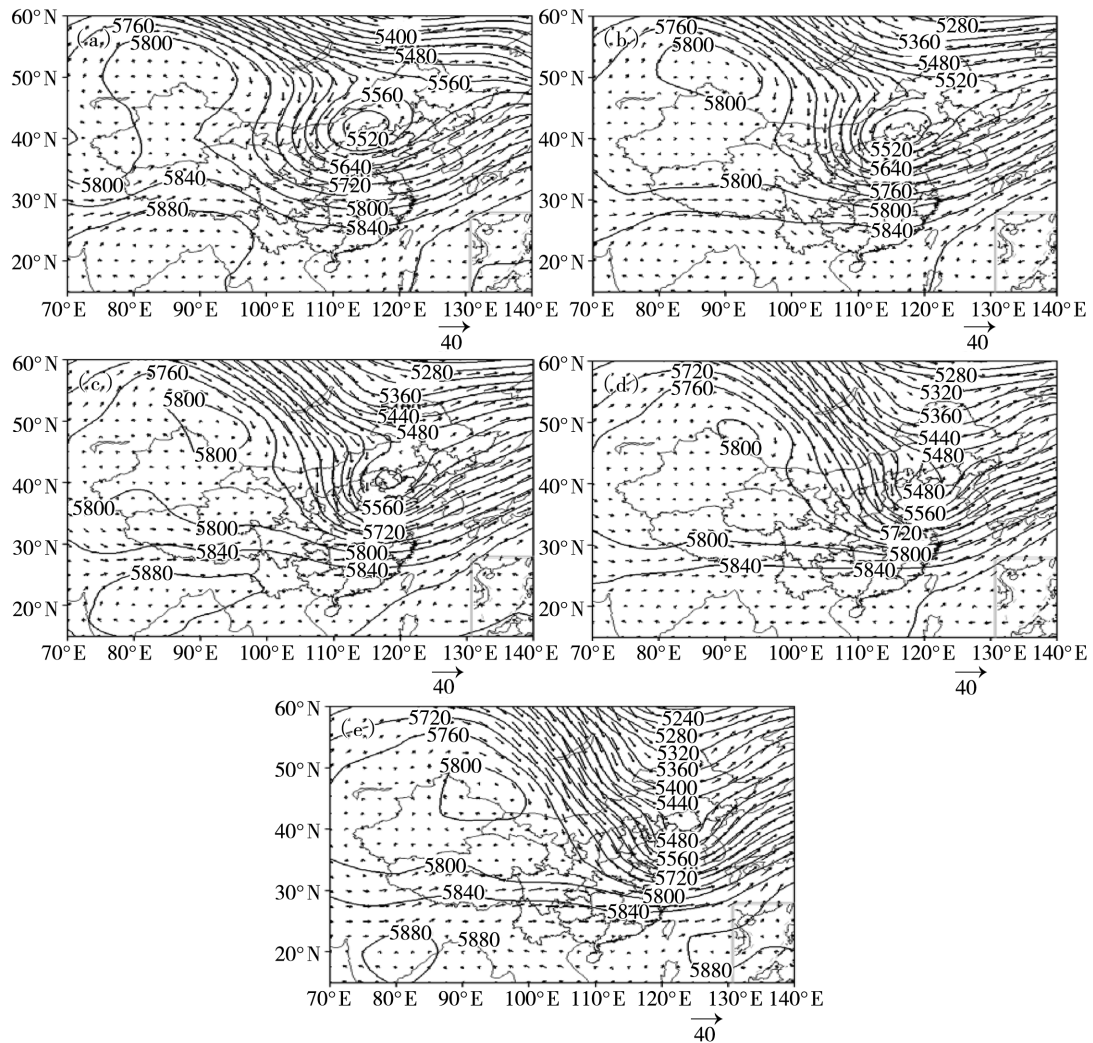


图1 2011年10月14日06时至15日06时(世界时)500 hPa 高度场和风场
 (a)14日06时;(b)14日12时;(c)14日18时;(d)15日00时;(e)15日06时

Fig.1 The 500 hPa height and wind fields distribution from
 06:00 October 14 to 06:00 UTC October 15, 2011

(a) 06:00 October 14; (b) 12:00 October 14; (c) 18:00 October 14;
 (d) 00:00 October 15; (e) 06:00 October 15

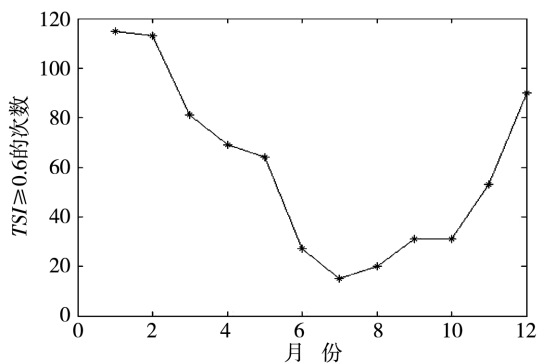


图2 2002~2010年 $TSI \geq 0.6$ 的500 hPa 高空槽月分布
 Fig.2 Monthly distribution of the 500 hPa upper - level
 trough frequency with TSI more than 0.6 from 2002 to 2010

6 结论与讨论

(1) TSI 的构建具有一定的适用性,与天气图上的高空槽吻合较好,它的大小能够反映研究区高空槽的强弱,且检验效果较好。

(2) TSI 与仅用高度场或涡度场表征高空槽强度相比,具有一定的优越性,它在某些特殊天气形势下可以修正这些指标中一些不合理的因素,对高空低槽的反映更加客观地接近事实。

(3) 经定量统计,较强高空槽 ($TSI \geq 0.6$) 的月分布较明显,1月最多,7月最少。

由于本文仅定义了 $25^{\circ}N \sim 35^{\circ}N, 110^{\circ}E \sim 120^{\circ}E$ 范围内的槽强度指数,且定义时仅考虑了高度场、高

度场梯度、涡度场和风场 4 个因子,故存在一定的局限性;另外,定义的槽强度是静态的,且范围较大,一些小槽和倒槽难以反映出来,下一步应考虑小范围甚至是单点的槽强度研究,从而使其不仅具有描述意义,还有预测意义;再者,当槽强度指数的研究更加成熟和可靠时,可以结合其他一些指标做进一步的研究。

参考文献:

- [1] 李佩,徐海明. 西风带高空槽对登陆我国变性热带气旋的影响及其机理研究[J]. 大气科学,2012,36(3):607-618.
- [2] 许炳南. 北半球两大长波槽的异常变化与贵州夏旱[J]. 成都气象学院学报,1999,14(1):26-31.
- [3] Robert W. Upper-level structure of the formative tropical cyclone [J]. Monthly Weather Review,1966,94(1):9-18.
- [4] Ritchie E A, Elsberry R L. Simulations of the extratropical transition of tropical cyclones: phasing between the upper-level trough and tropical cyclones [J]. Monthly Weather Review, 2007, 135(3):862-876.
- [5] 曲晓黎,段宇辉,秦宝国,等. 河北省中南部一次 MCC 造成的暴雨过程分析[J]. 干旱气象,2011,29(1):69-74.
- [6] 李文莉,王宝鉴,吉慧敏,等. 河西干旱区短时强降水过程的中尺度分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):318-326.
- [7] 孙云,李国翠,常山英,等. 石家庄 2012 年夏季一次暴雨成因及可预报性分析[J]. 干旱气象,2013,31(2):378-382.
- [8] 闫军,聂晶鑫,辛尧胜,等. 2011 年 5 月宁夏久旱转透雨天气过程诊断[J]. 干旱气象,2013,31(2):348-353.
- [9] 张永莉,范广洲,周定文,等. 冬半年南支槽的气候特征分析[J]. 成都信息工程学院学报,2012,27(2):196-201.
- [10] 杨桂英,章淹. 冬季东亚大槽异常与 El Niño 的关系[J]. 应用气象学报,1999,5(1):114-118.
- [11] 高建芸,余锦华,张秀芝,等. 南海—西北太平洋季风槽强度变化的特征及其与热带气旋活动的关系[J]. 热带气象学报, 2011,27(1):63-73.
- [12] Saaty T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures [J]. Journal of Mathematical Psychology, 1997, 15(3):234-281.
- [13] 金菊良,魏一鸣,丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报,2004,3(3):65-70.
- [14] 杜子璇,李宁,刘忠阳,等. 层次分析法在下垫面因子影响沙尘暴危险度研究中的应用[J]. 干旱区地理,2007,30(2):184-188.
- [15] 姜大海,王式功,尚可政. 沙尘暴危险度的定量评估研究[J]. 中国沙漠,2011,31(6):1554-1562.

The Construction and Quantitative Study of Upper - Level Trough Strength Index

ZHANG Yinghua^{1,2}, SHANG Kezheng¹, WANG Shigong¹, LI Deshuai¹, YE Peilong¹

(1. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. Meteorological Observatory of 94582 Troop, the Chinese People's Liberation Army, Zhumadian 463200, China)

Abstract: Based on the 500 hPa vorticity, height and wind fields of NCEP reanalysis data with 6 hours temporal and $1^\circ \times 1^\circ$ spatial resolution over the region of $25^\circ\text{N} - 35^\circ\text{N}$, $110^\circ\text{E} - 120^\circ\text{E}$ from 2002 to 2010, the strength index of upper-level trough (*TSI*) was constructed by using analytic hierarchy process (AHP). The results show that there was a good consistency between *TSI* and trough strength, and the greater *TSI*, the stronger upper-level trough was. *TSI* had indicative significance not only for upper trough, but also for upper ridge. The upper-level trough was obvious when the value of *TSI* was greater than 0.6, but the trough and ridge were not apparent when the value of *TSI* was between 0.35 and 0.6 and the consistent westerly circulation was presented, and when the value of *TSI* was less than 0.35, the upper-level ridge was significant. In order to test *TSI*, the data in 2011 was imported into the formula of *TSI*, and the result was good. In addition, the strong upper-level trough with *TSI* greater than 0.6 had an obvious monthly change, and the amount of strong trough was more in winter and less in summer.

Key words: upper-level trough; *TSI*; AHP; test; monthly distribution