

# 1960~2011年中国陆地表层区域变动幅度与速率

吴绍洪<sup>①②\*</sup>, 刘文政<sup>①③④</sup>, 潘韬<sup>①②</sup>, 邓浩宇<sup>①③</sup>, 焦珂伟<sup>①③</sup>, 尹云鹤<sup>①②</sup>

① 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

② 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

③ 中国科学院大学, 北京 100049;

④ 山东师范大学山东省可持续发展研究中心, 济南 250014

\* 联系人, E-mail: wush@igsnr.ac.cn

2016-01-14 收稿, 2016-03-19 修回, 2016-03-21 接受, 2016-06-12 网络版发表

国家自然科学基金重点项目(41530749)、国家自然科学基金(41301092)、国家科技支撑计划(2012BAC19B10, 2013BAC03B04)和中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090307)资助

**摘要** 气候变化背景下, 陆地表层诸要素(如温度、水分、植被、土壤等)及其之间的相互影响和作用关系发生了显著变化, 进而可能引起集成地表关键要素而划分的区域格局呈现复杂的非线性动态变化特征, 深刻影响自然物候、农业生产布局等。然而, 对于过去50余年中国陆地表层区域变动的幅度和速率认识还不够量化。基于均一化的1960~2011年中国545个气象站点的逐日气温数据集, 选用日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的日数与积温等指标来分析中国自然带格局变化特征, 以每个自然带面积及平均纬度的变化表征陆地表层区域变动的幅度; 建立了一个表征区域界线移动速率的新指标, 研究了中国陆地表层区域格局及典型区域界线变动的幅度、趋势、速率与突变。结果表明: 20世纪60年代以来, 中国气候总体上存在由一个相对冷的时段(1960~1986年)进入一个相对暖的时段(1987~2011年)的变化特征, 推动了多数关键自然地带发生较为显著的向北移动倾向; 两个时段比较, 1987~2011年时段全国温度带普遍呈北移的趋势, 其中北亚热带北界和暖温带北界最为明显, 最大处可达200 km左右; 1960~2011年间亚热带北界东段北移 $1.386^{\circ}\text{N}$ ; 暖温带北界东段北移 $0.354^{\circ}\text{N}$ 。前者向北移动的速率为 $0.533^{\circ}/10\text{ a}$ ; 后者向北移动的速率为 $0.136^{\circ}/10\text{ a}$ 。突变分析显示, 从1996~1997年开始, 暖温带南界界线加快向北迁移; 区域的变化明显滞后于变暖时段, 在进入相对暖的大约10年之后, 区域才明显向北移动。气候变化在宏观地域系统的表现特征在结论中得到揭示, 可以为适应气候变化提供科学依据。

**关键词** 陆地表层区域, 关键界线, 幅度, 速率, 气候变化

陆地表层是下边界为土壤母质层, 上边界至大气对流层顶, 由众多要素(光、温、水、土、气、生等)通过一系列物理、化学、生物过程及其相互作用而形成的一个多要素、多过程、多尺度耦合的综合体, 是人类赖以生存和发展的环境<sup>[1,2]</sup>。陆地表层要素一直处于不断变化和动态平衡之中, 驱动着自然环境发生与发展。过去100多年(1880~2012年)间全球气温平均上升了 $0.85^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。中国近百年(1901~2011年)

地表面平均气温显示同样的趋势和特征<sup>[4,5]</sup>。气候、地貌、水文、土壤和植被状况的时空变化是导致陆地表层格局大尺度差异的主要驱动力<sup>[6]</sup>。其中, 气候变化的影响最为显著。气候要素的变化不仅直接导致地表水热格局的空间差异, 还将引起其他要素的协同响应, 进而对陆表格局与过程产生重要影响, 引起区域资源环境格局的改变。在全球增暖背景下, 开展陆地表层区域变动及关键界线对气候变化的响应研究,

**引用格式:** 吴绍洪, 刘文政, 潘韬, 等. 1960~2011年中国陆地表层区域变动幅度与速率. 科学通报, 2016, 61: 2187~2197

Wu S H, Liu W Z, Pan T, et al. Amplitude and velocity of the shifts in the Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2187~2197, doi: 10.1360/N972016-00051

具有重要的理论与实践意义。

一批学者进行了相关的研究。如：过去百年到未来百年，温度变化背景下，全球柯本气候类型发生变化且变化速率上升<sup>[7]</sup>；20世纪80年代以来中国东部中亚热带、北亚热带、暖温带、中温带和寒温带普遍北移，暖温带的移动幅度最大，南亚热带、边缘热带和我国西部地区气候带变化不大或略有南移<sup>[8]</sup>；从1951~1980至1981~2010年，中国的气候格局出现变化<sup>[9]</sup>，其中寒温带、暖温带、北亚热带、中亚热带和南亚热带的北界均发生北移，青藏高原上高原亚寒带缩小而高原温带扩大<sup>[10]</sup>；与1960~1989年时段相比，1980~2011年的华南地区中、南亚热带和边缘热带逐渐扩大，气候带整体北移并向高海拔扩张<sup>[11]</sup>；较之1967~1985年，1986~2007年豫西山地亚热带北界大幅度垂直上移，且东段的亚热带北界显著北移<sup>[12]</sup>；基于农业气候指标的分析显示1953~1984年北暖温带南界北移约250 km<sup>[13]</sup>；20世纪50年代至今，气候变暖使中国暖温带南界中东段向北推移幅度较大，到21世纪初向北已推移到35°N附近，较1951~1970年向北推移2~3个纬度<sup>[14]</sup>；暖温带南界位置的向北推移是对全球气候变暖的重要响应，将对我国农业布局和生态环境有重要影响。此外，也有一系列的研究预估在未来气候变化下温度带也具有普遍北移的趋势<sup>[15]</sup>；亚热带北界的位置平均约北移3个纬度<sup>[16]</sup>。

陆地表层区域变动的幅度和速率直接影响自然或人类社会经济系统对气候变化脆弱性与风险的时空格局。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)认为，气候变化脆弱性是指自然或社会系统容易遭受或没有能力应对气候变化(包括气候变率和极端气候事件)不利影响的程度，是某一系统气候的变率特征、幅度、变化速率及其敏感性和适应能力的函数<sup>[17]</sup>。气候变动的幅度过大、速率过快，均可能使生态系统与人类社会遭受不可逆的负面影响<sup>[18]</sup>。例如：古人类文明的衰落及历史朝代的变迁就可能是变化幅度过大、转变速率过快、持续时间较长的气候事件导致<sup>[19,20]</sup>；过去40年的快速升温已通过提高潜在蒸散使三江源区域径流量显著减小并发生了突变<sup>[21]</sup>；近40年来太湖气温上升速度加快，致使当地蓝藻的爆发<sup>[22]</sup>。不同的增温幅度对工、农业有不同程度的影响，从而波及国民经济各部门<sup>[23]</sup>。一定幅度内的气候变动(气温上升、降水增加)有助于提高中国粮食产量，但如果变动幅度过大则对粮食生产产生

抑制作用<sup>[24]</sup>。其中，中国北亚热带北界和中亚热带北界在近百年的变动幅度较大，已对其变动区域的农业生产稳定性产生了影响<sup>[25]</sup>。气候变化的趋势和波动特征还被用来作为气候变化模态划分的依据<sup>[26]</sup>。以往研究绝大多数针对气候要素变动幅度与趋势，而陆地表层区域格局在空间上的变动幅度与速率更应深入研究。实际上，对陆地表层区域变动的量化研究，也是区域应对气候变化的重要基础工作，可以为人类合理适应气候变化、采取趋利避害措施提供科学依据。

日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的日数与积温值是表征陆地表层区域自然地带的重要指标<sup>[27]</sup>，本文用其分析中国自然带格局变化特征，以每个自然带面积及其界线平均纬度的变化表征陆地表层区域变动的幅度，综合研究了中国陆地表层区域格局及典型区域界线变动的幅度、趋势、速率与突变。特别选取了对气候变化最为敏感的区域作为关键地理区域，对其南北界线的变动趋势和速率进行了详细讨论。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据

本文采用的气候资料为经过均一化的中国545个气象站点逐日气温数据集(1960~2011年)。该数据集利用序列均一化多元分析方法(Multiple Analysis of Series for Homogenization, MASH)，通过对比分析各站气温序列，消除原本受到台站迁址、观测仪器改变、要素计算法则变化、周边环境变化等非自然因素的影响，而导致观测资料的非均一性<sup>[28]</sup>。该数据可以更好地反映中国以及区域气候变化的实际状况。

### 1.2 方法

(i) 时段划分。距平是某一系列数值中的某一个数值与平均值的差，本研究的时段是1960~2011年。全国的年平均气温数据按照下式计算：

$$T_{ak} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m t_{kij}, \quad (1)$$

式中， $T_{ak}$ 为第 $k$ 年的全国平均气温( $^{\circ}\text{C}$ )； $n$ 为气象站点总数，这里为545； $m$ 为当年的天数； $t_{kij}$ 为第 $k$ 年第 $i$ 个站点第 $j$ 天的日均温( $^{\circ}\text{C}$ )。而在获得研究时段每年全国平均温度的基础上，按照下式计算各年平均气温的距平，作为分析各年相对于整个研究时段而言的

冷暖状况.

$$T_{dk} = T_{ak} - \frac{1}{q} \sum_{k=1}^q T_{ak}, \quad (2)$$

式中,  $T_{dk}$ 为1960~2011年中第 $k$ 年的平均气温与研究时段平均值距离( $^{\circ}\text{C}$ ),  $q$ 为研究时段总年数, 这里为52.

(ii) 自然地带划分的指标体系. 陆地表层区域格局是不同自然要素综合作用的结果, 中国陆地表层地域系统的一级表征单元是自然地带, 以温度为主导因素. 这也反映了气候要素变化是影响陆地表层地域分异的主要机制. 本研究参照生态地理区划中表征自然带划分的指标体系<sup>[29]</sup>, 选用日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的日数, 辅以积温值两个指标来分析中国自然带的格局变化特征, 并以此指标计算分析主要自然地带的变动速率和趋势气温. 具体指标见表1.

基于均一化的逐日气温数据集(1960~2011年), 首先计算5 d滑动平均气温(式(3)). 然后找出各站点每年5 d滑动平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的开始日期和结束日期, 选取5 d滑动均温中持续时间最长的时间, 统计初日和终日之间的日数, 作为各站点各年的日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的日数. 将这些天内的日滑动平均气温累加, 得到各站点各年的日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温总值(式(4)).

$$ts_i = \sum_{j=i}^{i+4} t_j, \quad (3)$$

式中,  $ts_i$ 为第 $i$ 个5 d平均滑动后的日均温( $^{\circ}\text{C}$ );  $t_j$ 为第 $j$ 天的日均温( $^{\circ}\text{C}$ ).

$$\text{AT} = \sum_{j=B}^E t_j, \quad (4)$$

表1 自然地带划分的指标体系

Table 1 Indicators for natural zone

温度带	日均温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$	
	日数(d)	积温值( $^{\circ}\text{C}$ )
寒温带	50~100	100~1700
中温带	100~170	1700~3200
暖温带	170~220	3200~4500
北亚热带	220~240	4500~5100
中亚热带	240~285	5100~6400
南亚热带	285~360	6400~8000
热带	>360	>8000
高原亚寒带	<50(青藏高原)	<100(青藏高原)
高原温带	>50(青藏高原)	>100(青藏高原)

式中, AT(accumulated temperature)为某站点当年的日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温( $^{\circ}\text{C}$ ),  $B$ 和 $E$ 分别为日平均气温 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的开始日期和结束日期.

(iii) 空间格局分析和关键界线变动的方法. 本文以区域北界的平均位置变动来表征地表格局的变动. 在确定气候因子变动时段后, 后一时段(T2)的所到达的范围与前一时段(T1)的区域差异为变动幅度, 两时段的平均变化为变率. 采用基于薄盘样条函数理论的专业气候数据空间插值工具ANUSPLIN进行插值<sup>[30,31]</sup>, 将各站点各指标的时间空间变化体现在全国地理分布格局上, 获得10 km分辨率的空间数据.

通过ArcGIS空间分析工具, 舍弃自然地带主体区域外的零散分布斑块, 得到全国自然地带在前后两个时间段上的空间格局及关键自然地带的界线. 并进一步计算敏感区域界线(亚热带北界、暖温带北界)逐年的平均纬度, 得出研究时段两个敏感区域界线南北移动的逐年变化时间序列. 受地形的影响, 积温日数和积温值的变化在山地部分不够明显, 本研究敏感性的区域主要体现在平原部分. 亚热带北界取 $110^{\circ}\text{E}$ 以东部分, 暖温带北界取 $115^{\circ}\text{E}$ 以东部分, 详细计算变动的幅度和速率. 本文建立自然地带“变动速率( $V$ )”算法作为表征自然带变化特征的关键指标. 自然地带的变动速率指每年(北-南)移动的纬度或距离(km). 具体计算方法如下式:

$$V = N/T = \frac{W_{T2} - W_{T1}}{T} = \frac{\frac{1}{T_2} \sum_{x=1}^{T_2} W_x - \frac{1}{T_1} \sum_{x=1}^{T_1} W_x}{T} = \frac{\frac{1}{T_2} \sum_{x=1}^{T_2} \left( \frac{1}{y} \sum_{j=1}^y W_{x,j} \right) - \frac{1}{T_1} \sum_{x=1}^{T_1} \left( \frac{1}{y} \sum_{j=1}^y W_{x,j} \right)}{T}, \quad (5)$$

式中,  $V$ 为变动速率( $^{\circ}/\text{a}$ );  $N$ 为变动幅度( $^{\circ}$ );  $T$ 为时段(1960~2011年), 此处 $T=26$ ;  $T_1$ , 前时段(1960~1986年);  $T_2$ 为后时段(1987~2011年);  $j$ 为经线;  $y$ 为经线数目;  $W_{x,j}$ 为 $x$ 年 $j$ 经线上温度带北界的纬度;  $W_x$ 为 $x$ 年温度带北界的平均纬度;  $W_T$ 为 $T$ 时段温度带北界的平均纬度.

(iv) 突变检验方法. 本研究采用有序聚类分析法进行敏感区域明显变动的突变检验, 该方法通过统计分析推估出给定时间序列最可能的突变点, 然后结合实际情况进行进一步分析, 是一种有效的统

计估计方法. 其主要的分割目的是使得同类之间的离差平方和最小, 而不同类之间的离差平方和最大<sup>[32]</sup>.

设可能的突变点为 $\tau$ , 则突变前后的离差平方和分别为

$$V_{\tau} = \sum_{i=1}^{\tau} (x_i - \bar{x}_{\tau})^2, \quad (6)$$

$$V_{n-\tau} = \sum_{i=\tau+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-\tau})^2, \quad (7)$$

式中,  $\bar{x}_{\tau}$  和  $\bar{x}_{n-\tau}$  分别为 $\tau$ 前后两部分的均值. 这样总离差的平方和为

$$S(\tau) = V_{\tau} + V_{n-\tau}. \quad (8)$$

那么当  $S = \min \{S_n(\tau)\} (2 \leq \tau \leq n-1)$  时,  $\tau$  为最优二分割, 即推断为突变点.

## 2 结果分析

### 2.1 1960~2011年冷暖状况

由式(1)和(2)计算1960~2011年全国年平均气温距平结果见图1. 最近52年全国气温呈显著上升趋势, 1960~1986年, 整个时段全国平均气温处于负距平的状况. 从1987年开始, 则这个时代全国平均气温呈现为正的距平状况. 明显地显示出一个相对冷的时段1960~1986年(T1), 和一个相对暖的阶段1987~2011年(T2).

### 2.2 中国陆地表层区域积温格局变化趋势

应用式(3)和(4)计算全国T1和T2两个阶段的积温

格局, 并根据表1的标准进行分级, 获得全国T1和T2两个时段的积温分布(温度带)格局(图2).

图2显示, T1与T2两个时间段相比, 除高原亚寒带外, 全国多数自然带界线均发生较为显著的向北移动. 其中亚热带北界北移最为明显, 暖温带北界也明显北移, 寒温带、南亚热带等的波动也较为显著.

本文通过ArcGIS空间分布功能计算两个时段不同积温格局的空间重心, 定量揭示不同自然带变动的幅度. 在9个温度带中, 北亚热带平均纬度的整体北移幅度最大, 为纬度1.263°; 暖温带、中亚热带、中温带和热带整体北移幅度次之, 分别为0.770°, 0.651°, 0.409°和0.334°; 南亚热带和寒温带北移不明显, 仅北移0.067和0.023个纬度. 各自然地带面积上增减趋势不一, 除寒温带和中温带面积缩减外, 其他自然带的面积都在增加, 其中北亚热带、南亚热带和中亚热带的面积增加相对较多, 分别为 $8.9 \times 10^4$ ,  $7.8 \times 10^4$ 和 $5.0 \times 10^4$  km<sup>2</sup>, 而热带和暖温带面积则增加不明显(表2和图2).

### 2.3 敏感区域界线变动幅度与速率

(i) 变动趋势. 前面的研究得到, 过去的52年中, 中国的气候总体状况可以分为一个相对较冷和一个相对较暖的时段; 从较冷到较暖的时段, 温度带的格局普遍有向北移动的趋势, 其中, 变化最敏感区域发生在亚热带北界和暖温带北界. 应用式(5)计算结果显示, 亚热带北界在112°E以东范围T2时段与T1时段相比, 大从位于33°N的南阳-驻马店-蚌埠一线, 北移至新乡-开封-徐州一线, 平均北移了1.386°, 幅

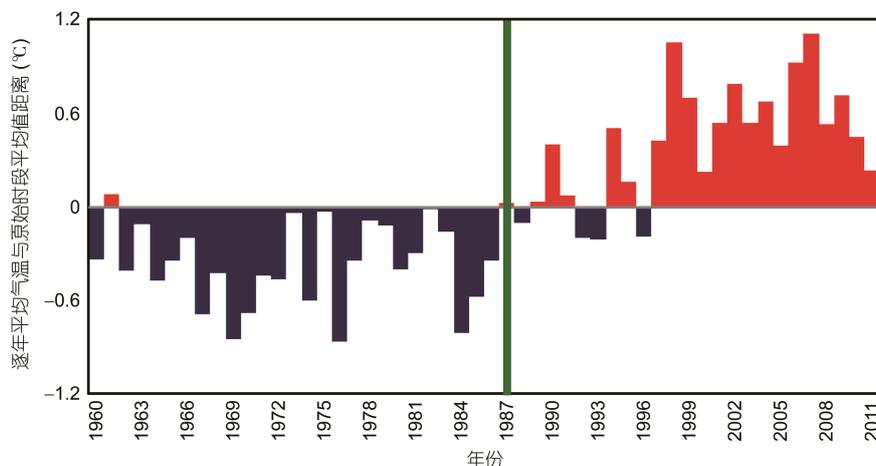


图1 1960~2011年全国逐年平均气温与研究时段平均值差  
Figure 1 Anomaly of mean temperature of China during 1960~2011

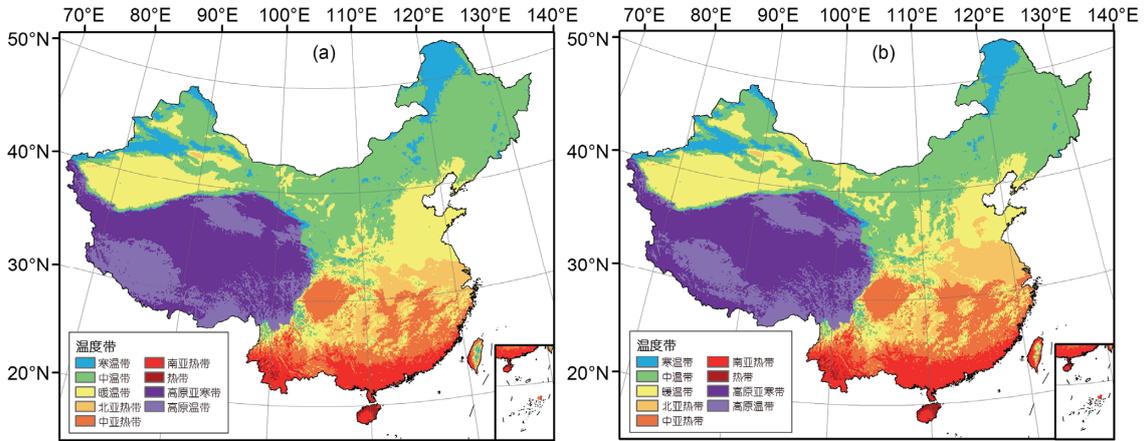


图2 T1与T2阶段全国陆地表层区域>10°C积温分布格局。(a) T1; (b) T2

Figure 2 >10°C accumulated temperature distribution for different zones during the two period (T1 and T2). (a) T1; (b) T2

表2 T1与T2阶段的全国陆地表层区域平均纬度和面积

Table 2 Mean latitude and total areas of different natural zones for T1 and T2 periods

温度带 (积温日数, d)	T1期 平均纬度	T2期 平均纬度	两期 纬度差	T1期面积 ( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )	T2期面积 ( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )	面积差 ( $\times 10^4 \text{ km}^2$ )
<100寒温带	45.950°	45.973°	0.023°	56.7	46.3	-10.5
100~170中温带	42.366°	42.776°	0.409°	269.7	257.1	-12.6
170~220暖温带	36.608°	37.377°	0.770°	175.8	176.3	0.5
220~240北亚热带	29.619°	30.881°	1.263°	62.7	71.7	8.9
240~285中亚热带	27.038°	27.689°	0.651°	79.9	84.9	5.0
285~360南亚热带	23.148°	23.216°	0.067°	46.3	54.2	7.8
>360热带	21.145°	21.480°	0.334°	3.1	3.9	0.8
>50高原温带	32.431°	32.657°	0.226°	94.7	91.0	-3.8
<50高原亚寒带	34.066°	33.911°	-0.155°	161.9	165.7	3.8

度大之处超过200 km左右(图3). 此区域西段由于地形原因变化不明显.

同样地, 按照式(5)计算, 暖温带北界东段(120°E以东), T1时段暖温带北界东段最北端位于阜新-彰武-沈阳一线, 而T2时段, 暖温带北界最大向北移动到宝国图-开原一线. 北移0.354°(图4).

(ii) 变动速率. 采用公式(5)计算亚热带北界东段的多年平均纬度位于33.82°N, 1960~2011年向北移动的平均速率为0.533°/10 a, 变化范围在-0.6°~0.4°/10 a(图5(a)).

同样地, 采用公式(5)计算暖温带北界东段的多年平均位置位于41.47°N, 1960~2011年期间其向北移动的平均速率为0.136°/10 a, 变化范围在-0.4°~0.9°/10 a(图5(b)).

## 2.4 敏感温度带北移突变性分析

敏感温度带变动的突变性指空间实质性变动的开始时间, 是时段交替、空间变化之外的又一个值得重点关注的问题. 本研究采用式(6)~(8)有序聚类分析法突变检验方法, 分别对亚热带北界和暖温带北界平均纬度的时间变化序列进行了突变点检测. 结果显示, 1996年是亚热带北界向北移动的突变年份(图6), 1996年之前呈不规则波动的趋势, 之后亚热带北界加快向北迁移. 而1997年是暖温带北界移动的突变时间点(图7), 其趋势同样出现先呈不规则波动中非显著向北移动的趋势, 在1997年之后, 加速向北移动.

## 3 讨论

以往研究尽管大多指出了中国自然地理地带随

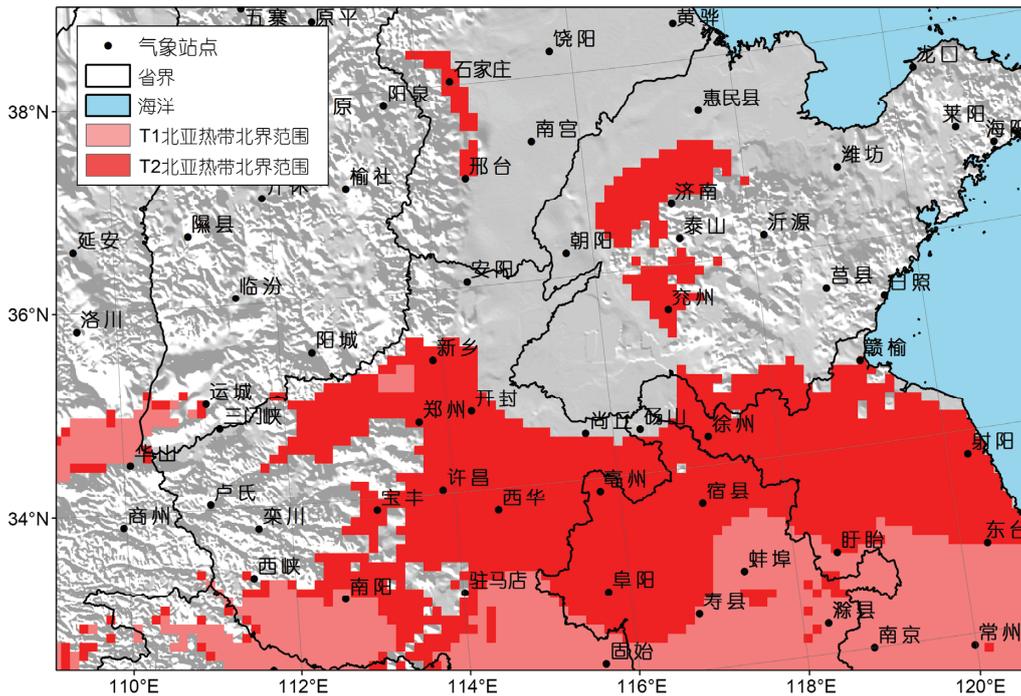


图3 亚热带北界变动范围  
Figure 3 Scope of subtropical zone shift

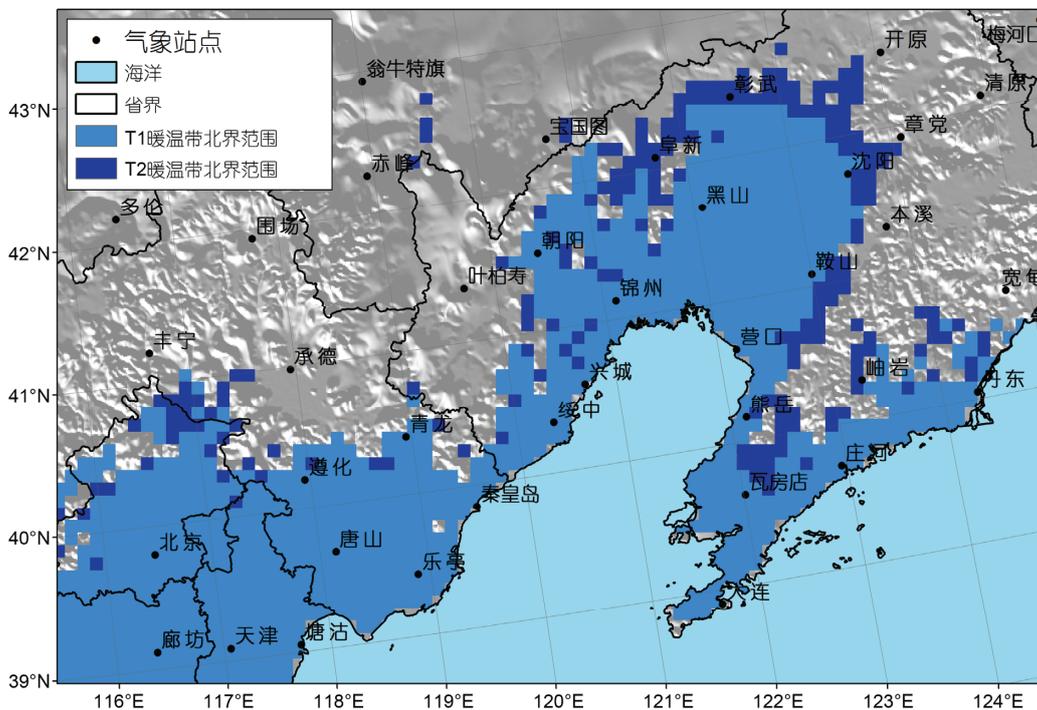


图4 暖温带北界变动范围  
Figure 4 Scope of warm-temperate zone shift

随着气候变暖有北移的趋势，部分研究也计算了局部区域的变化幅度，然而对于中国陆地表层区域整体

格局变化幅度、趋势的定量评价仍较少，特别是典型地带移动的速率及其对气候变化的响应研究不多见。

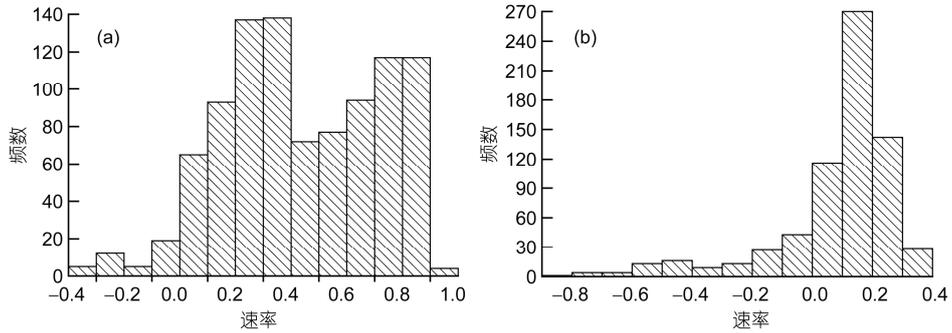


图5 亚热带北界(a)和暖温带北界(b)不同位置变动速率频率分布图  
Figure 5 Frequency distribution for shifting speed in different positions, subtropical (a), and warm-temperate (b)

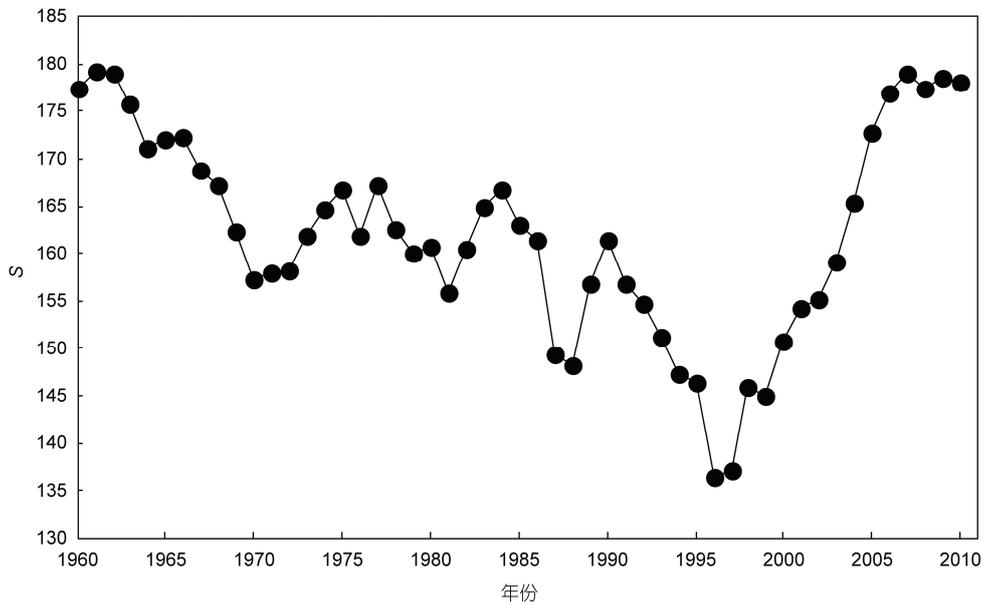


图6 亚热带北界位置变化聚类突变检验  
Figure 6 Clustering of mutations test for the northern subtropical boundary

本文基于中国过去52年气候要素的变化趋势与状况,揭示相对冷-暖的时段差异,对比分析了冷-暖阶段中国陆地表层区域的变动趋势、幅度、速率及突变,藉以明确地揭示陆地表层地域系统格局对气候变化的响应.整体上来看,中国陆地表层区域呈北移趋势与郑景云等人<sup>[9]</sup>、卞娟娟等人<sup>[10]</sup>的相关研究基本结论是一致的.然而,本研究进一步定量分析了1987~2011年段相对于1960~1986年段,中国东部季风区的温度带北移的幅度和速率,发现亚热带北界在过去52年间向北移动幅度最大,平均北移达 $1.386^{\circ}$ ,其移动速率约为 $0.533^{\circ}/10\text{ a}$ ;暖温带北界向北移动的幅度达 $0.354^{\circ}$ ,其北移速率约为 $0.136^{\circ}/10\text{ a}$ .陆地表层区域变动速率的研究结果,可以为未来中

国社会经济系统生产布局规划提供重要的基础.

通过有效聚类分析法检测了1960~2011年内亚热带北界和暖温带北界变化的突变点.由于存在明显的相对冷的和相对温暖的两个阶段,因此设定存在一个突变点 $\tau$ 是合理的.对于亚热带北界来说,有效聚类分析显示突变发生在1996年.尽管在1996年已经进入相对暖的阶段,但区域范围向北移动的趋势应该有一定的滞后;经过近10年之后,在1996年亚热带北界显著北移应该比较符合常理.对于暖温带北界来说,其北移的突变发生1997年,机理与亚热带北界的变化一致,只是时间上的微小差异.从图1的全国平均气温距平也可以看出,从1996,1997年开始,气温距平的波动性开始变弱,这与聚类分析的结果

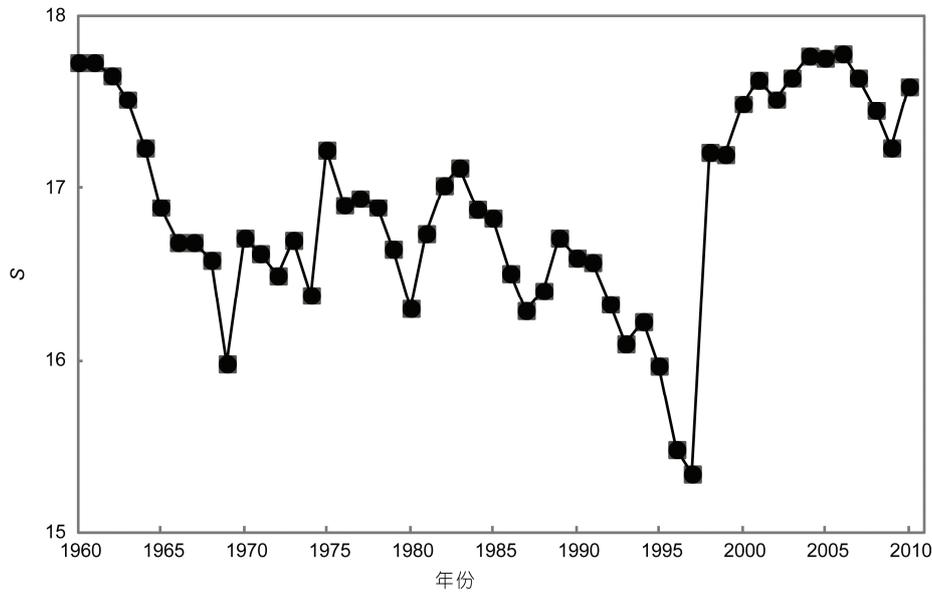


图7 暖温带北界位置变化聚类突变检验  
Figure 7 Clustering of mutations test for the northern warm temperate boundary

是一致的。

中国陆地表层区域格局随气候变化的变动，其结果必定会反映在物候、农业生产和植被功能变化上。国内物候学者的研究表明：20世纪80年代以后，中国的东北、华北、西北、长江下游地区与云西南部春季物候期提前<sup>[33,34]</sup>；1963~2009年期间东北地区和华北地区的典型植物始花期分别以 $-1.52 \text{ d}/10 \text{ a}$  ( $P < 0.01$ )和 $-2.22 \text{ d}/10 \text{ a}$  ( $P < 0.01$ )的速度提前<sup>[35]</sup>；利用采用物候过程模型重建的结果显示，自20世纪50年代以来，白蜡展叶始期在我国绝大部分地区提前，其提前趋势呈现“北高南低”的格局；特别是暖温带所在的 $30^\circ\text{N}$ 以北地区，普遍提前了8~16 d；而暖温带为主的华北区(京津冀、山西和山东)，白蜡树展叶始期提前的速率为 $2.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ ，是所有地区中白蜡树展叶始期变化最显著的地区<sup>[36]</sup>；1986~2005年中国温带旱柳平均展叶始期、开花始期和果实成熟期的发生日期分别以 $-4.2$ 、 $-3.8$ 和 $-3.3 \text{ d}/10 \text{ a}$ 的平均速率显著提前<sup>[37]</sup>；以上物候变化响应的空间格局与本文研究的暖温带变动有着相当的一致性。在过去的50年，气候变暖使得中国的种植制度界限发生不同程度的北移，有利于提高熟制变化区域内的粮食单产<sup>[38]</sup>。其中，中国粮食主产区的气候变化提高了作物的光照生产潜力和光温生产潜力<sup>[39]</sup>。此外，中国柑桔的种植界限在20世纪下半叶因气候变暖而显著北移，到达甘肃、陕西和

河南等地<sup>[40]</sup>。新闻曾经报道河南省柑桔种植获得大面积好收成(<http://henan.sina.com.cn/xy/news/z/2014-12-08/1010-6527.html>)，改变了橘在淮河以北为枳的格局等。中国陆地表层要素与格局在20世纪下半叶发生了显著变化，以增温为突出的特征，其响应亦为增温相关的正响应。如，植物物候始期在提前(末期在推迟)，农作物种植界线在北移等，与陆地表层区域的北移基本一致，相互印证。换句话说，全球增温可能导致陆地表层区域格局的变动，包括引起物候、农业生产甚至其他自然与社会经济系统空间布局的变化。在人类活动的影响下，植被、种植制度等可以随气候带的变化而变化。适应气候变化，需要进一步加强对气候变化导致的陆地表层地域系统变动的定量研究，从而采取合理有效的应对行动。

需要指出的是，陆地表层区域关键要素不仅包括气候，还包括地形、植被、土壤等。例如，在研究中发现，亚热带北界在 $112^\circ\text{E}$ 以东地区变动明显，而在 $112^\circ\text{E}$ 以西地区由于受山地地形的影响，并没有发生明显的北移。在地理学中，自然地带是包括温度、水分、植被、土壤、地形等多要素的综合系统，气候要素的变动往往是其他要素变动的主要驱动之一，进而引起整个系统的变动。然而，植被、土壤等要素的变动往往需要更长时间尺度，因此本研究中暂时主要关注气候要素的情况。

## 4 结论

(1) 20世纪60年代以来,中国气候总体上存在一个相对冷的时段T1(1960~1986年)和一个相对暖的时段T2(1987~2011年)。由于从相对冷进入到相对暖的状态,推动了多数关键自然地带发生较为显著的向北移动倾向。

(2) 在过去52年间,中国陆地表层区域整体格局

北移,亚热带北界北移最为明显,最大处可达200 km左右,暖温带北界也明显北移,寒温带、南亚热带等的波动也较为显著。亚热带北界平均北移 $1.386^{\circ}$ ,北移速率为 $0.533^{\circ}/10\text{ a}$ ;暖温带北界北移 $0.354^{\circ}$ ,北移速率为 $0.136^{\circ}/10\text{ a}$ 。

(3) 陆地表层区域格局的变化明显滞后于变暖时段,在进入相对暖的大约10年之后,区域才明显向北移动,突变(实质性变动)时间在1996~1997年。

**致谢** 中国科学院大气物理研究所严中伟研究员团队提供了均一化的中国545个气象站点逐日气温数据集(1960~2011年)。

## 参考文献

- Huang B W. On earth system science and sustainable development strategy (I) (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 1996, 51: 350–354 [黄秉维. 论地球系统科学与可持续发展战略科学基础(I). *地理学报*, 1996, 51: 350–354]
- Wu G H, Wang N A, Hu S X, et al. *Physical Geography* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2008 [伍光和王乃昂, 胡双熙, 等. *自然地理学*. 北京: 高等教育出版社, 2008]
- IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013
- Committee of “National Assessment Report on Climate Change (II)”. *National Assessment Report on Climate Change (II)* (in Chinese). Beijing: Science Press, 2009 [第二次气候变化国家评估报告编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2009]
- Li Q X, Dong W J, Li W, et al. Assessment of the uncertainties in temperature change in China during the last century (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2010, 55: 1544–1554 [李庆祥, 董文杰, 李伟, 等. 近百年中国气温变化中的不确定性估计. *科学通报*, 2010, 55: 1544–1554]
- Zheng D. *Ecogeographical Regionalization Research of China* (in Chinese). Beijing: The Commercial Press, 2008 [郑度. *中国生态地理区域系统研究*. 北京: 商务印书馆, 2008]
- Irina M, John S D, Susan S. Pace of shifts in climate regions increases with global temperature. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 739–743
- Sha W Y, Shao X M, Huang M. Climate warming and its impact on natural regional boundaries in China in the 1980s (in Chinese). *Sci China Ser D: Earth Sci*, 2002, 32: 317–326 [沙万英, 邵雪梅, 黄玫. 20世纪80年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 317–326]
- Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1951–1980 and 1981–2010 (in Chinese). *Geogr Res*, 2013, 32: 987–997 [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 中国1951~1980年及1981~2010年的气候区划. *地理研究*, 2013, 32: 987–997]
- Bian J J, Hao Z X, Zheng J Y, et al. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010 (in Chinese). *Geogr Res*, 2013, 32: 1179–1187 [卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 1951~2010年中国主要气候区划界线的移动. *地理研究*, 2013, 32: 1179–1187]
- Dai S P, Li H L, Luo H X, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  in Southern China from 1960 to 2011 (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2014, 69: 650–660 [戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 1960~2011年华南地区界限温度 $10^{\circ}\text{C}$ 积温时空变化分析. *地理学报*, 2014, 69: 650–660]
- Zhang J J, Wang Y S, Zhu L Q, et al. Study on change of northern subtropical border in mountainous regions in western Henan Province (in Chinese). *J Henan Univ (Nat Sci)*, 2016, 46: 40–49 [张静静, 王岩松, 朱连奇, 等. 近50年来豫西山地亚热带北界变化分析. *河南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46: 40–49]
- Zhu W M, Huang S X, Fan D G. Climate warming and climate zones moving north of the Jianghuai Region (in Chinese). *Quart J Appl Meteorol*, 1992, 3: 511–512 [朱维民, 黄世祥, 范东光. 江淮地区气候转暖与气候带北移. *应用气象学报*, 1992, 3: 511–512]
- Miao Q L, Ding Y Y, Wang Y. Impact of climate warming on the northern boundary of sub-tropical zone of China (in Chinese). *Geogr Res*, 2009, 28: 634–642 [缪启龙, 丁园园, 王勇. 气候变暖对中国亚热带北界位置的影响. *地理研究*, 2009, 28: 634–642]
- Loarie S R, Duffy P B, Hamilton H, et al. The velocity of climate change. *Nature*, 2009, 462: 1052–1055
- Shen X F, Ding Y G, Shi M S. Effect of global warming on change in northern limit of the subtropical zone of China (in Chinese). *J Nanjing Inst Meteorol*, 1996, 19: 108–111 [沈雪芳, 丁裕国, 石明生. 全球变暖对我国亚热带北界的影响. *南京气象学院学报*, 1996, 19: 108–111]
- IPCC. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2001
- Qin D H. Evolution of climate and environment in China (I) (in Chinese). *Resour Environ Dev*, 2007, 3: 1–4 [秦大河. *中国气候与环境*

- 演变(上). 资源环境与发展, 2007, 3: 1-4]
- 19 Wu W X, Hu Y, Zhou Y. Abrupt climate change and decline of ancient civilization (in Chinese). *J Palaeogeogr*, 2009, 11: 455-463 [吴文祥, 胡莹, 周扬. 气候突变与古文明衰落. 古地学报, 2009, 11: 455-463]
  - 20 Zhang D, Zhan Z Y, Lin C S, et al. The relationship for climate change and war, social unrest and dynasty changes in Chinese history (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2004, 49: 2468-2474 [章典, 詹志勇, 林初升, 等. 气候变化与中国的战争、社会动乱和朝代变迁. 科学通报, 2004, 49: 2468-2474]
  - 21 Zhang S F, Hua D, Meng X J, et al. Climate change and its driving effect on the runoff in the "Three-River Headwaters" region (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2011, 66: 13-24 [张士峰, 华东, 孟秀敬, 等. 三江源气候变化及其对径流的驱动分析. 地理学报, 2011, 66: 13-24]
  - 22 Shang Z T, Ren J, Qin M R, et al. Relationship between climatic change and cyanobacterial bloom in Taihu Lake (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2010, 29: 55-61 [商兆堂, 仁建, 秦铭荣, 等. 气候变化与太湖蓝藻爆发的关系. 生态学杂志, 2010, 29: 55-61]
  - 23 Zhang Y Q, Miao Q L. Research on input-output model of climate change on regional economy (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2001, 59: 633-640 [张永勤, 缪启龙. 气候变化对区域经济影响的投入-产出模型研究. 气象学报, 2001, 59: 633-640]
  - 24 Huang W, Deng X Z, He S J, et al. An econometric analysis on the impacts of climatic change on grain production at counties of China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2010, 29: 677-683 [黄维, 邓祥征, 何书金, 等. 中国气候变化对县域粮食产量影响的计量经济分析. 地理科学进展, 2010, 29: 677-683]
  - 25 Yang B, Li S K, Huo Z G. A study on the dynamic variation of the boundaries between agroclimatic zones and its influence on agricultural production in the subtropical region of China in the last hundred years (in Chinese). *J Nat Resour*, 1993, 8: 193-203 [杨柏, 李世奎, 霍治国. 近百年中国亚热带地区农业气候带界限动态变化及其对农业生产的影响. 自然资源学报, 1993, 8: 193-203]
  - 26 Shi P J, Sun S, Wang M, et al. Climate change regionalization in China (1961-2010). *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 2676-2689 [史培军, 孙劭, 汪明, 等. 中国气候变化区划(1961-2010年). 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 2294-2306]
  - 27 Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. The climate regionalization in China for 1981-2010 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3088-3099 [郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 1981-2010年中国气候区划. 科学通报, 2013, 58: 3088-3099]
  - 28 Yan Z W, Li Z, Xia J J. Homogenization of climate series: The basis for assessing climate changes. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 2891-2900 [严中伟, 李珍, 夏江江. 气候序列的均一化—定量评估气候变化的基础. 中国科学: 地球科学, 2014, 44: 2101-2111]
  - 29 Wu S H, Yang Q Y, Zheng D. An index system for boundaries of eco-geographical regions of China (in Chinese). *Prog Geogr*, 2002, 21: 302-310 [吴绍洪, 杨勤业, 郑度. 生态地理区域界线划分的指标体系. 地理科学进展, 2002, 21: 302-310]
  - 30 Hutchinson M F, Gessler P E. Splines: More than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 1994, 62: 45-67
  - 31 Hutchinson M F. The application of thin plate smoothing splines to continent-wide data assimilation. *Data Assimil Syst*, 1991, 27: 104-113
  - 32 Wang W S, Jin J L, Li Y Q, et al. Stochastic Simulation Techniques on Hydrology and Water Resource (in Chinese). Chengdu: Sichuan University Press, 2003 [王文圣, 金菊良, 李跃清, 等. 水文水资源随机模拟技术. 成都: 四川大学出版社, 2003]
  - 33 Zheng J Y, Ge Q S, Hao Z X. Climate warming impacts on plant phenological changes in China in recent 40 years (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2002, 47: 1582-1587 [郑景云, 葛全胜, 郝志新. 气候增暖对我国近40年植物物候变化的影响. 科学通报, 2002, 47: 1582-1587]
  - 34 Bai J, Ge Q S, Dao J H. The response of first flowering dates to abrupt climate change in Beijing. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 564-572
  - 35 Dai J H, Wang H J, Ge Q S. Changes of spring frost risks during the flowering period of woody plants in temperate monsoon area of China over the past 50 years (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2013, 68: 593-601 [戴君虎, 王焕炯, 葛全胜. 近50年中国温带季风区植物花期春季霜冻风险变化. 地理学报, 2013, 68: 593-601]
  - 36 Wang H J, Dai J H, Ge Q S. The spatiotemporal characteristics of spring phenophase changes of *Fraxinus chinensis* in China from 1952 to 2007. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 991-1000 [王焕炯, 戴君虎, 葛全胜. 1952-2007年中国白蜡树春季物候时空变化分析. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 701-710]
  - 37 Chen X Q, Pang C, Xu L, et al. Spatiotemporal response of *Salix matsudana*'s phenophases to climate change in China's temperate zone (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2015, 35: 3625-3635 [陈效述, 庞程, 徐琳, 等. 中国温带旱柳物候期对气候变化的时空响应. 生态学报, 2015, 35: 3625-3635]
  - 38 Yang X G, Liu Z J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China (in Chinese). *Sci Agr Sin*, 2010, 43: 329-336 [杨晓光, 刘志娟, 陈卓. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析. 中国农业科学, 2010, 43: 329-336]
  - 39 Han R Q, Zheng D, Dai E F, et al. Response of production potential to climate fluctuation in major grain regions of China (in Chinese). *Resour Sci*, 2014, 36: 2611-2623 [韩荣青, 郑度, 戴尔阜, 等. 中国粮食主产区生产潜力对气候波动响应研究. 资源科学, 2014, 36: 2611-2623]
  - 40 Li Y, Yang X G, Zhang H L, et al. The possible effects of global warming on cropping systems in China VII. The possible effects of climate warming on geographical shift in northern limit of citrus planting areas and the risk analysis of freezing injury in China (in Chinese). *Sci Agric Sin*, 2011, 44: 2876-2885 [李勇, 杨晓光, 张海林, 等. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 VII. 气候变暖对中国柑桔种植界限及冻害风险影响. 中国农业科学, 2011, 44: 2876-2885]

# Amplitude and velocity of the shifts in the Chinese terrestrial surface regions from 1960 to 2011

WU ShaoHong<sup>1,2</sup>, LIU WenZheng<sup>1,3,4</sup>, PAN Tao<sup>1,2</sup>, DENG HaoYu<sup>1,3</sup>, JIAO KeWei<sup>1,3</sup> & YIN YunHe<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

<sup>3</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>4</sup> Research Center for Sustainable Development of Shandong Province, Shandong Normal University, Jinan 250014, China

A terrestrial surface is characterized by a set of elements such as landform, climate, water, and soil and vegetation. The interaction of such elements forms a series of systematic regions on a terrestrial surface with a geographical zonation distribution; this is known as a terrestrial pattern. Realization of the internal relationship between the terrestrial elements and knowledge of their interaction and pattern formation would be helpful to further understand the physical geographical processes and the state of sustainable resource use and environmental protection planning.

Changes in any one of the abovementioned terrestrial elements would lead to variations in the whole pattern. Currently, climate is the most variable element that could cause a shift in a terrestrial pattern. However, such transformation in a terrestrial pattern would contain a lag period. Previous studies show that China's climate has significantly changed, leading the other elements, such as phenology and crop planting distribution, to change as well. Consequently, the possibility of a terrestrial pattern shift has increased. A change in one element within a pattern shift would be a complicated nonlinear dynamic process. Therefore, the amplitude and velocity of a terrestrial pattern shift are the most important elements. The number of continuous days, (taken as the period of plant growing season) and accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  are the main indicators used to describe the natural zone of a terrestrial pattern.

Based on the homogenized mean daily temperature record from 545 meteorological stations in China from 1960 to 2011, the number of continuous days and accumulated temperature  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  were calculated to analyze the change in the characteristics of China's natural zone patterns. Changes in each natural zone and the mean latitude were calculated to represent the amplitudes of the land surface region shifts. A new function was set to represent the amplitude and velocity of regional boundary transformation. Then, the amplitudes, trends, and velocities of China's land surface region patterns and the typical region boundaries were calculated. The years in which significant regional shifts occurred were also identified.

The results show a change in temperature states from a relative cold period (1960–1986) to a relative warm period (1987–2011); this change caused significant northward shifts of several major natural zones in China. The temperature zones in China, especially the northern boundary of the subtropical and warm temperate zones, had shifted northward during 1987–2011. During 1960–2011, the eastern part of the northern subtropical zone had moved  $1.386^{\circ}\text{N}$ . The northern and the eastern parts of the north boundary of the warm temperate zone had moved  $0.354^{\circ}\text{N}$  with velocities of  $0.533^{\circ}/10\text{ a}$  and  $0.136^{\circ}/10\text{ a}$ , respectively. The clustering of mutation testing showed that the northern boundaries of the subtropical and warm temperate zones substantially shifted northward in 1996 and 1997. Regional shifts occurred approximately 10 years after entering the relative warm period. This study has revealed the impacts of climate change on a macroscopic regional system; these findings could provide a scientific basis for climate-change adaptation.

**terrestrial surface region, key boundary, amplitude, shift velocity, climate change**

doi: 10.1360/N972016-00051