孙康慧, 曾晓东, 李芳 . 2019. 1980～2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 24(4): 455–468. Sun Kanghui, Zeng Xiaodong, Li Fang. 2019. Climate change characteristics in ecological fragile zones in China during 1980–2014 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(4): 455–468. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

1980～2014 年中国生态脆弱区气候变化特征分析

孙康慧[1,2]　曾晓东[2,3,4]　李芳[2]

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心，北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049
4 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044

摘　要　为了全面把握 20 世纪 80 年代以来中国生态脆弱区气候变化的特征，利用基于全国 2000 多个站点的格点化逐月资料，对中国典型生态脆弱区 1980～2014 年的日平均气温、日最高和最低气温、降水、相对湿度、风速和蒸发皿蒸发量的变化特征进行了分析。结果表明：（1）中国生态脆弱区日平均气温、日最高和最低气温几乎都呈上升趋势；日平均气温增幅北方大于南方；北方生态脆弱区日平均气温、日最高和最低气温、南方生态脆弱区日最低气温的季节增幅多为春季最大，秋季或冬季最小。（2）全区平均降水变化趋势不明显；生态脆弱区降水距平百分率春季多为增长趋势，夏季多为减少趋势，秋、冬季和年北方多为增长趋势，南方多为减少趋势。（3）相对湿度以减少趋势为主，只有黄土高原南部脆弱区秋、冬季和干旱半干旱区脆弱区冬季相对湿度距平百分率的趋势为正，这几个正值区同时也是降水增长大值区。（4）风速基本为减少趋势，春季减少趋势最大。（5）全区平均蒸发皿蒸发量春、夏季和年为减少趋势，冬季为增长趋势；北方生态脆弱区蒸发皿蒸发量四季和年多呈减少趋势；南方生态脆弱区蒸发皿蒸发量春、夏季以减少趋势为主，秋、冬季和年呈增长趋势。

关键词　中国生态脆弱区　气候变化　气温　降水　相对湿度　风速　蒸发皿蒸发量
文章编号　1006-9585(2019)04-0455-14　　**中图分类号**　P467　　**文献标识码**　A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18058

Climate Change Characteristics in Ecological Fragile Zones in China during 1980–2014

SUN Kanghui[1,2], ZENG Xiaodong[2,3,4], and LI Fang[2]

1 *School of Atmospheric Sciences*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *International Center for Climate and Environment Sciences*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract　The climate change characteristics in ecological fragile zones in China since the 1980s were analyzed using a gridded monthly meteorological dataset. The results were as follows: (1) The annual and seasonal mean values for daily

收稿日期　2018-05-03；**网络预出版日期**　2018-10-19
作者简介　孙康慧，女，1994年出生，硕士研究生，主要从事气候变化与生态系统关系的研究。E-mail: sunkanghui@mail.iap.ac.cn
通讯作者　曾晓东，E-mail: xdzeng@mail.iap.ac.cn
资助项目　国家重点研发计划项目2017YFA0604804，国家自然科学基金项目41575109、41475099
Funded by　National Key Research Project (Grant 2017YFA0604804), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575109 and 41475099)

mean, maximum, and minimum temperatures have risen in most of the study areas. The increase in daily mean temperature is greater in the northern ecologically fragile zones than in the south. The increase in seasonal mean values for daily mean, maximum, and minimum temperatures in the northern areas and daily minimum temperature in southern areas was largest in spring and smallest in autumn or winter. (2) Annual and seasonal precipitation, averaged over the whole area, showed no clear trend. Precipitation anomaly percentage increased in spring and decreased in summer in most of the study areas. The annual, autumn, and winter anomalies mostly increased in the north but decreased in the south. (3) Relative humidity was mostly on the decline, with positive trends found only in autumn and winter in the southern part of the Loess Plateau and in winter in the ecologically fragile zones in the arid and semiarid areas, which also showed a large precipitation growth trend. (4) Wind speed decreased in most areas, with the largest downward trend occurring in spring. (5) Pan evaporation averaged over the whole area decreased in spring, summer, and annual amount, but it increased in winter. Seasonal and annual pan evaporation decreased in most areas of the northern ecologically fragile zones. Pan evaporation decreased in most areas of the southern ecologically fragile zones during spring and summer, while it increased during autumn, winter, and annual amount.

Keywords Ecological fragile zones in China, Climate change, Temperature, Precipitation, Relative humidity, Wind speed, Pan evaporation

1 引言

IPCC第五次报告（IPCC，2013）指出：近几十年以来，全球升温明显；1983～2012年是北半球过去800年（高信度）甚至1400年（中等信度）最暖的30年时期。1980年代以后，中国气温也显著上升（Liu et al.，2004；任国玉等，2005；李爽等，2009）。近百年和近60年全国平均年降水量长期趋势性变化不显著，但年代际变化和区域分布差异明显。近30年来中国西部干旱和半干旱地区以及全国平均降水呈增长趋势（《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会，2015）。

气候变化是陆地生态系统演变的主要驱动力。生态脆弱区也称生态交错区（Ecotone），是指两种及以上不同类型生态系统的交界过渡区域。该区环境与生物因子均处于相变的临界状态，生态系统具有抗干扰能力弱、对气候变化敏感、时空波动性强、边缘效应显著、环境异质性高等特征。中国是世界上生态脆弱区分布面积最大、脆弱生态类型最多、生态脆弱性表现最明显的国家之一（中华人民共和国环境保护部，2008）。全面把握我国生态脆弱区的气候变化特征，对于我国生态保护与经济发展具有重要的指导意义。

研究显示，1980年代以来，中国生态脆弱区气候变化显著。其中北方农牧脆弱区的温度变化与全球基本同步，1987年以后增温，1998年以来增温停滞；年降水量略有减少，主要表现为夏季降水减少（闫冠华等，2008；赵威等，2016）。黄土高原自1980年代以来，日照时数和平均风速显著下降；1990年代以来，降水显著减少；年均温度和参考作物蒸散显著上升；相对湿度在2004年以后显著降低（李志和赵西宁，2013）。西北干旱区温度在1960年代至1980年代末期偏低，自1990年代开始上升；降水在1970年代之前略偏低，1980年代开始增加（黄蕊等，2013；姚俊强等，2015）。对1979～2012年气温变化趋势的分析表明，青藏高原地区增温率明显高于同纬度带其它区域，能对全球气温变化做出较为迅速的响应（焦洋等，2016）。

以往每个对中国生态脆弱区的研究基本只针对单个生态脆弱区，且不同研究对同一脆弱区的定义范围多不相同，研究大多未兼顾多个气象要素。因此，难以全面把握中国生态脆弱区的气候变化特征。

本文对1979年12月至2014年12月中国7个典型生态脆弱区（北方农牧脆弱区、黄土高原北部和南部脆弱区、干旱半干旱脆弱区、青藏高原脆弱区、南方农牧脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区）的日平均气温、日最高和最低气温、降水、相对湿度、风速和蒸发皿蒸发量的变化情况进行了统一分析，以期全面把握35年来中国生态脆弱区的气候变化特征。

2 资料与方法

2.1 资料

本研究使用CN05.1格点化观测数据集。该资

料基于中国气象局所属的2400余个台站（包括基准站、基本站和国家一般气象站）的观测资料，使用“距平逼近”插值方法得到，其空间分辨率为0.25°（纬度）×0.25°（经度），包括月平均的日平均气温、日最高和最低气温、降水、相对湿度、风速和蒸发资料。与原有的中国地区的日时间尺度观测数据集（如CN05、EA05、APHRO等）相比，CN05.1在中国东部与之相差较小，而在中国西部相差较大，气温、降水偏高，相差最大的区域是青藏高原北部至昆仑山西段等地形起伏较大而很少或没有观测台站的地方（不属于本研究选定区域）（吴佳和高学杰，2013）。在本研究选定区域，数据基本适用，可信度较高。本研究选取时段为1979年12月至2014年12月。

2.2 分区

“全球变化及应对”重点专项项目“全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究”（于贵瑞等，2017）参考《全国生态脆弱区保护规划纲要》（中华人民共和国环境保护部， 2008）及其它文献对中国生态脆弱区的定义，将我国生态脆弱区进行划分。本研究在此基础上略作调整，以保证各个生态脆弱区相互独立（图1）。为方便叙述，下文将北方农牧脆弱区、黄土高原北部和南部脆弱区、干旱半干旱脆弱区统称为北方生态脆弱区，而青藏高原脆弱区、南方农牧脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区统称为南方生态脆弱区。

制约我国生态脆弱区植被分布的关键气候要素不同。北方生态脆弱区位于从暖温带到中温带，从半湿润区到干旱区，从季风性气候到大陆性气候的过渡区，降水偏少、年变率大，冬季温度低，季节变化显著，是影响生态系统的主要气候因素。南方生态脆弱区情况各不相同，南方农牧脆弱区由亚热带向高原垂直温度带过渡，由季风性气候向山地性气候过渡，气候状况十分复杂；青藏高原脆弱区地势高寒，气候恶劣，自然条件严酷；而西南岩溶山地石漠化脆弱区全年降水量大，融水侵蚀严重，并导致严重水土流失（中华人民共和国环境保护部，2008）。

2.3 研究方法

首先对中国各生态脆弱区逐年、逐季的各气象要素求区域平均，得到各区各气象要素1980～2014年的时间序列，再分别计算其距平值或距平百分率。计算各气象要素距平值和距平百分率的标准气候期为1981～2010年。季节划分采用气象季节划分方法，即3～5月为春季，6～8月为夏季，9～11月为秋季，12月至次年2月为冬季（受资料长度限制，各气象要素冬季年份实为1979～2013年）。

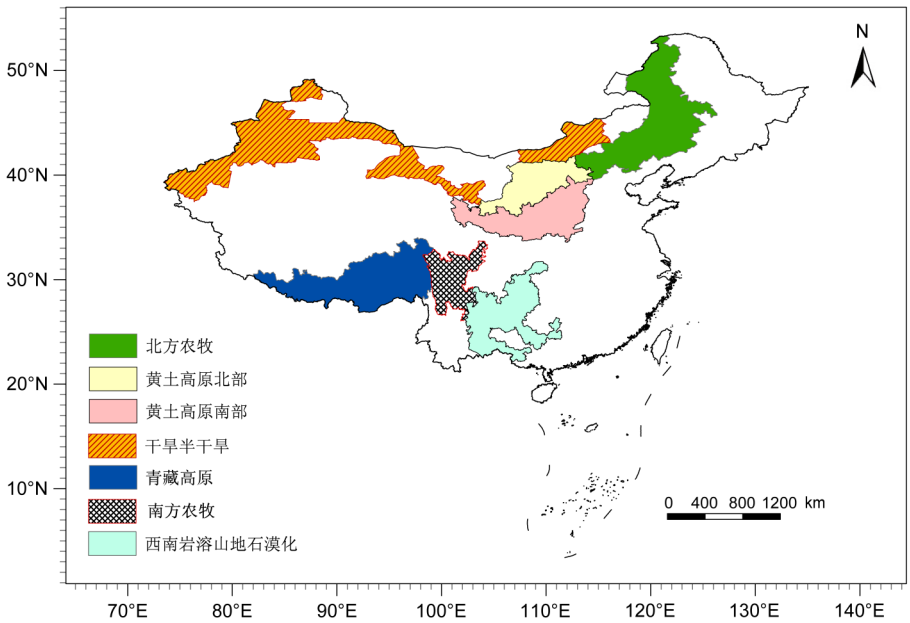

图1 中国生态脆弱区分布示意图

Fig. 1 Distribution of ecological fragile zones in China

利用Theil-Sen估计（Theil，1950；Sen，1968）的方法计算气象要素的变化趋势，利用Mann-Kendall检验（Mann，1945；Kendall，1975）的方法检验趋势的显著性。

Theil-Sen估计，又称Sen趋势估计，是利用序列中值估计趋势的算法，具有良好的抗噪性。对于序列$X_t=(x_1, x_2, \ldots, x_n)$，Sen趋势度计算公式为

$$\beta = \mathrm{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), 1 \leqslant i \leqslant \mathrm{n}, 1 \leqslant j \leqslant \mathrm{n}, j > i, \quad (1)$$

其中，β为Sen趋势度，Median为中位数函数。当$\beta > 0$时，时间序列呈上升的趋势，反之呈下降的趋势。

Mann-Kendall方法属非参数统计方法，无需对数据作分布假设且对异常值不敏感，因此引入该方法可完成对序列趋势的显著性检验。过程如下：

假设：H_0，序列中的数据随机排列，即无显著趋势；H_1，序列存在上升或下降单调趋势。

检验统计量S由公式计算：

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \mathrm{Sgn}(X_j - X_k), \quad (2)$$

式中，

$$\mathrm{Sgn}(X_j - X_k) = \begin{Bmatrix} +1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{Bmatrix}. \quad (3)$$

当n＞10（本文n=35）时，使用统计量Z进行趋势检验：

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中，

$$\mathrm{VAR}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{m} t_i(t_i - 1)(2t_i + 5)\right]/18, \quad (5)$$

其中，n是序列中数据个数，m是序列中结（重复出现的数据组）的个数，t_i是结的宽度（第i组重复数据组中的重复数据个数）。

在双边的趋势检验中，在给定的α置信水平上，在正态分布表中查得临界值$Z_{1-\alpha/2}$,如果$|Z| \geqslant Z_{1-\alpha/2}$,则原假设$H_0$是不可接受的，即在置信水平上，$Z$大于（小于）0时，时间序列数据存在明显的上升（下降）趋势。

本文α分别取0.05和0.01，查表可得：α =0.05时，$Z_{1-\alpha/2}$ = 1.960；α =0.01时，$Z_{1-\alpha/2}$ = 2.576。

3 分析与结果

3.1 气温

首先介绍日平均气温的变化，为了简化叙述，本段用气温代指日平均气温。中国生态脆弱区的年和季节平均气温几乎都呈上升趋势，而趋势大小存在区域差异。由图2a可知，黄土高原脆弱区、干旱半干旱脆弱区东部和青藏高原脆弱区北部年平均气温上升较大，干旱半干旱脆弱区与黄土高原脆弱区东北部相接区域升温最大，最大升温可达6.5 ℃/100 a以上；其它区域气温上升较小，北方农牧和西南岩溶山地石漠化脆弱区的部分区域升温最小，最小升温不足0.5 ℃/100 a。冬季北方农牧和干旱半干旱脆弱区的部分区域气温呈下降趋势（图2b）。由图3a可知，1997年以前全区气温距平基本为负值，之后基本为正值。1990年代末以后，中国北方生态脆弱区的年平均气温增长停滞甚至下降，而南方生态脆弱区的增温仍十分明显（图3，部分区域年平均气温距平时间序列图略）。

中国生态脆弱区日最高、最低气温的年际与年代际变化特征均与日平均气温十分相似。为避免重复叙述，本文接下来只论述它们不同于日平均气温的地方。

由表1可知，日平均气温中国各生态脆弱区的区域平均值均呈增长趋势，而表2显示，日最高气温干旱半干旱脆弱区冬季的趋势为负。由表3可知，不同于日平均和日最高气温，南方农牧脆弱区的日最低气温增幅最大季节由冬季变为春季，南方农牧脆弱区和青藏高原脆弱区的日最低气温增幅最小季节都由夏季变为秋季。因此，35年来，南、北生态脆弱区日最低气温的季节变化趋势基本一致：春季最大，秋季或冬季最小。

结合表1、表2和表3可知，全区和北方生态脆弱区同期日气温距平的增长趋势大小多为：日最低气温＞日平均气温≥日最高气温，青藏高原脆弱区同期日气温距平的增长趋势大小为：日最低气温＞日最高气温＞日平均气温，而南方农牧脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区同期日气温距平的增长趋势大小多为：日最高气温＞日最低气温≥日平均

气温。在多个生态脆弱区中，日平均、最高和最低气温年平均距平的Sen趋势黄土高原北部均最大。

3.2 降水

图2c显示了中国生态脆弱区年降水的变化趋势图，其中北方农牧脆弱区中部、黄土高原脆弱区南缘及南方脆弱区中部为降水减少趋势大值区，黄土高原脆弱区中东部、干旱半干旱脆弱区西部、干旱半干旱脆弱区东部与黄土高原脆弱区西部相接区域、南方生态脆弱区东、西边缘为降水增加趋势大值区。就季节变化（图2d；春、夏、秋图略）而言，夏、秋降水趋势的空间分布与年降水趋势相似，但夏季北方农牧与黄土高原北部脆弱区降水均

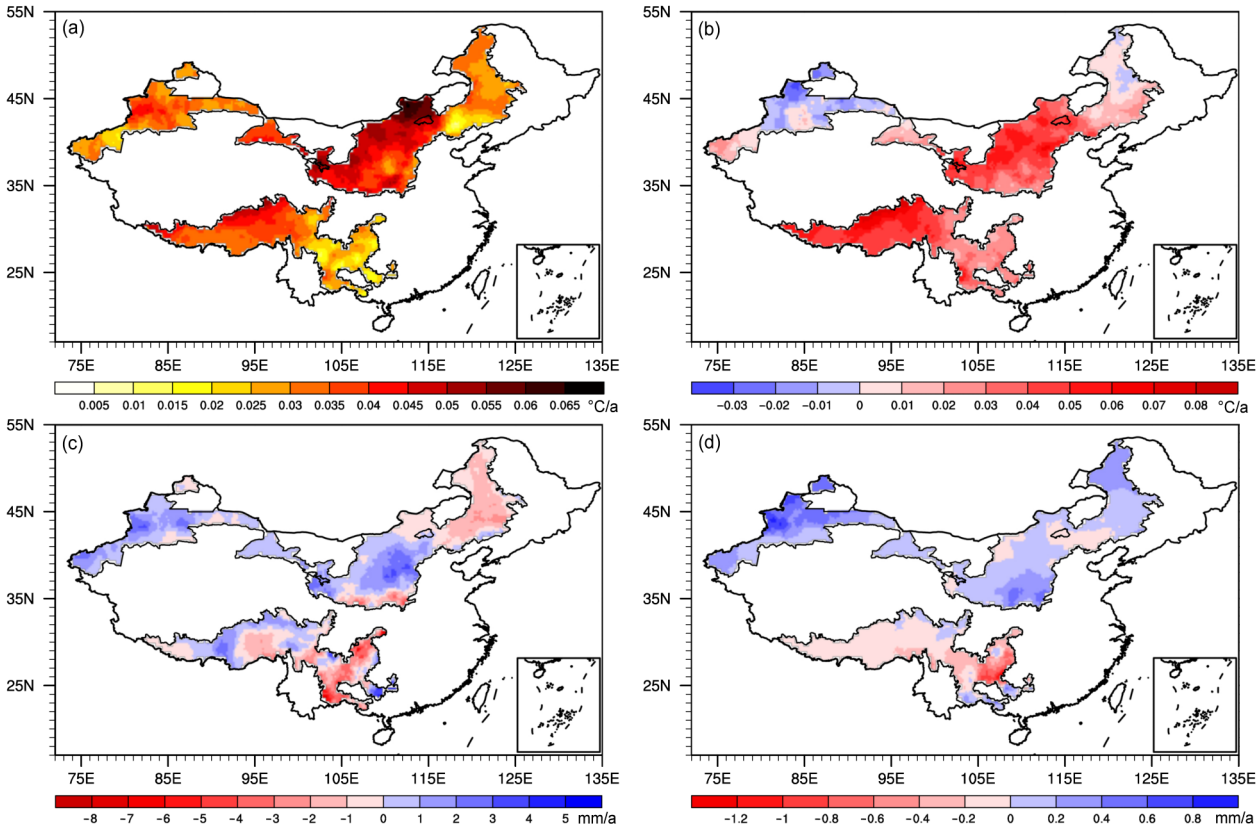

图2 1980～2014年中国生态脆弱区（a、b）气温（单位：℃/a）和（c、d）降水（单位：mm/a）的变化趋势：（a、c）年平均；（b、d）冬季平均

Fig. 2 Linear trend of (a, b) temperature (℃/a) and (c, d) precipitation (mm/a) in ecological fragile zones in China from 1980 to 2014: (a, c) Annual mean; (b, d) winter mean

表1 1980～2014年中国生态脆弱区日平均气温距平的Sen趋势

Table 1 Sen trend of daily mean temperature anomaly of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	日平均气温距平Sen趋势/℃ (100 a)$^{-1}$				
	春季平均	夏季平均	秋季平均	冬季平均	年平均
全区	5.0**	3.2**	3.6**	2.5	3.5**
北方农牧脆弱区	3.8	4.1**	4.3*	1.6	3.2**
黄土高原北部脆弱区	6.4**	4.1**	4.1**	4.5*	4.8**
黄土高原南部脆弱区	6.4**	3.5**	3.2*	4.2*	4.1**
干旱半干旱脆弱区	6.3**	3.6**	4.4**	0.5	3.4**
青藏高原脆弱区	3.6**	3.0**	3.4**	5.1**	3.8**
南方农牧脆弱区	3.3**	2.3**	2.6**	3.3**	3.0**
西南岩溶山地石漠化脆弱区	3.5**	1.6*	2.5**	2.6	2.5**

*、**分别表示通过0.05 、0.01的信度检验，下同。

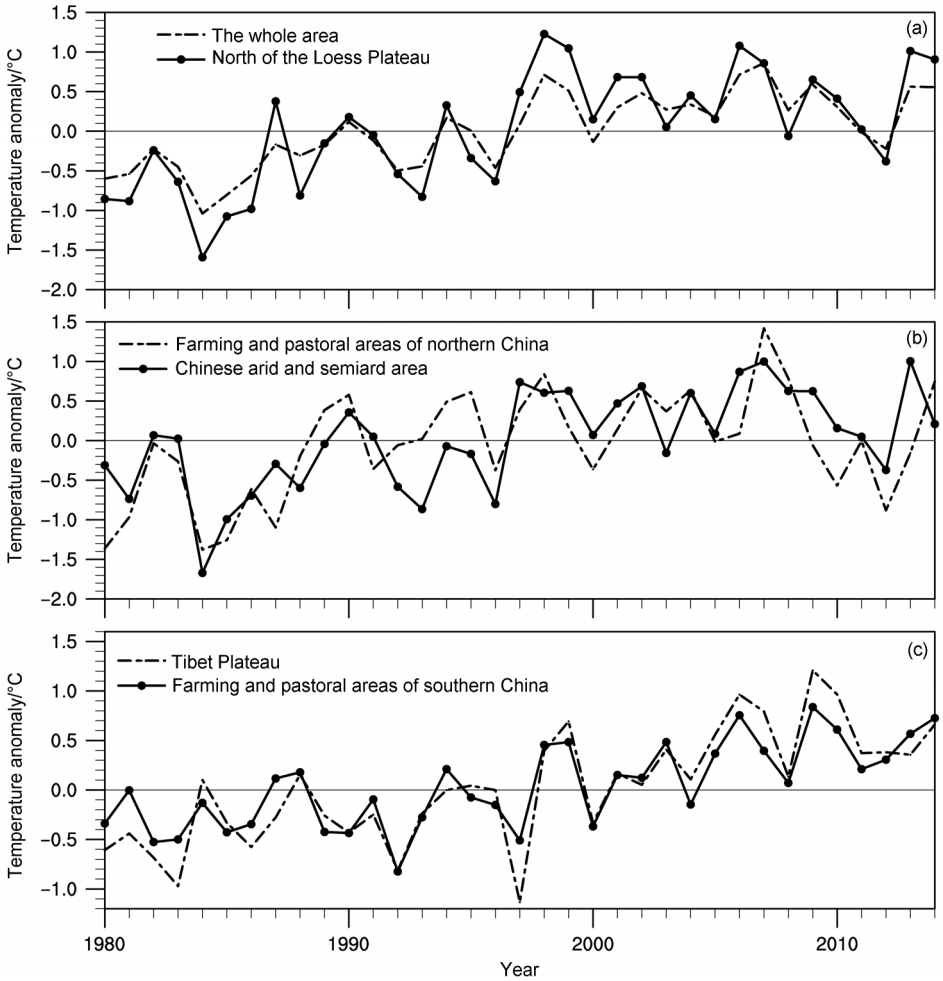

图3 1980～2014年中国生态脆弱区年平均气温距平（单位：℃）时间序列：（a）中国生态脆弱区全区和黄土高原北部脆弱区；（b）北方农牧脆弱区和干旱半干旱脆弱区；（c）青藏高原脆弱区和南方农牧脆弱区

Fig. 3 Time series of annual mean temperature anomaly (℃) of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014: (a) The whole area of ecological fragile zones in China and ecological fragile zones in north of the Loess Plateau; (b) ecological fragile zones in farming and pastoral areas of northern China and Chinese arid and semiarid areas; (c) ecological fragile zones in Tibet Plateau and farming and pastoral areas of southern China

表 2 1980～2014年中国生态脆弱区日最高气温距平的Sen趋势

Table 2 Sen trend of daily maximum temperature anomaly of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	日最高气温距平Sen趋势/℃ (100 a)$^{-1}$				
	春季平均	夏季平均	秋季平均	冬季平均	年平均
全区	5.3**	3.3**	3.8**	2.5	3.4**
北方农牧脆弱区	3.3	4.7**	4.6*	0.7	2.7**
黄土高原北部脆弱区	6.6**	3.7**	2.9	3.7	4.3**
黄土高原南部脆弱区	7.5**	3.8**	2.9	3.5	4.1**
干旱半干旱脆弱区	5.7**	2.9**	4.2*	-0.7	2.9**
青藏高原脆弱区	3.7**	3.1**	3.5**	6.3**	4.3**
南方农牧脆弱区	4.2**	2.8**	3.9**	4.8**	4.1**
西南岩溶山地石漠化脆弱区	4.2**	2.5**	3.7**	3.6	3.0**

表 3　1980～2014年中国生态脆弱区日最低气温距平的Sen趋势

Table 3　Sen trend of daily minimum temperature anomaly of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	日最低气温距平Sen趋势/℃ (100 a)$^{-1}$				
	春季平均	夏季平均	秋季平均	冬季平均	年平均
全区	5.3**	3.8**	4.2**	3.2*	4.0**
北方农牧脆弱区	4.5*	4.0**	3.6*	2.0	3.5**
黄土高原北部脆弱区	6.4**	5.8**	6.0**	5.9**	5.5**
黄土高原南部脆弱区	5.7**	4.8**	4.5**	4.7**	4.8**
干旱半干旱脆弱区	6.8**	5.1**	5.6**	2.1	4.7**
青藏高原脆弱区	4.6**	4.7**	4.2**	5.3**	4.7**
南方农牧脆弱区	3.3**	2.9**	2.7**	2.9**	3.0**
西南岩溶山地石漠化脆弱区	3.8**	1.8**	2.7**	2.8	2.6**

呈减少趋势，北方生态脆弱区降水以减少趋势为主；春季除黄土高原南部脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区外，其他区域降水绝大部分为增加趋势；冬季北方生态脆弱区降水基本为增加趋势，南方生态脆弱区降水基本为减少趋势。

由图4可知，35年来全区降水变化趋势不明显。从2004年到2011年，全区降水距平百分率以低均值波动，2012、2013、2014年3年降水量偏多。35年来，多区降水距平百分率的多年平均值和变化趋势发生了改变：2000年代中期之前，黄土高原北部和南部脆弱区年降水变化趋势不明显，之后，呈明显增长趋势（黄土高原南部图略）；青藏高原脆弱区1980年代春季降水距平百分率的多年平均值偏低，1990年代和2000年代依次增加，但各年代降水都没有明显的变化趋势，直到2011年开始呈下降趋势；南方农牧脆弱区春季降水距平百分率的年代际变化与青藏高原相似，不过其1990年代的增长趋势比青藏高原明显，21世纪降水距平百分率下降的开始时间略早于青藏高原；1990年代末之前，北方农牧脆弱区年与夏季降水距平百分率的多年平均值偏高，之后偏低，2011年以后降水开始增加。1990年代末，北方农牧脆弱区年与夏季降水减少的结论与赵威等（2016）的结论一致；研究表明，其夏季降水的年代际变化与亚洲纬向环流异常密切相关（董祝雷等，2018）。

由表4可知，生态脆弱区各区年降水距平百分率的变化趋势不显著。北方生态脆弱区降水距平百分率多为增长趋势，秋季或冬季增长较显著。黄土高原北部脆弱区秋季、北方农牧和干旱半干旱脆弱区冬季降水距平百分率的增长趋势均通过了0.01的信度检验。南方生态脆弱区降水距平百分率多为减少趋势。除西南岩溶山地石漠化脆弱区外，其他生态脆弱区春季降水距平百分率均呈增长趋势；北方农牧脆弱区增幅最大，Sen趋势为0.8%/a。

由前文对温度变化趋势的分析可知，北方农牧脆弱区和干旱半干旱脆弱区冬季增温最弱，部分区域气温呈下降趋势。冬季气温偏低有利于雨雪形成，因此有利于两个区域冬季降水的增加趋势。

3.3　相对湿度

由表5可知，生态脆弱区相对湿度基本呈减少趋势。全区春、夏、秋季和年平均相对湿度减少显著，冬季减少不显著，秋、冬季相对湿度减少趋势小于春、夏季。黄土高原南部脆弱区秋、冬季和干旱半干旱区脆弱区冬季相对湿度距平百分率的趋势为正，这几个正值区同时也是降水增长趋势的大值区。西南岩溶山地石漠化脆弱区的相对湿度减少十分显著，其各个季节和年平均相对湿度距平百分率的减少趋势均通过了0.01的信度检验。

2000年代中期以后，多个生态脆弱区相对湿度距平百分率的多年平均值减少。而秋、冬季的黄土高原北部和南部脆弱区以及干旱半干旱脆弱区的相对湿度未发生这样的变化。由图5可知，1980年代，全区相对湿度呈增长趋势，1990年代至21世纪初，相对湿度以高值波动，其后呈明显下降趋势；2004年以前，全区相对湿度多大于气候平均

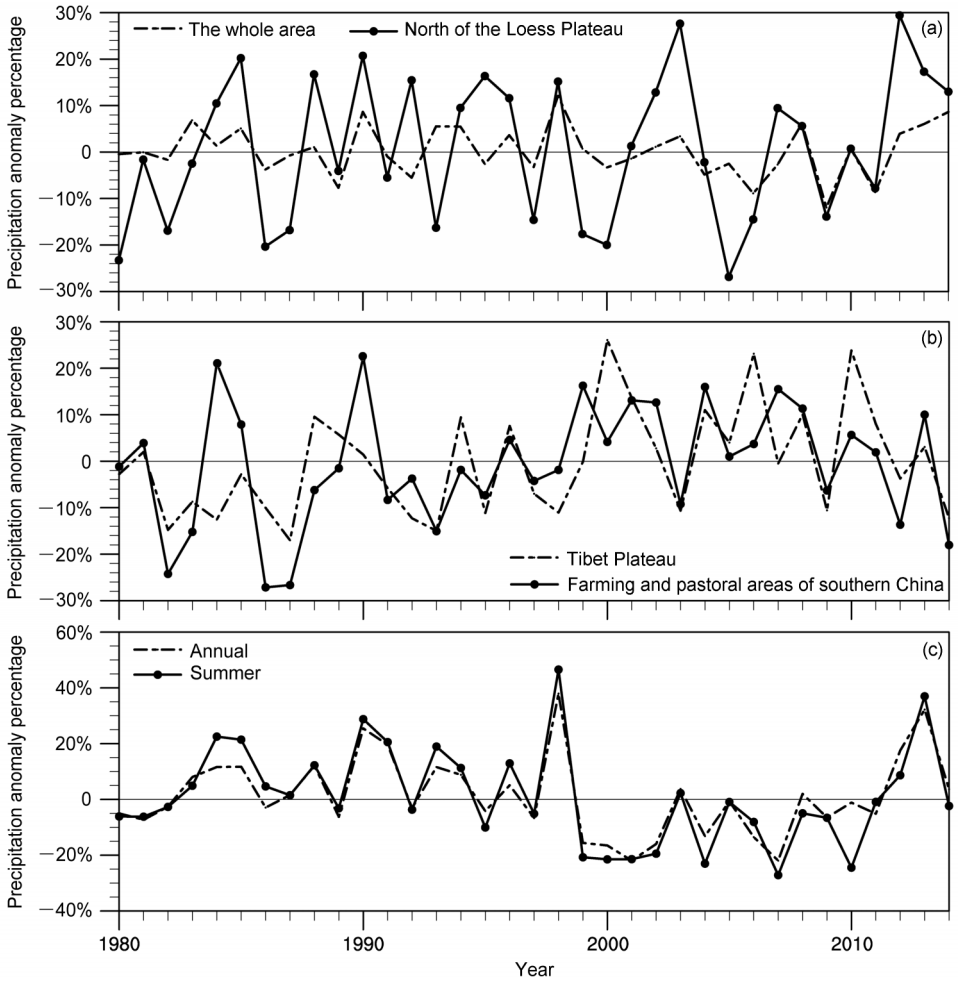

图4 1980～2014年中国生态脆弱区降水距平百分率时间序列（单位：%）：（a）中国生态脆弱区全区和黄土高原北部脆弱区年平均；（b）青藏高原脆弱区和南方农牧脆弱区春季平均；（c）北方农牧脆弱区年平均与夏季平均

Fig. 4 Time series of precipitation anomaly percentage (%) of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014: (a) Annual mean in the whole area of ecological fragile zones in China and ecological fragile zones in north of the Loess Plateau; (b) spring mean in ecological fragile zones in Tibet Plateau and farming and pastoral areas of southern China; (c) annual and summer mean in the ecological fragile zones in farming and pastoral areas of northern China

表4 1980～2014年中国生态脆弱区降水距平百分率的Sen趋势

Table 4 Sen trend of precipitation anomaly percentage of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	降水距平百分率Sen趋势/a^{-1}				
	春季	夏季	秋季	冬季	年
全区	0.0%	0.0%	−0.1%	0.2%	0.0%
北方农牧脆弱区	0.8%	−0.4%	0.0%	1.2%**	−0.1%
黄土高原北部脆弱区	0.2%	−0.1%	1.7%**	1.0%	0.3%
黄土高原南部脆弱区	0.1%	0.1%	0.9%*	1.2%*	0.2%
干旱半干旱脆弱区	0.2%	0.0%	0.4%	1.3%**	0.2%
青藏高原脆弱区	0.3%	0.0%	−0.2%	−0.3%	0.0%
南方农牧脆弱区	0.3%	0.0%	−0.3%	−0.3%	−0.1%
西南岩溶山地石漠化脆弱区	−0.1%	−0.2%	−0.3%	−0.2%	−0.2%

表 5 1980～2014年中国生态脆弱区相对湿度距平百分率的Sen趋势

Table 5 Sen trend of relative humidity anomaly percentage of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	相对湿度距平百分率Sen趋势/a^{-1}				
	春季	夏季	秋季	冬季	年
全区	−0.2%**	−0.2%**	−0.1%**	−0.1%	−0.2%**
北方农牧脆弱区	−0.1%	−0.2%**	−0.2%*	−0.2%**	−0.2%**
黄土高原北部脆弱区	−0.4%	−0.3%*	0.0%	0.0%	−0.1%
黄土高原南部脆弱区	−0.3%*	−0.1%*	0.1%	0.1%	−0.1%*
干旱半干旱脆弱区	−0.3%*	−0.2%	0.0%	0.1%	−0.1%
青藏高原脆弱区	0.0%	−0.2%	−0.2%	−0.3%	−0.1%
南方农牧脆弱区	−0.2%	−0.1%*	−0.2%*	−0.2%	−0.2%**
西南岩溶山地石漠化脆弱区	−0.1%**	−0.1%**	−0.1%**	−0.1%**	−0.1%**

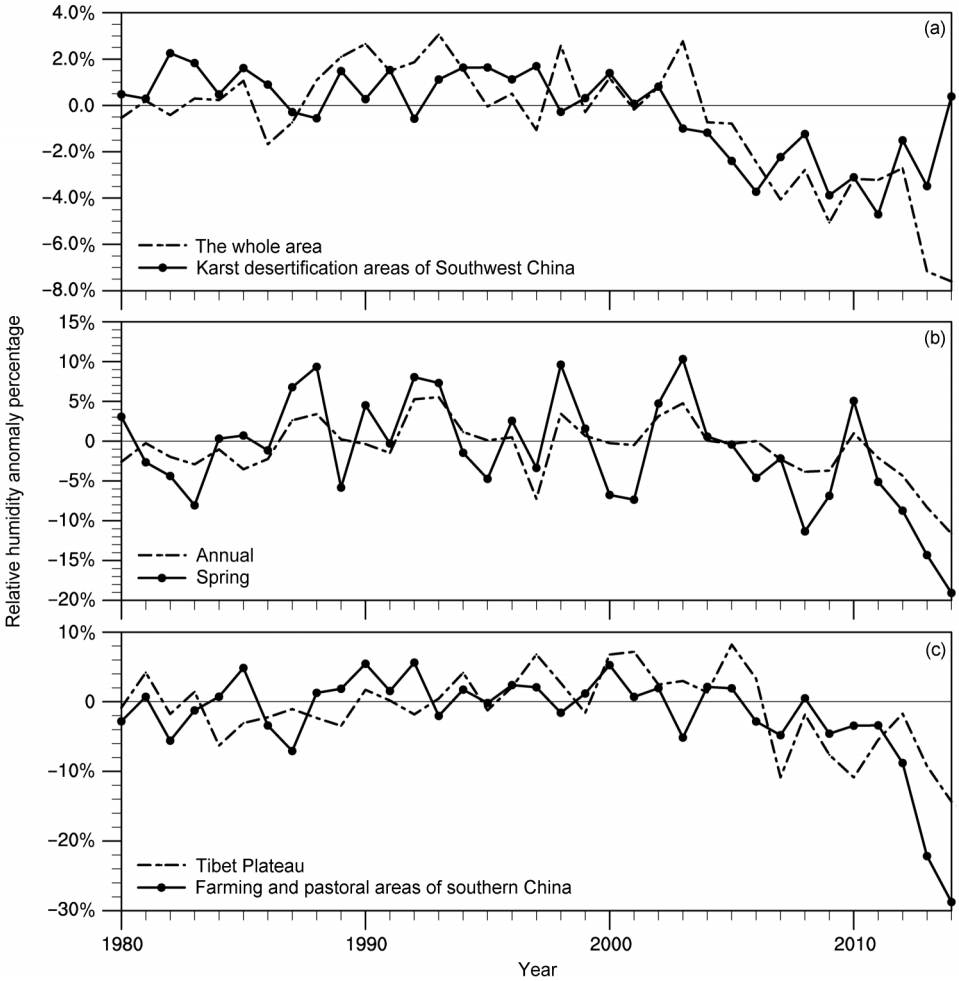

图5 1980～2014年中国生态脆弱区相对湿度距平百分率时间序列（单位：%）：（a）中国生态脆弱区全区和西南岩溶山地石漠化脆弱区年平均；（b）干旱半干旱脆弱区年和春季平均；（c）青藏高原脆弱区和南方农牧脆弱区春季平均

Fig. 5 Time series of relative humidity anomaly percentage (%) of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014: (a) Annual mean in the whole area of ecologically fragile zones in China and ecological fragile zones in karst stony desertification areas of Southwest China; (b) annual and spring means in ecological fragile zones in Chinese arid and semiarid areas; (c) spring mean in ecological fragile zones in Tibet Plateau and farming and pastoral areas of southern China

值，之后，小于气候平均值。21世纪初，西南岩溶山地石漠化脆弱区的相对湿度距平百分率以低值波动。干旱半干旱脆弱区的春季和年平均相对湿度距平百分率在2010年以后几乎呈直线下降。从1980年代末开始，青藏高原和南方农牧脆弱区的相对湿度呈增长趋势，2000年以后开始下降。南方农牧脆弱区2013、2014年的相对湿度距平百分率异常偏低。21世纪以来，生态脆弱区相对湿度的下降趋势与已有研究结论基本一致（李志和赵西宁，2013；Wei and Wang，2013；李瀚等，2016）。

3.4 风速

中国生态脆弱区风速基本为减少趋势，各生态脆弱区各季和年平均风速的减少趋势均通过了99%的信度检验，只有干旱半干旱脆弱区西北部分区域风速增加明显。就季节而言，春季生态脆弱区风速距平的减少趋势最大。在各生态脆弱区中，北方农牧和青藏高原脆弱区的风速减幅较大，其春季风速距平的Sen趋势分别为−2.2 m/(s·100 a)和−2.5 m/(s·100 a)。

由各区风速距平的时间序列（图6）可知，从1990年代开始，全区、北方生态脆弱区和青藏高原脆弱区风速距平的减少趋势放缓，甚至以低值波动；2000年代开始南方农牧脆弱区的风速距平波动变化并呈增长趋势。由图6可知，多个生态脆弱区的风速存在周期为10年左右的年代际波动，包括1980年代末到1990年代末的黄土高原北部脆弱区，1980年代末到2010年代的黄土高原南部脆弱区，以及2000年代后的干旱半干旱脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区。

3.5 蒸发皿蒸发量

虽然本文所用的蒸发皿蒸发量不能确切地代表真实水体的蒸发量，更不能代表实际陆面蒸发量，但对于了解水面蒸发量的变化规律和趋势仍有价值。

由图7可知，35年来，全区年蒸发皿蒸发量略呈下降趋势，2010年、2011年、2012年蒸发皿蒸发量距平百分率偏低；全区冬季蒸发皿蒸发量呈上升趋势，2009年、2010年冬季蒸发皿蒸发量的距平百分率偏高。

由表6可知，全区春、夏季蒸发皿蒸发量距平百分率为减少趋势，冬季为增长趋势，冬季Sen趋势为0.3%/a，增长趋势通过了0.01的信度检验。北方生态脆弱区四季和年蒸发皿蒸发量距平百分率大部分呈减少趋势，只有少部分区域呈增长趋势，如黄土高原北部脆弱区冬季、北方农牧脆弱区秋季和冬季，且北方农牧脆弱区冬季的Sen趋势为0.5%/a，增长趋势通过了0.05的信度检验。南方生态脆弱区春、夏季蒸发皿蒸发量以减少趋势为主，秋、冬季和年蒸发皿蒸发量呈增长趋势。青藏高原脆弱区冬季和西南岩溶山地石漠化脆弱区秋季蒸发皿蒸发量距平百分率的增长十分显著，其Sen趋势分别为0.7%/a和0.5%/a，增长趋势均通过了0.01的信度检验。

由各区蒸发皿蒸发量距平百分率的时间序列（图略）可知，北方生态脆弱区2010年左右蒸发皿蒸发量异常，表现为蒸发皿蒸发量距平百分率多年均值偏低或2010年、2011年、2012年蒸发皿蒸发

表6 1980～2014年中国生态脆弱区蒸发皿蒸发量距平百分率的Sen趋势

Table 6 Sen trend of pan evaporation anomaly percentage of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

区域	蒸发皿蒸发量距平百分率Sen趋势/a^{-1}				
	春季	夏季	秋季	冬季	年
全区	−0.2%*	−0.2%**	0.0%	0.3%**	−0.1%
北方农牧脆弱区	−0.2%*	−0.2%	0.2%	0.5%*	−0.1%
黄土高原北部脆弱区	−0.1%	−0.2%	−0.3%	0.1%	−0.1%
黄土高原南部脆弱区	−0.2%	−0.2%	−0.4%	−0.1%	−0.1%
干旱半干旱脆弱区	−0.2%	−0.4%**	−0.2%*	0.0%	−0.3%**
青藏高原脆弱区	−0.3%	−0.1%*	0.2%	0.7%**	0.1%
南方农牧脆弱区	−0.4%*	0.2%	0.3%*	0.3%	0.1%
西南岩溶山地石漠化脆弱区	−0.2%	−0.2%	0.5%**	0.3%	0.0%

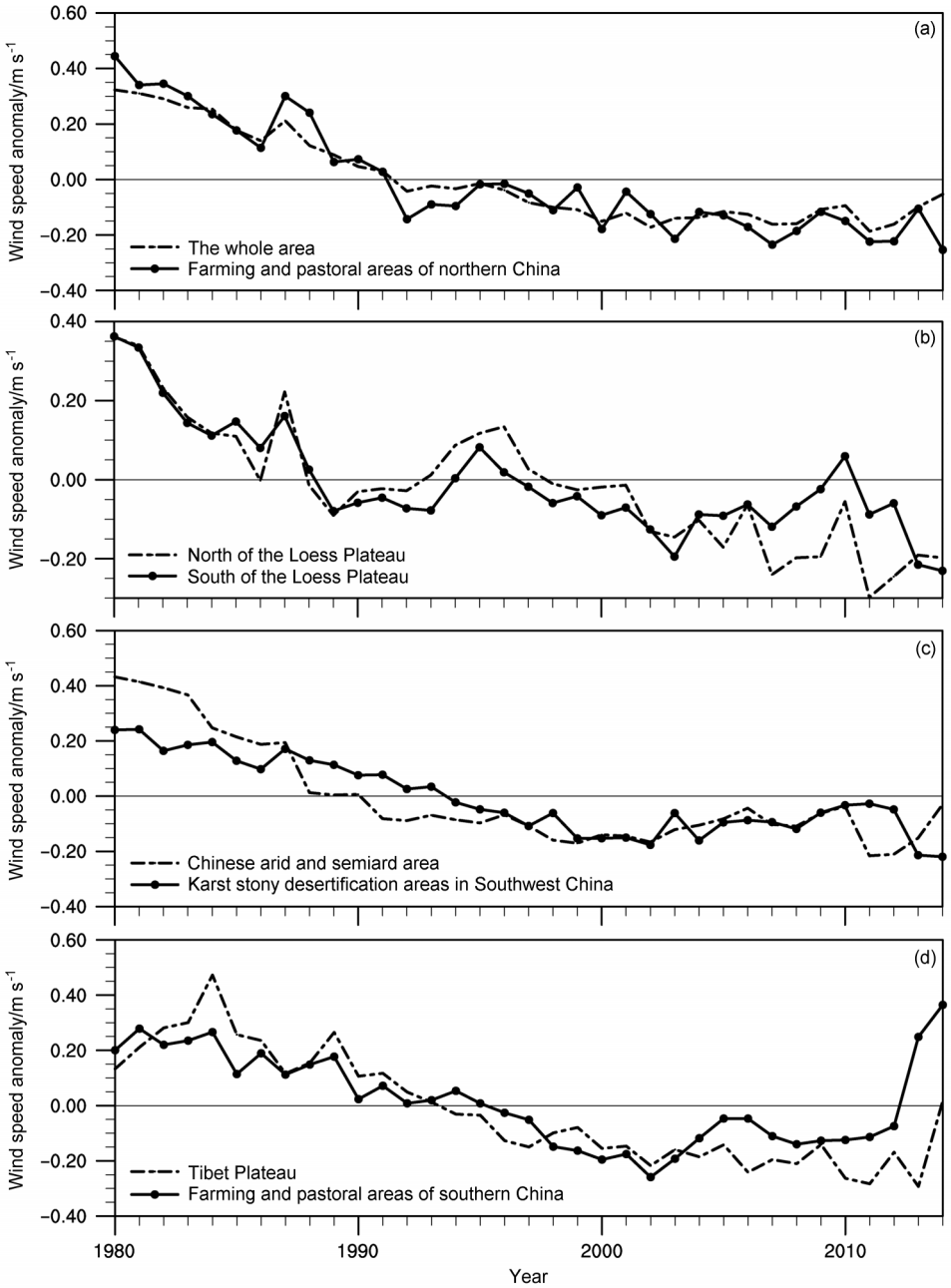

图6　1980～2014年中国生态脆弱区年平均风速距平（单位：m/s）时间序列：（a）中国生态脆弱区全区和北方农牧脆弱区；（b）黄土高原北部脆弱区和南部脆弱区（c）干旱半干旱脆弱区和西南岩溶山地石漠化脆弱区；（d）青藏高原脆弱区和南方农牧脆弱区

Fig. 6　Time series of annual mean wind speed anomaly (m/s) of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014: (a) The whole area of ecological fragile zones in China and ecological fragile zones in farming and pastoral areas of northern China; (b) ecological fragile zones in north and south of the Loess Plateau; (c) ecological fragile zones in Chinese arid and semiarid areas and Karst stony desertification areas in Southwest China; (d) ecological fragile zones in Tibet Plateau and farming and pastoral areas of southern China

量距平百分率异常偏低。南方生态脆弱区蒸发皿蒸发量的增长趋势主要发生在21世纪。

以上研究所得南方生态脆弱区秋、冬季蒸发皿蒸发量增加的结论与以往研究中蒸发皿蒸发量减少的结论（刘敏等，2009；祁添垚等，2015）不同。由表6可知，青藏高原脆弱区冬季蒸发皿蒸发量距平百分率的增长十分显著，Sen趋势为0.7%，增长趋势通过了0.01的信度检验。青藏高原脆弱区冬季蒸发皿蒸发量的剧烈增长趋势可能与其冬季持续的剧烈增温有关。

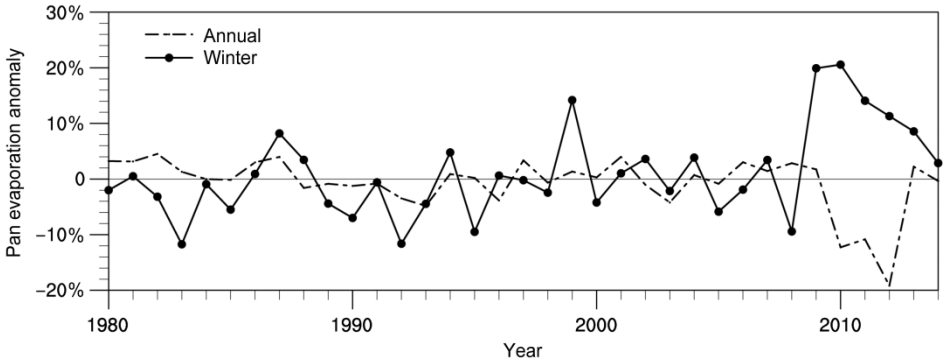

图7 1980～2014年中国生态脆弱区全区年和冬季蒸发皿蒸发量距平百分率时间序列（单位：%）

Fig. 7 Time series of annual mean and winter mean pan evaporation anomaly percentage (%) of the whole areas of ecological fragile zones in China from 1980 to 2014

4 结论与讨论

通过以上对1980～2014年中国生态脆弱区日平均气温、日最高和最低气温、降水、相对湿度、风速、蒸发皿蒸发量的变化情况的分析，得出如下结论：

（1）中国生态脆弱区日平均气温、日最高和最低气温几乎都呈上升趋势。北方生态脆弱区日平均气温增幅大于南方。青藏高原脆弱区冬季的剧烈增温仍在继续。北方生态脆弱区日平均气温、日最高和最低气温、南方生态脆弱区日最低气温的季节增幅多为春季最大、秋季或冬季最小，北方农牧和干旱半干旱脆弱区的部分区域冬季气温甚至呈下降趋势。关于这一降温现象，丁一汇等（2014），黄荣辉等（2014）的研究表明，1990年代末中国北方冬季的降温趋势与东亚冬季风的年代际跃变有关。就日气温距平的增长趋势大小而言，北方生态脆弱区多为日最低气温的增长趋势最大，日最高气温的增长趋势最小，而南方生态脆弱区（除了青藏高原）多为日最高气温的增长趋势最大。

（2）全区降水变化趋势不明显。生态脆弱区降水距平百分率春季以增长趋势为主，夏季多为减少趋势，秋、冬季和年北方多为增长趋势，南方多为减少趋势。

（3）生态脆弱区相对湿度以减少趋势为主，只有黄土高原南部脆弱区秋、冬季和干旱半干旱区脆弱区冬季相对湿度距平百分率的趋势为正，这几个正值区同时也是降水增长趋势大值区。生态脆弱区相对湿度的减少主要发生在21世纪。相对湿度与气温、降水关系密切，00年代中期以后，南方生态脆弱区相对湿度的下降趋势与其剧烈升温和降水减少有关。

（4）中国生态脆弱区风速基本为减少趋势，春季减少趋势最大。从1990年代开始，北方生态脆弱区和青藏高原脆弱区风速距平的减少趋势放缓，甚至以低值波动。2000年代开始南方农牧脆弱区的风速距平波动变化并呈增长趋势。多个生态脆弱区的风速存在周期为10年左右的年代际波动。

（5）全区蒸发皿蒸发量距平百分率春、夏季为减少趋势，且均比较显著，从而导致全年为减少趋势；冬季为增长趋势，冬季Sen趋势为0.3%/a，增长趋势通过显著水平为0.01的Mann-Kendall检验。北方生态脆弱区四季和年蒸发皿蒸发量大部分呈减少趋势。南方生态脆弱区春、夏季蒸发皿蒸发量以减少趋势为主，秋、冬季和年蒸发皿蒸发量呈增长趋势。南方生态脆弱区蒸发皿蒸发量的增长趋势主要发生在21世纪，其增长趋势可能与近期剧烈升温有关。

本文分析了中国生态脆弱区的气候变化特征。已有研究表明，过去几十年，中国生态脆弱区叶面积指数变化以增长为主，农牧脆弱区呈减少趋势（廖小罕和施建成，2014；彭飞和孙国栋，2017）。在本文研究时段内，我国北方生态脆弱区气温普遍上升，黄土高原、干旱半干旱脆弱区降水增加，在一定程度上有利于植被恢复与改善。此外，1990年代以后，中国北方生态脆弱区的风速多低于气候平均值。风速减小，不利于对沙尘的搬运（Wang et al.，2008；Xu et al.，2018），因而有利于该地区的土壤保持；其次，风速减小有助于减少蒸发量，增加土壤湿度。这些均有利于改善生态环境。南方

生态脆弱区气温升高，降水减少（除春季外），相对湿度减少，秋、冬季蒸发皿蒸发量增加，这些表明该区气候变暖变干。气候的暖干化势必对该区生态系统产生重要影响。但生态脆弱区植被对气候变化的响应特性十分复杂，生态系统脆弱性一般受多个气候因子的共同影响，而单一气候因子变化对不同生态脆弱区植被的影响也可能不同。生态脆弱区气候因子变化的空间异质性强，不同季节温度变化对生态系统的影响也不同。在上述不同气候变化特征影响下，各生态脆弱区的生态系统稳定性与脆弱性如何变化、是否可能出现生态突变等，尚有待进一步深入研究。因此，进一步工作将研究我国不同生态脆弱区气候变化对植被演变的综合影响。

致谢 “全球变化及应对”重点专项项目提供了中国生态脆弱区的原始分区数据，高学杰研究员提供了CN05.1观测资料，在此表示感谢！

参考文献（References）

陈文海, 柳艳香, 马柱国. 2002. 中国1951～1997年气候变化趋势的季节特征[J]. 高原气象, 21(3): 251-257. Chen Wenhai, Liu Yanxiang, Ma Zhuguo. 2002. The seasonal characteristics of climatic change trend in China from 1951 to 1997[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21(3): 251-257. doi: 10.3321/j. issn: 1000-0534.2002.03.005

《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2015. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社.1-976. Editorial Board of the Third Climate Change National Assessment Report. 2015. The Third National Assessment Report on Climate Change (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.1-976

丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 72(5): 835-852. Ding Yihui, Liu Yanju, Liang Sujie,et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 72(5): 835-852. doi:10.11676/qxxb2014.079

董祝雷, 白美兰, 衣娜娜. 2018. 内蒙古夏季降水与亚洲纬向环流的联系[J]. 干旱气象, 36(2): 256-262. Dong Zhulei, Bai Meilan, Yi Nana. 2018. Relation between summer rainfall in Inner Mongonlia and Asian zonal circulation[J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 36(2): 256-262. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-02-0256

黄蕊, 徐利岗, 刘俊民. 2013. 中国西北干旱区气温时空变化特征[J]. 生态学报, 33(13): 4078-4089. Huang Rui, Xu Ligang, Liu Junmin. 2013. Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 33 (13): 4078-4089. doi:10.5846/stxb201301050030

黄荣辉, 刘永, 皇甫静亮, 等. 2014. 20世纪90年代末东亚冬季风年代际变化特征及其内动力成因[J]. 大气科学, 38(4): 627-644. Huang Ronghui, Liu Yong, Huangfu Jingliang, et al. 2014. Characteristics and internal dynamical causes of the interdecadal variability of East Asian winter monsoon near the late 1990s[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38(4): 627-644. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13245

Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1535.

焦洋, 游庆龙, 林厚博, 等. 2016. 1979～2012年青藏高原地区地面气温时空分布特征[J]. 干旱区研究, 33(2): 283-291. Jiao Yang, You Qinglong, Lin Houbo, et al. 2016. Spatiotemporal distribution of surface temperature over the Qinghai-Tibetan Plateau from 1979 to 2012[J]. Arid Zone Research (in Chinese), 33(2): 283-291. doi: 10.13866/j.azr.2016.02.09

康世昌, 张拥军, 秦大河, 等. 2007. 近期青藏高原长江源区急剧升温的冰芯证据[J]. 科学通报, 52(4): 457-462. Kang Shichang, Zhang Yongjun, Qin Dahe, et al. 2007. Recent temperature increase recorded in an ice core in the source region of Yangtze River[J]. Chinese Science Bulletin, 52(6): 825-831. doi: 10.3321/j. issn: 0023-074X.2007.04.014

Kendall M G. 1975. Rank Correlation Methods[M]. 4th ed. London: Charles Griffin.

李爽, 王羊, 李双成. 2009. 中国近30年气候要素时空变化特征[J]. 地理研究, 28(6): 1593-1605. Li Shuang, Wang Yang, Li Shuangcheng. 2009. Spatio-temporal patterns of climatic change in China in recent 30 years[J]. Geographical Research (in Chinese), 28 (6): 1593-1605. doi:10.11821/yj2009060015

李志, 赵西宁. 2013. 1961—2009年黄土高原气象要素的时空变化分析[J]. 自然资源学报, 28(2): 287-299. Li Zhi, Zhao Xining. 2013. Spatiotemporal analysis of meteorological elements on the Loess Plateau during 1961-2009[J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 28(2): 287-299. doi:10.11849/zrzyxb.2013.02.010

李瀚, 韩琳, 贾志军, 等. 2016. 中国西南地区地面平均相对湿度变化分析[J]. 高原山地气象研究, 36(4): 42-47. Li Han, Han Lin, Jia Zhijun, et al. 2016. The changes of the average relative humidity in Southwest China[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in Chinese), 36(4): 42-47. doi: 10.3969/j. issn. 1674-2184 • 2016. 04.007

廖小罕, 施建成. 2014. 全球生态环境遥感监测2013年度报告[M]. 北京: 科学出版社, 1-316. Liao Xiaohan, Shi Jiancheng. 2014. Global Ecological Environment Remote Sensing Monitoring 2013 Annual Report (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1-316.

Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. 2004. Taking China's temperature: Daily range, warming trends, and regional variations, 1955-2000[J]. J. Climate, 17(22): 4453-4462. doi:10.1175/3230.1

刘敏, 沈彦俊, 曾燕, 等. 2009. 近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报, 64(3): 259-269. Liu Min, Shen Yanjun, Zeng Yan, et al. 2009. Changing trend of pan evaporation and its cause

over the past 50 years in China[J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 64(3): 259−269. doi:10.3321/j.issn:0375-5444.2009.03.001

Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 13(3): 245−259. doi:10.2307/1907187

彭飞, 孙国栋. 2017. 1982～1999年中国地区叶面积指数变化及其与气候变化的关系[J]. 气候与环境研究, 22(2): 162−176. Peng Fei, Sun Guodong. 2017. Variation of leaf area index in China from 1982 to 1999 and its relationship with climate change[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(2): 162−176. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16061

祁添垚, 张强, 王月, 等. 2015. 1960～2005年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及其影响因素分析[J]. 地理科学, 35(12): 1599−1606. Qi Tianyao, Zhang Qiang, Wang Yue, et al. 2015. Spatiotemporal patterns of pan evaporation in 1960−2005 in China: Changing properties and possible causes[J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 35(12): 1599−1606. doi:10.13249/j.cnki.sgs.2015.012.1599

任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 63(6): 942−956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63(6): 942−956. doi:10.11676/qxxb2005.090

Sen P K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 63 (324): 1379−1389. doi:10.2307/2285891

Theil H. 1950. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis. I, II, III[J]. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Sciences, 53: 386−392, 521−525, 1397−1412.

Wang X M, Li J J, Dong G R, et al. 2008. Responses of desertification to variations in wind activity over the past five decades in arid and semiarid areas in China[J]. Chinese Science Bulletin, 53(3): 426−433. doi:10.1007/s11434-008-0100-4

王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. 气象学报, 62(2): 228−236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62(2): 228−236. doi:10.11676/qxxb2004.023

Wei K, Wang L. 2013. Reexamination of the aridity conditions in arid northwestern China for the last decade[J]. J. Climate, 26(23): 9594−9602. doi:10.1175/JCLI-D-12-00605.1

吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. 地球物理学报, 56(4): 1102−1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets[J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56(4): 1102−1111. doi: 10.6038/cjg20130406

Xu Z W, Hu R, Wang K X, et al. 2018. Recent greening (1981−2013) in the Mu Us dune field, North-Central China, and its potential causes[J]. Land Degradation & Development, 29(5): 1509−1520. doi: 10.1002/ldr.2910

闫冠华, 李巧萍, 吕冬红. 2008. 中国北方农牧交错带气候变化特征及未来趋势[J]. 南京气象学院学报, 31(5): 671−678. Yan Guanhua, Li Qiaoping, Lv Donghong. 2008. Climate change and future trends of the farming-grazing zone in northern China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31(5): 671−678. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2008.05.009

姚俊强, 杨青, 刘志辉, 等. 2015. 中国西北干旱区降水时空分布特征[J]. 生态学报, 35(17): 5846−5855. Yao Junqiang, Yang Qing, Liu Zhihui, et al. 2015. Spatio-temporal change of precipitation in arid region of the Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 35(17): 5846−5855. doi:10.5846/stxb201310242567

姚檀栋, 杨志红, 刘景寿. 1994. 冰芯记录所揭示的青藏高原升温[J]. 科学通报, 39(5): 438−441. Yao Tandong, Yang Zhihong, Liu Jingshou. 1994. The warming of the Qinghai-Tibet plateau revealed by the ice core record[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 39 (5): 438−441.

于贵瑞, 徐兴良, 王秋凤, 等. 2017. 全球变化对生态脆弱区资源环境承载力的影响研究[J]. 中国基础科学, 19(6): 19−23, 35. Yu Guirui, Xu Xingliang, Wang Qiufeng, et al. 2017. Study on the effects of global change on resources and environment carrying capacity in ecological fragile zones in China[J]. China Basic Science (in Chinese), 19(6): 19−23, 35. doi: 10.3969/j.issn.1009-2412.2017.06.004

赵威, 韦志刚, 郑志远, 等. 2016. 1964～2013年中国北方农牧交错带温度和降水时空演变特征[J]. 高原气象, 35(4): 979−988. Zhao Wei, Wei Zhigang, Zheng Zhiyuan, et al. 2016. Surface temperature and precipitation variation of pastoral transitional zone in northern China during 1964−2013[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35 (4): 979−988. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00079

赵宗慈. 1991. 近39年中国的气温变化与城市化影响[J]. 气象, 17 (4): 14−17. Zhao Zongci. 1991. The changes of temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 17(4): 14−17. doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.1991.4.003

郑然, 李栋梁, 蒋元春. 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象, 34(6): 1531−1539. Zheng Ran, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. 2015. New characteristics of temperature change over Qinghai−Xizang Plateau on the background of global warming[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34(6): 1531−1539. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00123

中华人民共和国环境保护部. 2008. 全国生态脆弱区保护规划纲要[EB/OL]. http://www. gov. cn/gzdt/2008-10/09/content_1116193. htm. Environmental Protection Department of the People's Republic of China. 2008. Outline of the national ecological vulnerability protection program (in Chinese) [EB/OL]. http://www.gov.cn/gzdt/2008-10/09/content_1116193.htm