

近 50 a 来中国北方沙区风沙气候演变与沙漠化响应

王训明 李吉均 董光荣 夏敦胜

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000.
E-mail: xunming@lzb.ac.cn)

摘要 中国北方干旱、半干旱地区近 50 a 以来风沙活动有显著的变化。20 世纪 60 至 70 年代区域处于强烈的风沙活跃期, 而自 80 年代至今则持续减弱, 在绝大部分地区其输沙能力仅为 60 至 70 年代的 20%~50%。沙丘活动指数的分析结果也表明, 20 世纪 80 年代以后, 处于强烈风沙活动控制下的区域在不断向北向西退缩; 在中东部部分地区, 60 和 70 年代有较强流沙活动的区域已演变为固定、半固定沙丘或者沙地。风沙活动的这一显著变化在沙漠化过程中有很好的响应: 20 世纪 60 年代至 70 年代中国北方沙漠化强烈发展主要与这一时期正处于风沙活跃期有关; 而近 20 a 以来沙漠化逆过程的发生则与风沙活动的大幅度减弱和春季降水量增加有密切联系。因此, 尽管现代沙漠化的正逆过程或多或少受到人类活动的影响, 其仍主要被气候变化所制约。

关键词 风沙活动 沙漠化过程 响应 近 50 a 中国北方干旱、半干旱区

干旱、半干旱乃至半湿润地区的风沙活动是塑造风蚀、风积地貌的动力, 其控制了风沙地貌的形成和分布^[1], 沙尘的输送和粉尘的堆积^[2], 进而潜在影响大气环流尤其是降水和气温的变化^[3], 亦是促使区域沙漠化形成、发展的主要气候因子。目前诸多对沙漠化过程的诠释中, 均认为沙漠化是干旱、半干旱及部分半湿润地区由于人-地关系不相协调所造成的以风沙活动为主要标志的土地退化^[4], 其中包括气候以及人为因素^[5]。

目前, 部分学者将中国北方典型沙区在历史时期的沙漠化过程看成是人类对干旱、半干旱地区生态环境进行破坏的良好范例^[6,7], 但近年来, 这一结论遭到质疑。例如, 通过考古等手段, 部分学者指出, 毛乌素沙地在夏代(C.2100~C.1600 BC)就可能已经有流沙出现^[8], 明代(1368~1644 AD)的垦殖活动并不是河套地区长城沿线沙质荒漠化的主要贡献者, 流沙范围的扩大更可能是自然原因^[9], 风沙活动的增强可能就是关键的因素之一^[10]。

不仅如此, 风沙活动的演变在很大程度上控制了沙漠环境的变迁。例如, 58 万年^[11]尤其是 15 万年^[12]以来毛乌素沙地经历了多次风沙活跃期和间沙漠堆积期的正逆交替演变过程, 农牧交错带全新世也发生了多次农业向牧业文化转换的事件, 并与不同时期的冷干多风和温湿-暖湿多雨的气候背景相关^[13]。

此外, 风沙活动强度的波动也导致了区域风蚀、风积强度的变化, 进而影响干旱、半干旱地区植被生长^[14], 从而诱使沙漠化正逆过程的发生。鉴于风沙活动对沙漠化过程的极大的潜在影响, 我们根据 20 世纪 50 年代以来的完整气象和人文记录, 参考我们多年来的野外考察结果, 探索近半个世纪以来中国北方干旱、半干旱地区风沙活动的时空演变过程; 并讨论其在沙漠化发展和逆转过程中所起的作用。

1 数据来源以及处理方法

本文主要的数据源是中国北方地区 339 个基本气象台站自 20 世纪 50 年代中期至 2003 年每日定时 4 次观测的风速、风向和月降水记录, 中国国家统计局 1949~2005 年出版的农作物播种面积、大牲畜头数和人口密度等人文数据, 并参考我们过去十多年来在中国北方干旱、半干旱区的考察、观测结果。在筛除一些记录较短或缺失的台站之后, 有 307 个气象台站的观测数据被应用于分析和讨论。由于中国北方地区自 20 世纪 50 年代末期至 80 年代初期沙漠化强烈发展, 而 90 年代以后出现大范围的逆转, 因此, 根据沙漠化在不同时期的发展过程, 本文将过去近 50 a 内中国北方干旱、半干旱地区风沙环境的演变过程分为 1960~1969, 1970~1979 和 1980~1989 以及 1990~2003 年 4 个时段讨论。

目前风沙科学研究中对风沙活动的描述有多种方法 [15,16], 但最为常见的是采用输沙势 [17]和沙丘活动指数 [18]进行表述. 由于中国北方干旱、半干旱地区流动、固定、半固定沙丘分布十分广泛, 且其固定程度常被作为区域风沙活动强弱的主要标志 [4], 因此, 本项研究亦采用输沙势和沙丘活动指数来表述过去近 50 a 中国北方干旱、半干旱地区风沙活动的时空演变过程. 输沙势被表述为

$$DP \propto V^2(V - V_t)t,$$

其中, DP 为输沙势(VU, 向量单位); t 为起沙风持续时间, 以百分数表示; V 为起沙风风速, V_t 为测量高度上的起动风速, 在中国干旱、半干旱地区, 风杯高度在 10~12 m 时为 6.0 m/s.

沙丘活动指数被定义为

$$M = W / (P / PE),$$

其中, M 是活动指数, P 为年降水量, PE 为 Thornwaite 年潜在蒸发量 [19], W 为起沙风频率(%). 活动指数值越大, 则表明地表风沙活动越强烈.

2 结果分析

2.1 输沙势的时空变化

输沙势结果显示, 与世界上其他干旱、半干旱地区相比较, 尽管中国区域内的风沙活动并不十分强烈, 但由于植被覆盖度低, 极易导致严重的土壤风蚀问题. 过去近 50 a 以来, 北方干旱、半干旱地区的风沙活动随区域的变化有所不同(图 1): 高风沙活动

(>400 VU)区域主要分布在古尔班通古特沙漠西部, 河西走廊西部, 阿拉善高原, 塔克拉玛干沙漠东部等戈壁地区, 以及坝上高原和嫩江沙地的极少数区域. 而其他沙漠、沙地以及退化草原地区, 均在中等(200~400 VU)至低风沙活动(<200 VU)控制范围之内.

近 50 a 来中国北方干旱、半干旱地区风沙活动有非常显著的变化(图 2). 20 世纪 60 年代至 70 年代风沙活动最为强烈, 输沙势是 80 年代至今的 2~5 倍, 同时, 这一时期也是该地区沙尘暴发生频率最高的时期 [25,26]; 而自 80 年代至 21 世纪初期, 该区域则处于风沙活动的低谷, 输沙能力仅为 60 和 70 年代的 20%~50%甚至更低; 尤其是 90 年代以后, 风沙活动减弱的趋势更为明显, 其仅在极少数区域有所加强.

此外, 输沙势在不同地区的变化幅度亦不尽相同. 在 20 世纪 60 和 70 年代, 塔克拉玛干沙漠、古尔班通古特沙漠中西部、青藏高原部分地区、坝上高原、华北平原部分地区、呼伦贝尔沙地、嫩江沙地以及科尔沁沙地均在高风沙活动的控制下, 而 80 年代以后至今则主要由低风沙活动所控制; 而这些区域正是 60 和 70 年代沙漠化十分严重的区域. 在其他地区, 如阿拉善高原和河西走廊西部, 尽管 80 年代至今仍有较高的风沙活动, 但其对地表物质的搬运能力也显著下降.

2.2 沙丘活动指数的时空变化

沙丘活动指数综合了气温、降水、蒸发以及起沙风变化等对区域风沙活动产生的潜在影响. 近 50 a

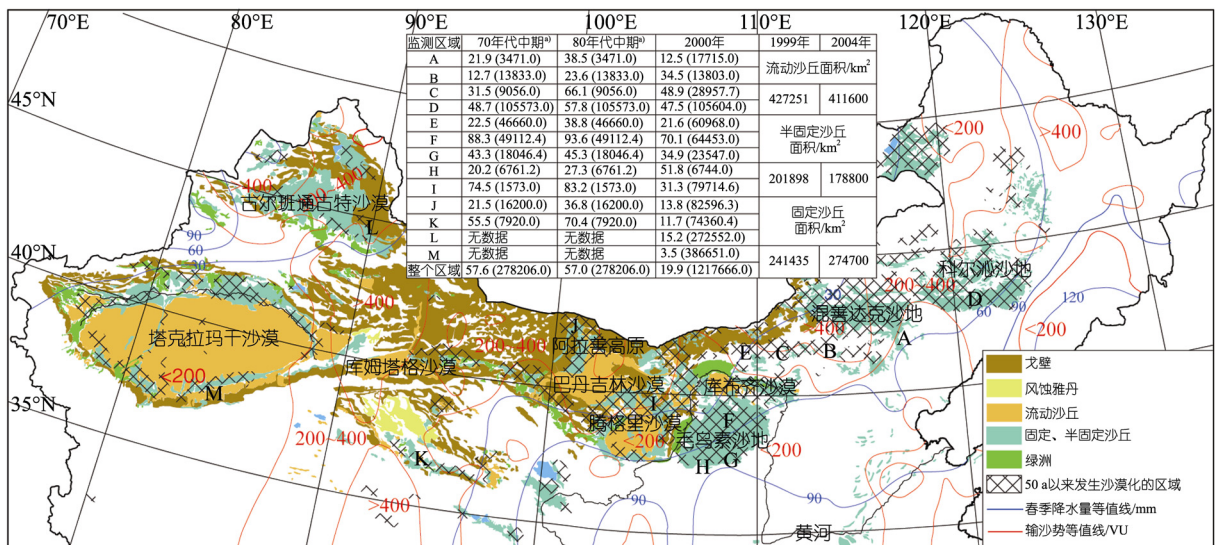


图 1 1960 年以来中国北方干旱、半干旱地区沙漠化发生的区域、监测结果以及输沙势和春季降水量的地理分布
表中 a) 为 20 世纪; 括号外数据为沙漠化面积占监测面积的百分比, 括号内数据为监测面积(单位为 km²). 根据文献 [20~24] 改编

以来,中国干旱、半干旱地区地表完全处于活动状态的区域仅分布在塔里木盆地中东部的大部分沙漠和戈壁地区,河西走廊西部、青藏高原部分地区以及阿拉善高原(图3)。这一区域由内向外,地表沙物质从完全活动状态演变至半活动状态,再至完全不活动状态,地貌上则表现为从流动沙漠至半流动沙地、半固定沙地和固定沙地的依次演变。这一结果亦与野外实际观测和沙漠化监测结果 [20-23] 基本一致:20世纪80年代末期以后,中国北方中、东部干旱、半干旱地区的沙漠和沙地均有良好的植被覆盖,地表基本上处于固定和半固定状态;而流动沙丘则主要分布在塔里木盆地东部以及阿拉善高原区;90年代以后,在典型农牧交错带如坝上高原,地表也主要处于半活动至完全不活动状态。

沙丘活动指数在过去近50a中也发生了显著的变

化,地表物质处于完全活动和半活动状态下的区域随着时间的推移有明显的改变。20世纪60年代和70年代是过去近50a中的强烈风沙活跃期,地表物质处于完全活动和半活动状态的面积在这一时期达到最大;而自80年代以来,处于强烈风沙活动状态下的区域面积不断缩小。例如,坝上高原自80年代至今,有强烈风沙活动的区域在不断地向北退缩,已接近中蒙边界,除少数区域可能还有一些流沙分布,这一区域基本上已经演变为固定、半固定沙丘群和固定、半固定沙地,这与近20a来该区域沙质荒漠化不断发生逆转的趋势非常一致。在鄂尔多斯地区,80年代以前这一区域大部分地表处于完全活动至半活动状态,而90年代以后,则演变为半活动至完全不活动状态。就整个中国北方干旱、半干旱区而言,根据目前风沙活动的演变趋势,强烈沙漠化过程很难再扩展至贺

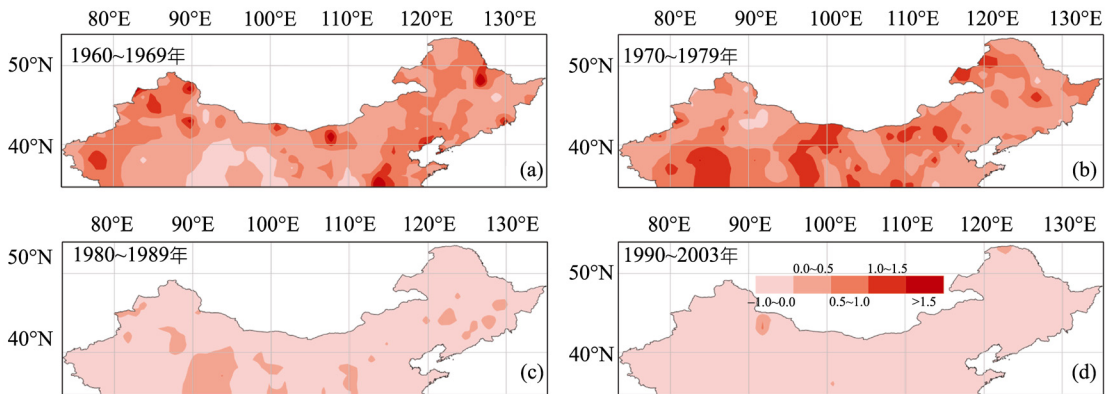


图2 1960~2003年中国北方干旱、半干旱区不同时期输沙势的变化趋势

采用距平表示,其公式为: $(x - \bar{x}) / \bar{x}$, 其中, \bar{x} 为1960~2003年输沙势平均值, x 分别为不同时期的输沙势平均值

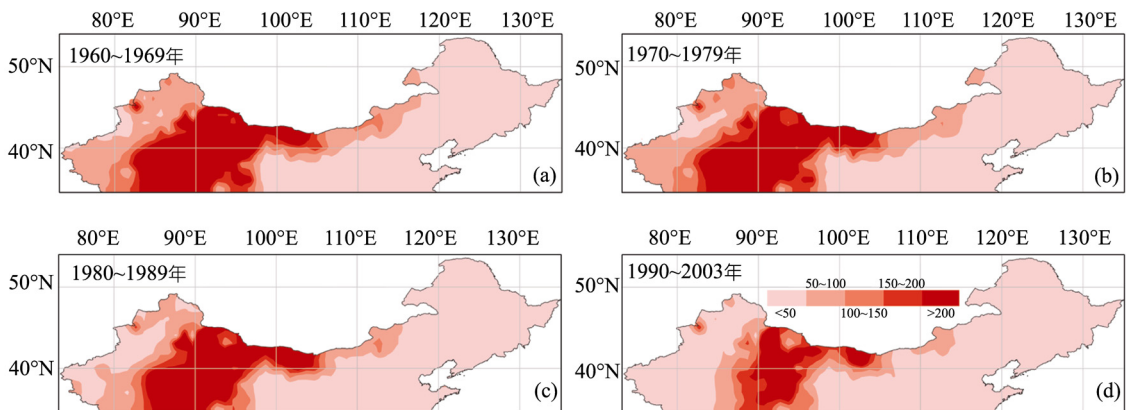


图3 1960~2003年中国北方干旱、半干旱地区不同时期沙丘活动指数的变化趋势

兰山东部, 浑善达克沙地以东、以南的广大区域。

3 讨论

中国北方大部分干旱、半干旱区覆盖了深厚的河湖相沙质沉积物和以其为母质的黑钙土、栗钙土、棕钙土, 以及母质为基岩风化壳、残坡积或冲洪积物的含砾沙土^[27], 地表物质极易被风蚀, 搬运和堆积。蒙古国的南戈壁省及与之相邻的阿拉善高原、坝上高原、浑善达克、库布齐和毛乌素等戈壁和沙漠在强烈的风沙活动下, 成为了黄土高原物源的主要贡献者^[28]。在典型的沙漠、沙地地区, 要减小和防止风蚀, 植被覆盖率要达到 40%~50%的水平; 而要保证在最高风速下风蚀得到有效控制, 则必须达到 60%~70%^[29]。而大部分干旱、半干旱乃至半湿润地区, 植被覆盖率远低于 50%。风沙活动的大幅度减弱意味着风力对地表侵蚀的急剧衰减, 地表水肥保持能力的提高, 以及有利于植被生长和土壤的形成^[30]。虽然绝大多数学者将中国北方地区沙漠化不断发展的原因归结为人类活动的结果, 但是, 在中国北方典型的农牧交错区, 80 年代初期以前, 沙漠化土地的形成是沙质草原被开垦带来的强烈风蚀所致^[31], 因此, 风沙活动强度的高低对中国干旱区、半干旱地区的沙质荒漠化过程有不可估量的影响。根据目前的研究结论, 过去近 50 a 中, 虽然中国北方沙漠化仍在发展, 但自 20 世纪 80 年代以来, 贺兰山以东大部分地区, 如毛乌素沙地^[32,33]、科尔沁沙地^[34]、坝上高原^[23]等, 均在发生规模不一的沙漠化逆转过程(图 1), 中国西北地区的植被活动近 20 a 以来也一直在增加^[35]。图 1 也列出了贺兰山以东两个 80 年代以后沙漠化仍在发展的地区, 但这两个地区起沙风活动在 90 年代中期同时亦有所加强。此外, 从近 50 a 以来不同时期的人口密度, 农作物播种面积以及大牲畜头数的变化量看(图 4), 中国北方地区的人类活动以及其对环境的影响在成倍增加。因此, 假如中国北方地区的沙漠化过程主要是由人为因素控制, 则很难解释自 80 年代后期至今中国北方大部分地区沙漠化发生逆转这一事件。再者, 在沙漠化逆转过程非常典型的地区, 表现为区域整体逆转, 而没有集中在某一特定的区域^[20,21]。这就说明, 在中国北方地区, 沙漠化过程主要是受气候变化的制约, 而不是人类活动所导致的结果。因为即使是在现代技术条件下, 人类对环境的改造也仅是局限于部分区域并呈散点状分布, 不可能使区域出现整体逆转。

其次, 除风沙活动过程外, 春季降水及其变率也可能是控制沙漠化过程的主要因素^[36]。由于春季是中国北方风沙最为活跃的季节, 这一季节的降水不仅影响植被的生长, 也对风沙活动产生明显的影响^[17]。我们的统计结果与多数学者的结论一致^[37], 尽管中国干旱、半干旱地区年降水量自 20 世纪 80 年代以来有减小的趋势, 但春季降水量则比 80 年代以前有所增加(图 5)。而在风沙最为活跃的 70 年代, 大多数地区春季降水偏少, 为负距平, 部分地区甚至达到 -0.6 以上; 而 90 年代以来, 春季降水明显增加。这说明, 春季干旱, 加之强烈的风沙活动, 促使了 70 年代干旱、半干旱地区发生了强烈沙漠化过程。

最后, 近 50 a 来风沙活动的演变过程也表明, 沙质荒漠化过程也并不完全由区域风沙活动所制约。例如, 民勤绿洲自历史时期以来的沙漠化过程就主要与水资源的缺乏紧密相关^[38]。因为在这些荒漠地区, 绿洲本身就是依托河流或湖泊而成, 风沙活动虽然对土壤、植被的发育有重大的影响, 但其与水资源丰度有更为密切联系。而在贺兰山以东的沙地、草原和旱作农业区, 由于现代地表径流缺乏, 风沙活动对地表的影响则占主导地位。但这些地区沙质荒漠化过程发生逆转的比率并不很大, 而与之对比的是 20 世纪 80 年代至今的输沙能力仅为 60 和 70 年代的 20%~50%, 假如没有其他因素的控制, 沙漠化逆转比率则会更大。因此, 自 20 世纪 80 年代至今, 一方面, 人类不合理的活动使中国北方干旱、半干旱地区沙质荒漠化不断发展, 而在另一方面, 风沙活动持续下降则诱发了沙质荒漠化逆过程产生。宏观上就表现出尽管人类活动促使沙质荒漠化过程不断发展^[39], 而在大气背景控制之下, 中国北方干旱、半干旱地区沙质荒漠化过程仍在发生逆转。正如历史上民族的大迁移是气候干旱导致的庄稼欠收和大规模饥荒所致^[40], 现代沙漠化的正逆过程也主要由气候变化所制约, 只不过其或多或少受到人类活动的影响。

4 结论

过去 50 a 以来, 中国北方干旱、半干旱区沙漠化过程对风沙活动的变化有明显的响应。假如将中国北方干旱、半干旱地区的现代沙漠化过程归结为人类活动的结果, 则不能合理解释以下事实: (1) 20 世纪 60 和 70 年代中国北方干旱、半干旱地区处于强烈风沙活跃期, 80 年代至今处于风沙间歇期。与这两个时期相对应的是, 20 世纪 60 和 70 年代中国大部分干

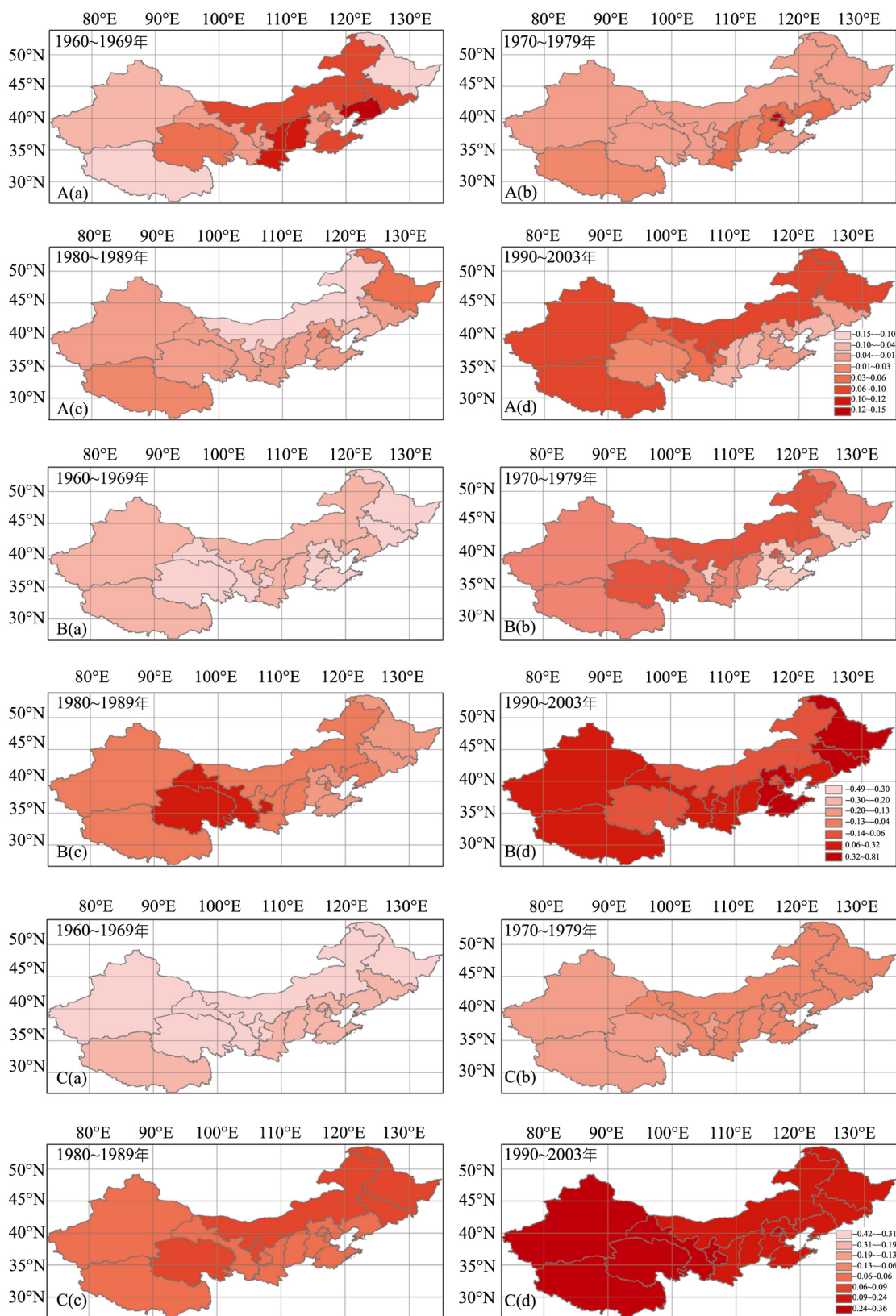


图4 1960~2003年中国北方农作物播种面积(A(a)~(d))、大牲畜头数(B(a)~(d))以及人口密度(C(a)~(d))的变化趋势
采用距平表示, 其计算方法同输沙势计算方法

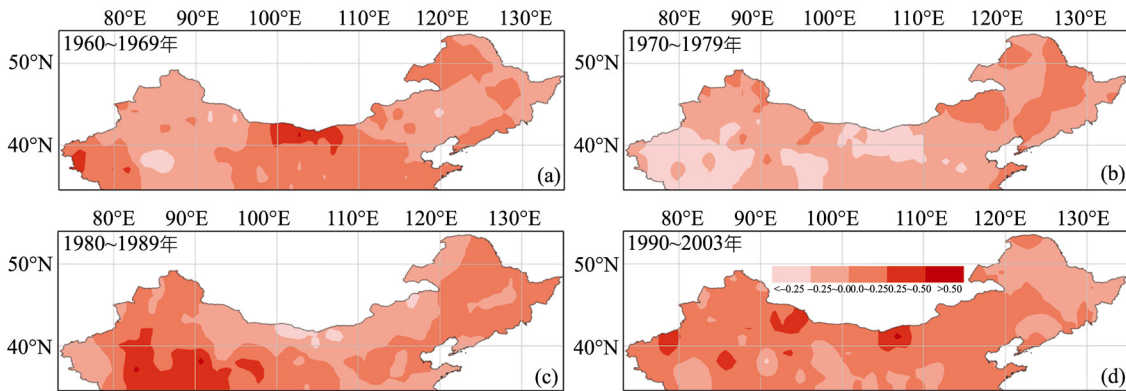


图 5 1960~2003 年中国北方干旱、半干旱地区春季(3~5 月)降水量变化趋势
采用距平表示, 其计算方法同输沙势计算方法

旱、半干旱地区沙漠化强烈发展, 而 80 年代至今则明显出现逆转; (2) 自 20 世纪 50 年代至今, 干旱、半干旱地区人类活动一直在持续加强并导致生态环境日益恶化, 但自 80 尤其是 90 年代以后多数地区沙漠化逆过程发生。因此, 在北方干旱、半干旱区地区, 沙漠化过程主要被气候因素尤其是风沙环境的演变和春季降水量的波动所制约, 尽管人类活动对沙漠化过程有着不可估量的影响, 但总体上其仍在气候背景控制之下。

致谢 感谢国内外同行的交流以及讨论; 感谢徐锡宝和张小强在成图工作中给予的帮助。

参 考 文 献

- 1 Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*. London: Routledge, 1995. 1—290
- 2 Greeley R, Iversen J D. *Wind as a Geological Process on Earth, Mars, Venus and Titan*. Cambridge: Cambridge University Press, 1985. 1—330
- 3 Rosenfeld D, Rudich Y, Lahav R. Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2001, 98: 5975—5980[DOI]
- 4 朱震达. 中国土地荒漠化的概念、成因与防治. *第四纪研究*, 1998, 18: 145—155
- 5 Middleton N, Thomas D. *World Atlas of Desertification* UNEP. London: Edward Arnold, 1992. 1—45
- 6 候仁之. 从红柳河上的石城废墟看毛乌素沙漠的变迁. *文物*, 1973, 1: 35—41
- 7 景爱. *沙漠考古通论*. 北京: 紫禁城出版社, 2000. 136—176
- 8 王炜林. 毛乌素沙漠化年代问题之考古学观察. *考古与文物*, 2002, (5): 80—85

- 9 韩昭庆. 明代毛乌素沙地变迁及其与周边地区垦殖的关系. *中国社会科学*, 2003, (5): 191—204
- 10 Wang X, Chen F H, Dong Z, et al. Evolution of the southern Mu Us Desert in North China over the past 50 years: An analysis using proxies of human activity and climate parameters. *Land Degrad Dev*, 2005, 16: 351—366[DOI]
- 11 Sun J, Ding Z, Liu T, et al. 580000-year environmental reconstruction from aeolian deposits at the Mu Us Desert margin, China. *Quat Sci Rev*, 1999, 18: 1351—1364[DOI]
- 12 李保生, 靳鹤龄, 吕海燕, 等. 150 ka 以来毛乌素沙漠的堆积与变迁过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 85—90
- 13 张兰生, 方修琦, 任国玉, 等. 我国北方农牧交错带的环境演变. *地质前缘*, 1997, 4(1-2): 127—136
- 14 Buckley R. The effect of sparse vegetation cover on the transport of dune sand by wind. *Nature*, 1987, 325: 426—428[DOI]
- 15 Wang X, Dong Z, Liu L. Sand sea activity and interactions with climatic parameters in Taklimakan Sand Sea, China. *J Arid Environ*, 2004, 57: 85—98[DOI]
- 16 Wang X, Dong Z, Zhang J, et al. Wind energy environments and dunefield activity in the Chinese deserts. *Geomorphology*, 2004, 65: 33—48[DOI]
- 17 Fryberger S G, Dean G. Dune forms and wind regime. In: McKee E D, ed. *A Study of Global Sand Seas*. Professional Paper, No. 1052. Washington: US Geological Survey, 1979. 137—169
- 18 Lancaster N. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, southern Africa. *J Arid Environ*, 1988, 14: 233—244
- 19 Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogra Rev*, 1948, 38: 55—94
- 20 王涛, 朱震达, 吴薇. 中国北方土地沙质荒漠化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 45 (增刊): 23—34
- 21 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 我国北方土地沙漠化演变趋势分析. *中国沙漠*, 2003, 23(3): 230—235
- 22 王涛, 吴薇, 薛娴, 等. 近 50 年来中国北方沙漠化土地的时空变

- 化. 地理学报, 2004, 59: 203—212
- 23 薛娴, 王涛, 吴薇, 等. 中国北方农牧交错区沙漠化发展过程及其成因分析. 中国沙漠, 2005, 25: 520—528
- 24 中国国家林业局. 中国荒漠化和沙化状况分报. 北京: 中国国家林业局, 2005
- 25 Sun J, Zhang M, Liu T. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960-1999: Relations to source area and climate. *J Geophys Res*, 2002, 106(D10): 10325—10333[DOI]
- 26 周自江, 章国材. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1954~2000年). 科学通报, 2003, 48(11): 1124—1128
- 27 李智佩, 张维吉, 王岷, 等. 中国北方东部沙质荒漠化的地学观. 西北地质, 2002, 35(3): 7—22
- 28 孙继敏. 中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程. 第四纪研究, 2004, 24: 175—183
- 29 黄富祥, 牛海山, 王明星, 等. 毛乌素沙地植被覆盖率与风蚀输沙率定量关系. 地理学报, 2001, 56: 700—710
- 30 Zobeck T M, Fryrear D W. Chemical and physical characteristics of windblown sediment : Chemical characteristics and nutrient discharge. *Trans Amer Soc Agricul Engineer*, 1986, 29: 1032—1036
- 31 杨泰运. 坝上地区现代沙漠化土地的形成及其整治途径. 中国沙漠, 1985, 5(4): 25—35
- 32 Runnström M C. Rangeland development of the Mu Us sandy land in semiarid China: An analysis using landsat and NOAA remote sensing data. *Land Degrad Dev*, 2003, 14: 189—202[DOI]
- 33 Wu B, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China. *J Arid Environ*, 2002, 50: 429—444[DOI]
- 34 吴薇. 近 50 a 来科尔沁地区沙漠化土地的动态监测结果与分析. 中国沙漠, 2003, 23: 646—651
- 35 方精云, 朴世龙, 贺金生, 等. 近 20 年来中国植被活动在增强. 中国科学 C 辑: 生命科学, 2003, 33: 554—565
- 36 Mainguet M, Silva G G D. Desertification and drylands development: What can be done? *Land Degrad Dev*, 1998, 9: 375—382[DOI]
- 37 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告: (1) 中国气候变化的历史和未来趋势. 气候变化研究进展, 2006, (2): 3—8
- 38 李井成. 河西走廊汉唐古绿洲沙漠化的调查研究. 地理学报, 1998, 53: 106—115
- 39 孙继敏, 刘东生. 中国东北黑土地的荒漠化危机. 第四纪研究, 2001, 21: 72—78
- 40 许靖华. 太阳、气候、饥荒与民族大迁移. 中国科学 D 辑: 地球科学, 1998, 28: 366—384