



中国荒漠化潜在发生区域150年变迁: 过去、现在和未来

蔡依霏^{1,2,3}, 王锋^{1,2,3*}, 潘绪斌⁴, 张方敏⁵, 任国玉^{6,7}, 卢琦^{1,2,3}

1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091;

2. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091;

3. 三北工程研究院, 巴彦淖尔 015200;

4. 中国检验检疫科学研究院, 北京 100176;

5. 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/江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044;

6. 中国气象局国家气候中心, 北京 100081;

7. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074

* 联系人, E-mail: wangfeng@caf.ac.cn

2023-12-03 收稿, 2024-02-08 修回, 2024-03-08 接受, 2024-04-17 网络版发表

中国林业科学研究院基本科研业务费专项(CAFYBB2020QD002, CAFYBB2021MC002, CAFYBB2023ZA009)和国家自然科学基金(32171875, 31570710)资助

摘要 土地荒漠化是影响人类生存和发展的全球性重大生态问题, 我国也是世界上荒漠化最严重的国家之一. 当前中国荒漠化潜在发生区域是否发生变化及近百年来变化规律尚不清楚, 很多研究对未来干旱的预测忽略了CO₂对潜在蒸散的影响, 高估了未来荒漠化扩张的趋势. 本研究基于《联合国防治荒漠化公约》对荒漠化发生区域的定义, 考虑未来CO₂浓度增加对潜在蒸散的影响, 利用高分辨率格点气象数据(CRU TS4.06)以及第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的10个全球气候模式数据, 分析了当前中国荒漠化潜在发生区域空间分布、过去120年的演变规律和未来30年变化趋势. 研究表明: (1) 以1991~2020年为基准期, 中国荒漠化潜在发生区域约为480万km², 约占全国陆域面积的50%. (2) 过去120年(1901~2020年)中国荒漠化潜在发生区域总面积呈先减小后增加的趋势, 变化转折点发生在1978年; 气候整体转向更湿润, 潜在发生面积减少3.5万km². (3) 未来从低到高3种排放强度下, 到2050年中国荒漠化潜在发生区域面积相比现状分别下降5.51%、4.70%和3.73%, 随排放强度增加荒漠化潜在发生区域面积变大; 未来整体气候转向更湿润, 不考虑CO₂浓度增加的影响, 会高估荒漠化潜在发生区域的面积. 综上所述, 预计未来中国荒漠化潜在发生区域的面积将减少, 但我国仍有接近一半的国土面临潜在的荒漠化风险, 维持较低的排放强度有助于降低荒漠化潜在发生区域的面积.

关键词 荒漠化, 气候变化, 潜在蒸散, 排放强度, Penman-Monteith公式

随着全球气候变化和人口不断增加, 荒漠化对全球生物地球化学循环和人类社会的影响将会进一步加剧^[1]. 现有研究表明, 全球有41%的陆地为干旱地区^[2], 全球超过20亿人生活在这些地区^[3]. 从20世纪80年代以来世界上6%的干旱地区经历了荒漠化, 影响了全球近

2.13亿人的生存与发展^[4]. 亚洲拥有世界上最大的干旱和半干旱区^[5], 中国约5.8亿人生活在660万km²的干旱地区, 这些区域正面临着荒漠化的风险^[6]. 北半球中纬度地区作为对气候变化敏感的区域^[7], 区域可持续发展受荒漠化等土地退化过程的重大威胁, 因此对荒漠化

引用格式: 蔡依霏, 王锋, 潘绪斌, 等. 中国荒漠化潜在发生区域150年变迁: 过去、现在和未来. 科学通报, 2024, 69: 4637–4650

Cai Y F, Wang F, Pan X B, et al. 150-year shift of potential geographical distribution of desertification in China: Past, present and future (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 4637–4650, doi: 10.1360/TB-2023-1244

可能发生地区的预测尤为重要。

《联合国防治荒漠化公约》(<https://digitallibrary.un.org/record/163339>)指出“荒漠化是由于气候变化和人类活动等各种因素造成的干旱、半干旱和亚湿润干旱区的土地退化”。荒漠化区域不包括极端干旱区,也不包括一般位于湿润区的石漠化地区。荒漠化潜在发生区域一般发生在干旱地区,该区域生态系统本身相对脆弱,在干旱和强烈人类活动双重驱动下,易发生土壤侵蚀和植被退化的风险^[8]。我国学者从20世纪90年代开始对中国荒漠化潜在发生区域的分布范围开展了一系列研究。慈龙骏和吴波^[9]、吴波等人^[10]、Wu等人^[11]、Sun等人^[12]先后利用不同时间段的长时间序列气象数据,对中国荒漠化气候类型分布区进行了研究。21世纪以来我国西北和东部气候变化显著^[13],在过去20年来气候剧烈变化背景下,当前中国荒漠化潜在发生区域是否发生变化尚不清楚。

干旱在全球和区域的演变规律已有大量的研究。在全球尺度上,一些研究指出过去60年全球变干趋势显著^[14],全球干旱地区面积在过去60年(1948~2008年)里不断扩大^[15]。在洲际尺度上,有研究认为过去100年里亚洲干旱地区经历了整体干燥的趋势^[5],干旱地区有所扩大。在全国尺度上,Zhang等人^[16]发现1961~2013年中国呈略微湿润趋势。在区域尺度上,王飞等人^[17]发现近55年(1961~2015年)黄河流域干旱呈显著增加的趋势。这些研究对全球和局部区域干旱趋势的分析结论不完全相同甚至相反,中国荒漠化潜在发生区域在过去百年尺度上的演变规律是什么、是否与全球变化规律一致值得探索。

一些研究认为,到21世纪末气候变暖会加剧干旱地区扩张,全球干旱地区面积将持续扩大^[14,15]。近年来,有研究认为CO₂浓度升高对未来陆表潜在蒸散存在重要影响^[18,19],依赖传统彭曼(Penman-Monteith, PM)公式^[20]计算潜在蒸散时忽略了CO₂浓度对植物生理作用的影响,高估了潜在蒸散的变化^[21,22],进而会高估未来干旱的严重程度。Greve等人^[18]基于考虑CO₂浓度的改进PM公式计算潜在蒸散,认为未来在大气CO₂浓度增加的情况下,全球变暖不一定会导致干旱的加剧。Yang等人^[23]发现考虑CO₂浓度对潜在蒸散的影响,可以最大限度地减少对干旱的高估。Berg和McColl^[21]发现在CO₂浓度升高的情景下基于生态水文指数预测的未来全球干旱地区范围基本保持不变。这些研究表明,在未来CO₂浓度升高的情况下,中国荒漠化潜在发生区域究竟

如何变化、其发展趋势如何,十分值得探讨。

因此,本研究的主要目标是以中国大陆域为主要研究对象,利用长时间序列气象数据和未来社会经济情景预测数据集,定量分析中国荒漠化潜在发生区域的现状、演变规律和未来趋势,旨在阐明中国荒漠化潜在发生区域的空间分布,为中国荒漠化防治的总体规划提供科学依据。具体目标为:(1)以1991~2020年为基准期,解析中国荒漠化潜在发生区域的现状;(2)探索过去120年(1901~2020年)中国荒漠化潜在发生区域的演变特征;(3)考虑未来CO₂浓度升高的情况下,预测到2050年中国荒漠化潜在发生区域空间格局和发展趋势。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

本研究所用的历史气象数据为英国东安哥拉大学研究中心生产的CRU TS4.06 (Climatic Research Unit gridded Time Series 4.06)气象数据集^[24],包括降水(mm/month)、日潜在蒸散(mm/d)。空间分辨率为0.5°×0.5°,时间跨度为1901~2020年。

未来气象数据为共享社会经济路径下的3种未来排放强度(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)的气象数据,即低排放强度(SSP1-2.6)^[25],中排放强度(SSP2-4.5)^[26]和高排放强度(SSP5-8.5)^[27]。气象数据来自CMIP6 10个气候模式中的多模式集合数据^[28],包括降水(kg m⁻² s⁻¹)、相对湿度(%)、风速(m/s)(10 m)、最高气温(K)、最低气温(K)、气压(Pa)、潜热通量(W/m²)和显热通量(W/m²)。10个气候模式中的气候变量空间分辨率各不相同,时间跨度为2021~2050年,详见表S1。10个气候模式均为第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6)中应用广泛的全球气候模式^[29,30],分别为ACCESS-CM2、CanESM5、GFDL-ESM4、INM-CM4-8、INM-CM5-0、IPSL-CM6A-LR、MPI-ESM1-2-LR、MRI-ESM2-0、MIROC6和NorESM2-MM。对10个模型的结果进行多模式集合平均处理^[31]。

未来CO₂浓度数据来自“基于CMIP6历史和未来情景下的全球逐月大气CO₂浓度数据集”^[32]。该数据集空间分辨率为1°×1°,时间跨度为2021~2050年。

为了便于比较分析,采用最近邻法将未来气候数据中所用的表面大气压、表面潜热通量、表面显热通量、CO₂浓度数据重采样到0.25°×0.25°。绘图时采用等

距圆柱投影。

1.2 研究方法

本研究基于《联合国荒漠化防治公约》(<https://digitalibrary.un.org/record/163339>)中关于荒漠化的定义,以干旱、半干旱和亚湿润干旱气候区为中国荒漠化潜在发生区域。分别以1991~2020年作为现状,1901~2020年作为历史时期和2021~2050年作为未来时期,其中现状和历史时期采用CRU TS4.06气象数据(1901~2020年),未来时期采用CMIP6中低、中、高3种未来排放强度的气象数据。

1.2.1 气候区分类方法

气候分区以联合国环境规划署推荐的干旱指数(aridity index, AI)为主要划分标(<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/42137>)。干旱指数被定义为多年平均降水和多年平均潜在蒸散的比值(式(1)),一般以30年为一个参考周期^[33],广泛用于对气候干湿状况的评估^[18],其中 $0.05 \leq AI < 0.2$ 为干旱区, $0.2 \leq AI < 0.5$ 为半干旱区, $0.5 \leq AI < 0.65$ 为亚湿润干旱区。

$$AI = \frac{\sum_{i=1}^{30} \left(\frac{P_i}{PET_i} \right)}{30}, \quad (1)$$

式中, P_i 和 PET_i 分别为第 i 年降水(mm)和潜在蒸散(mm)。

未来的年潜在蒸散采用考虑 CO_2 浓度的改进PM公式^[19]计算(式(2)):

$$PET = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \left\{ (1 + u_2 [0.34 + 2.4 \times 10^{-4} ([CO_2] - 300)]) \right\}}, \quad (2)$$

式中 Δ 为饱和蒸气压曲线的斜率($kPa/^\circ C$), R_n 为地表净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), G 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$), γ 为湿度计常数($kPa/^\circ C$), T 为距地表2 m处大气温度($^\circ C$); u_2 为地表2 m处风速(m/s); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); $[CO_2]$ 表示大气 CO_2 浓度($cm^3 \cdot m^{-3}$)。未来地表净辐射和土壤热通量的差值($R_n - G$)通过感热和潜热通量相加计算^[22]。地表2 m处风速(m/s)由模式输出的10 m风速根据附录中式(S1)转换得到。

1.2.2 干湿趋势检验

本研究使用Theil-Sen^[34]斜率方法判断1901~2020年和2021~2050年中国荒漠化潜在发生区域干旱指数的变化趋势。Theil-Sen斜率方法通过计算数据组的斜率估计趋势方向。当斜率 >0 时,表示研究区呈现变湿润趋势,当斜率 <0 时,表示研究区呈现变干旱趋势。采用

Mann-Kendall非参数检验法^[35,36]检验研究区干旱指数变化趋势是否显著。当Mann-Kendall非参数检验的 P 值 <0.05 时,表示研究区干旱指数发生了显著变化。

1.2.3 偏差校正

本研究使用参考期(2015~2020年)基于观测气象数据的干旱指数均值 $\overline{AI}_{obs}$ 与基于模式模拟气象数据的干旱指数均值 $AI_{raw \cdot mod}$ 的商,对未来干旱指数进行偏差校正^[37](式(3))。

$$AI_{bc \cdot mod}(t) = AI_{raw \cdot mod}(t) \times \left(\frac{\overline{AI}_{obs}}{\overline{AI}_{raw \cdot mod}} \right), \quad (3)$$

式中, $AI_{bc \cdot mod}(t)$ 是偏差校正后的未来干旱指数, $AI_{raw \cdot mod}(t)$ 为未校正前的干旱指数, t 的范围为2021~2050年。

2 结果

2.1 中国荒漠化潜在发生区域的现状

如图1(a)所示,当前中国荒漠化潜在发生区域约占全国陆域面积的50%,面积约 $4.8 \times 10^6 \text{ km}^2$,主要分布在我国西北、华北和东北地区。塔里木盆地、柴达木盆地、阿拉善高原的北部为极端干旱区,不属于荒漠化潜在发生区域。其中半干旱区面积占比最大,占荒漠化潜在发生区域面积的48.5%,其面积约为 $2.33 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国陆域面积的24.3%,主要分布在青藏高原中部、准噶尔盆地周边、黄土高原北部等地区;干旱区面积占荒漠化潜在发生区域总面积的32.0%,其面积约为 $1.54 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国陆域面积的16.0%,主要分布在塔里木盆地的周边、祁连山、贺兰山的北部;亚湿润干旱区面积占荒漠化潜在发生区域面积的19.5%,其面积约为 $9.36 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国陆域面积的9.8%,大致分布在黄土高原以及华北平原中部。图1(b)显示,从东南向西北由湿到干依次为亚湿润干旱区、半干旱区和干旱区,大致呈条带状分布。

2.2 过去120年中国荒漠化潜在发生区域的演变特征

2.2.1 过去120年中国荒漠化潜在发生区域总体演变特征

过去120年中国荒漠化潜在发生区域的总面积呈现显著的先减小后增加的趋势,由图2(a)可知,1978年是趋势发生变化的转折点,其面积约占全国陆域面积的47.4%。过去120年中,20世纪70~80年代是中国荒漠

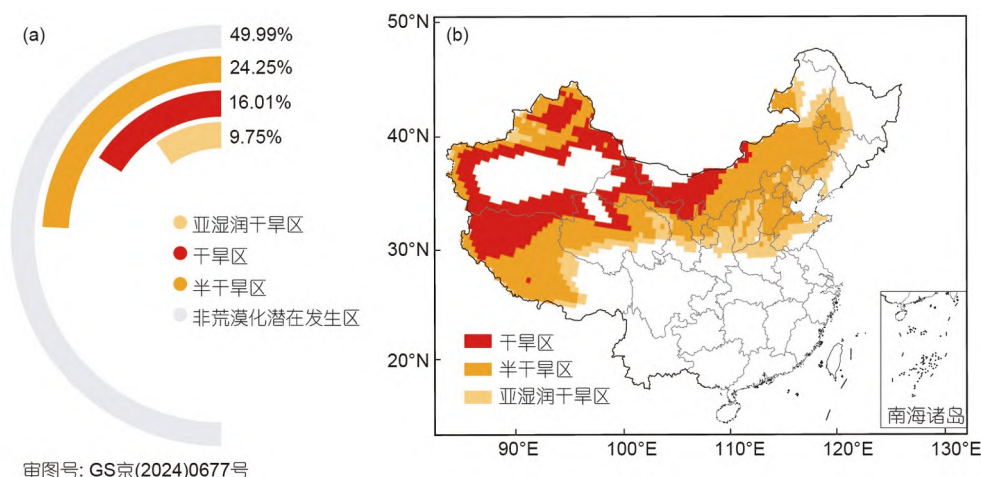


图 1 中国荒漠化潜在发生区域及其气候区空间分布(以1991~2020年为基准期)。(a) 由于干旱指数(AI)决定的干旱区($0.05 \leq AI < 0.2$), 半干旱区($0.2 \leq AI < 0.5$)和亚湿润干旱区($0.5 \leq AI < 0.65$)占中国陆域面积的比例; (b) 中国荒漠化潜在发生区域及干旱区, 半干旱区和亚湿润干旱区空间分布

Figure 1 The spatial distribution of potential geographical distribution of desertification in China and climate zones (relative to the 1991–2020 baseline). (a) arid zone ($0.05 \leq AI < 0.2$), semi-arid zone ($0.2 \leq AI < 0.5$), dry subhumid arid zone ($0.5 \leq AI < 0.65$) based on aridity index (AI); (b) spatial distribution of potential geographical distribution of desertification in China and its climate zones including arid zone, semi-arid zone, dry subhumid zone

化潜在发生区域面积最小的阶段。1978年之前中国荒漠化潜在发生区域约以 $6834 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度缩小, 之后以 $5351 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度增加。过去120年中国荒漠化潜在发生区域的面积减少了 $3.49 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。分析1978年作为中国荒漠化潜在发生区面积趋势变化的转折点的原因, 与降水量和潜在蒸散的变化有关。由30年平均降水量(图S1)和30年平均潜在蒸散(图S2)变化趋势可知, 1978年达到30年平均降水量的最高值以及30年平均潜在蒸散的最低值, 因此荒漠化潜在发生区域面积达到120年内的最低值。

过去120年中国荒漠化潜在发生区域中的干旱、半干旱和亚湿润干旱区呈现不同的变化趋势。干旱区面积显著减小(图2(b)), 缩减速率为 $1078 \text{ km}^2/\text{年}$, 面积减少了 $5.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。半干旱区面积与中国荒漠化潜在发生区域总面积变化类似, 同样呈现先减小后增加的趋势, 1978年前后面积趋势发生转折(图2(c))。1978年之前以 $9626 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度显著缩小, 之后以 $9719 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度增加, 相比20世纪初面积增加了 4980 km^2 。亚湿润干旱区面积与半干旱区面积变化趋势恰好相反, 趋势为先增加后减小, 1970年该气候区面积达到峰值(图2(d))。1978年之前亚湿润干旱区面积以 $3363 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度显著增加, 之后以 $2853 \text{ km}^2/\text{年}$ 的速度逐渐减小, 面积增加了 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。总之, 过去120年半干旱区面积变化速率最快, 干旱区面积变化速率最慢。

2.2.2 过去120年中国荒漠化潜在发生区域气候区类型转变

荒漠化潜在发生区域气候区类型转变, 包括荒漠化潜在发生区域与非潜在发生区域之间的转化和潜在发生区域内不同气候类型之间的转化。图3(a)显示了过去120年中国荒漠化潜在发生区域气候区发生变化的空间分布。荒漠化潜在发生区域转化为非潜在发生区域主要位于内蒙古呼伦贝尔高原、东北平原北部、青藏高原东部等地(图3(a)中绿色方框), 气候区主要由亚湿润干旱区转变为湿润区和少量的干旱区转变为极端干旱区, 分别占全国陆域面积的1.27%和0.13%(图3(b)), 总面积 $1.34 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。非荒漠化潜在发生区域转为潜在发生区域主要分布在黄土高原南部和塔里木盆地西缘(图3(a)中橙色方框), 气候区分别由湿润区转为亚湿润干旱区和极端干旱区转为干旱区, 分别占全国陆域面积的0.65%和0.39%(图3(b)), 总面积为 $9.96 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。对比图3(a)与图1(b)可以发现, 气候区类型变化主要发生在各类型气候区的交界处。总体来说, 在过去120年间, 中国荒漠化潜在发生区域面积减小了 $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要向更湿润气候区类型转化。

图3(a)同时显示了荒漠化潜在发生区域内也发生了气候区类型的转化, 主要包括四种类型, 即干旱区转为半干旱区、半干旱区转为亚湿润干旱区和亚湿润干旱区转为半干旱区、半干旱区转为干旱区。四种转化

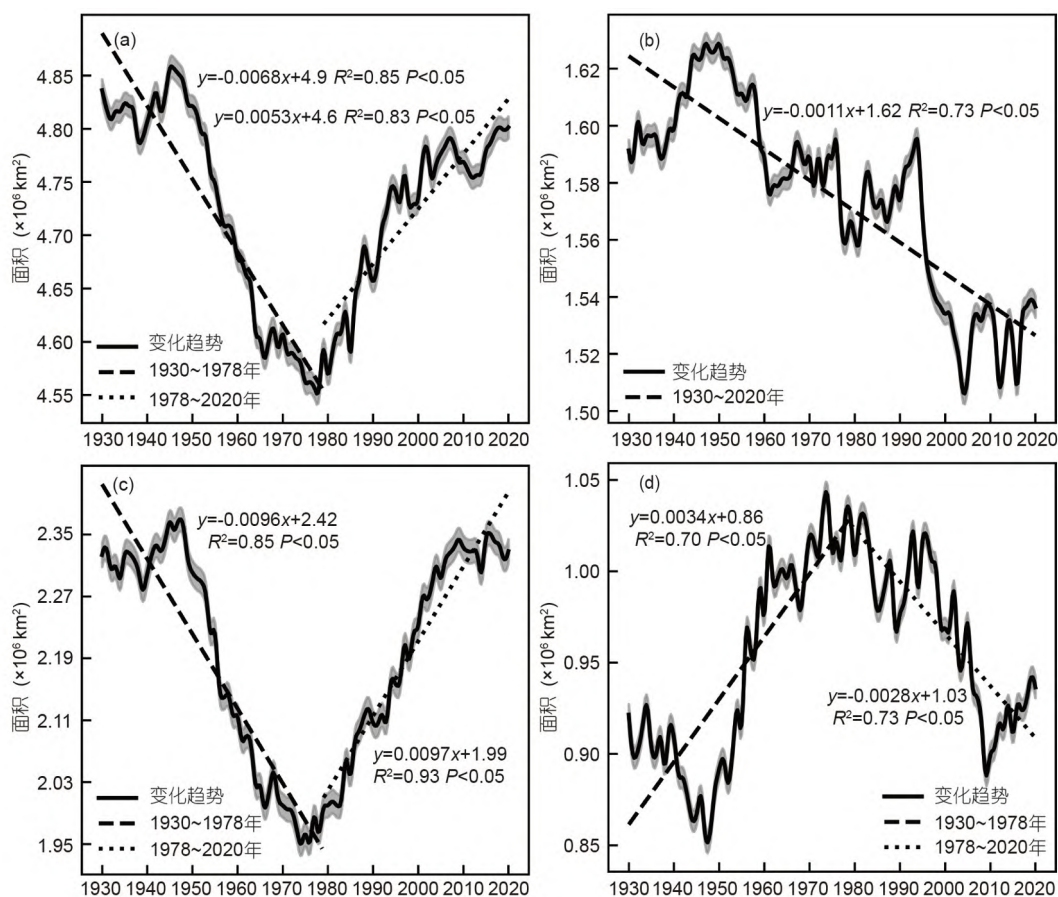


图2 过去120年中国荒漠化潜在发生区域总面积及其气候区面积变化趋势(1901~2020年), 对应年份数据为当前年份前30年平均值, 例如1930年为1901~1930年均值。(a) 中国荒漠化潜在发生区域; (b) 干旱区; (c) 半干旱区; (d) 亚湿润干旱区

Figure 2 The variation trend of the total area and climate zones area of potential geographical distribution of desertification in China over the past 120 years (1901~2020). The data of the corresponding year is the average of the previous 30 years of the current year. For example, the data in 1930 is the average value from 1901~1930. (a) The total area of potential geographical distribution of desertification; (b) arid zone; (c) semi-arid zone; (d) dry subhumid zone

类型面积分别占全国陆域面积的1.09%、1.43%和0.65%和0.26%(图3(b)). 半干旱区转变为亚湿润干旱区的面积最大, 半干旱区面积在过去120年变化最大. 以上结果表明, 荒漠化潜在发生区域内有 $3.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的面积发生了气候区类型之间的转化, 其中 $2.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的区域向更湿润气候类型转换, $8.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的区域向更干旱气候类型转换.

综上, 过去120年中国荒漠化潜在发生区域中 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$ 的区域发生了气候区类型之间的转化, 占全国陆域面积5.9%.

2.2.3 过去120年中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化趋势

过去120年中国荒漠化潜在发生区域干湿变化整体呈现“东干西湿”趋势(图4(a)), 显著变干的区域明显

少于显著变湿的区域(图4(b)). 显著“湿化”的区域集中在中国的西北部, 包括准噶尔盆地西部、青藏高原中部和柴达木盆地东部部分地区(图4(b)), 显著“干化”的区域在黄土高原中部、青藏高原西部. 总体来说, 中国荒漠化潜在发生区域显著湿润的区域面积为 $8.62 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占全国陆域面积的8.98%, 显著干旱的区域面积为 $1.87 \times 10^5 \text{ km}^2$, 约占全国陆域面积1.95%, 显著“湿化”区域面积约是显著“干化”区域面积的4倍.

2.3 未来中国荒漠化潜在发生区域空间格局和发展趋势

2.3.1 未来中国荒漠化潜在发生区域空间格局

在未来低、中、高3种排放强度下, 到2050年中国荒漠化潜在发生区域面积均减少, 相对现状分别减少

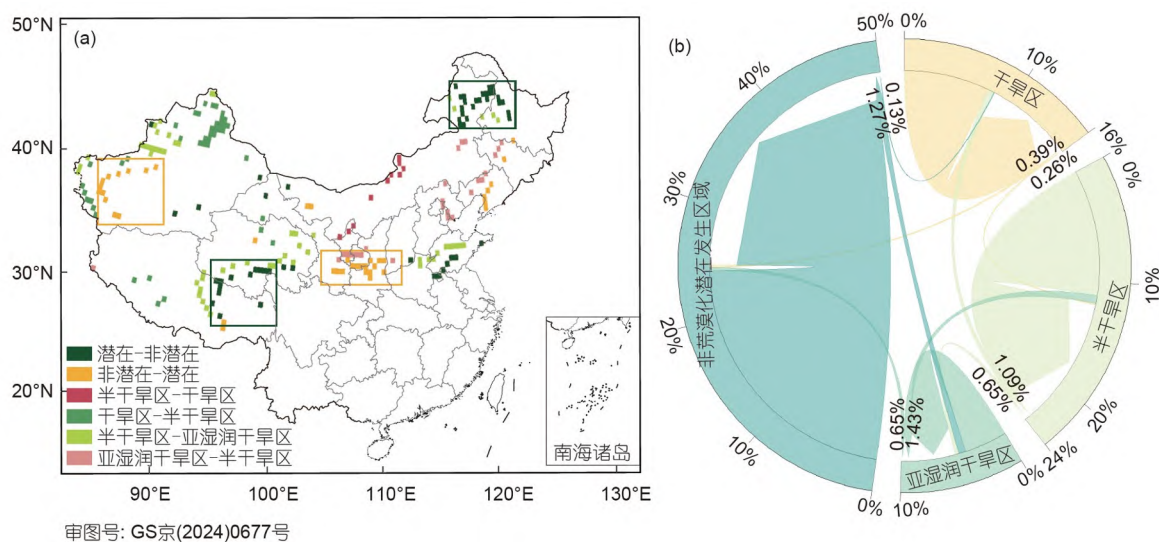


图 3 过去120年中国荒漠化潜在发生区域及其气候区空间分布和类型转化(1901~2020年). (a) 中国荒漠化潜在发生区域及其气候区发生变化区域的空间分布, 包括中国荒漠化潜在发生区域和非潜在发生区域之间的转换, 其中绿框表示潜在发生区域向非潜在发生区域转换的主要区域, 橙框表示非潜在发生区域向潜在发生区域转换的主要区域; (b) 中国荒漠化潜在发生区域及其气候区类型变化方向及变化面积百分比. 弦图展示了1901~2020年中国荒漠化潜在发生区域及其气候区面积转化的方向和比例, 箭头指向到2020年转化后的气候区类型. 例如, 图中亚湿润干旱区上显示的箭头和数字1.43%, 表示经过120年半干旱区中有占国土面积1.43%的区域转化为亚湿润干旱区

Figure 3 The spatial distribution and type transformation of potential geographical distribution of desertification in China and climate zones over the past 120 years (1901–2020). (a) The spatial distribution of potential geographical distribution of desertification and climate zones of China. The green box represents the main region transitioning from potential geographical distribution of desertification to non-potential geographical distribution of desertification, and the orange box represents the main region transitioning from non-potential geographical distribution of desertification to potential geographical distribution of desertification; (b) Direction and percentage change of area change for potential geographical distribution of desertification in China and climate zones. The chordal graph shows the transformation of the potential geographical distribution of desertification in China. The colored arrows represent the changes in different climate zones from 1901 to 2020, with the arrows pointing to the transformed types in 2020. For example, 1.43% of the total land area is changed from a semi-arid zone to a dry subhumid zone over the past 120 years

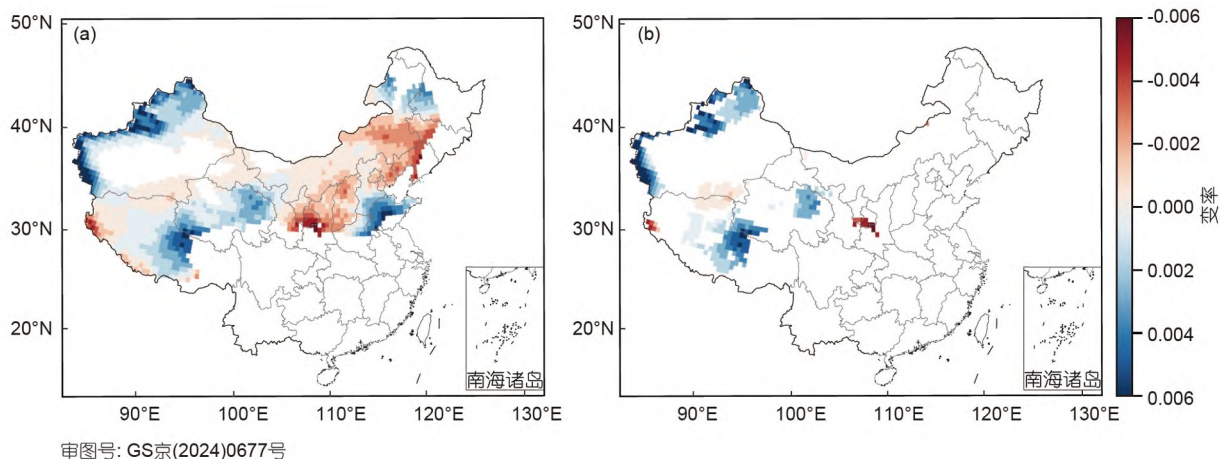


图 4 过去120年中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化趋势(1901~2020年). (a) 中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化趋势空间分布; (b) 中国荒漠化潜在发生区域干湿强度显著变化区域($P < 0.05$)

Figure 4 The variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification in China over the past 120 years (1901–2020). (a) The spatial distribution of variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification in China; (b) the spatial distribution of significantly variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification in China when $P < 0.05$

了 2.64×10^5 、 2.26×10^5 、 $1.79 \times 10^5 \text{ km}^2$, 分别下降了5.51%、4.70%和3.73%(图5(a)~(c)), 主要集中在中国的东北平原、柴达木盆地东部和黄土高原部分地区。

未来干旱区和半干旱区面积减小, 亚湿润干旱区面积增加。相比现状, 干旱区在新疆北部的准噶尔盆地东部与吐鲁番盆地北部连接, 内蒙古高原北侧的干旱区面积有所减小, 塔里木盆地周围的干旱区边界向盆地中心收缩。半干旱区边界向西北方向移动, 亚湿润干旱区在华北平原的面积有所增加。低、中、高3种排放强度下, 相对现状干旱区面积分别减少1.17%、1.67%、1.22%, 半干旱区面积分别减少8.06%、6.92%、7.82%, 亚湿润干旱区分别增加3.72%、3.88%和5.31%。

总之, 未来3种排放强度下, 半干旱区面积变化最大。排放强度越低, 荒漠化潜在发生区域的面积越小。

2.3.2 未来中国荒漠化潜在发生区域气候区类型转变

未来低、中、高3种排放强度下, 到2050年中国荒漠化潜在发生区域和非潜在发生区域以及荒漠化潜在发生区域内各气候类型之间发生了较大变化。图6(a)、(c)和(e)显示荒漠化潜在发生区域转化为非潜在发生区域主要位于东北平原外缘、黄土高原南部、柴达木盆地南部和阿拉善高原西北部, 而非荒漠化潜在发生区域转化为潜在发生区域主要是位于新疆塔里木盆地的西北外缘。

低排放强度下, 荒漠化潜在发生区域转化为非潜在发生区域主要由亚湿润干旱区转变为湿润区以及干旱区转变为极端干旱区, 分别占全国陆域面积的3.07%和0.51%; 非荒漠化潜在发生区域转化为潜在发生区域

主要是极端干旱区转为干旱区, 占全国陆域面积的0.60%(图6(b))。中、高排放强度下的气候区域转变情况与低排放强度类似(图6(d)和(f))。总体来说, 3种排放强度下荒漠化潜在发生区域转为非潜在发生区域, 占我国陆域面积分别为3.58%、3.07%、2.92%, 由非荒漠化潜在发生区域转为潜在发生区域占我国陆域面积分别为0.60%、0.47%、0.80%。

图6(b)也显示了低排放强度下荒漠化潜在发生区域内的气候区类型转化。主要包括4种类型, 即半干旱区转为亚湿润干旱区、干旱区转为半干旱区和亚湿润干旱区转为半干旱区、半干旱区转为干旱区。上述4种转化类型分别占全国陆地面积的4.89%、1.06%、0.10%和0.43%。中、高排放强度的转化类型与比例与低排放强度类似(图6(d)和(f))。

总之, 3种排放强度下气候区类型转变都以半干旱区转化为亚湿润干旱区为主, 半干旱区面积变化也最剧烈。未来排放强度越低, 中国荒漠化潜在发生区域转为非潜在发生区域的比例越高。

2.3.3 未来中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化

到2050年中国荒漠化潜在发生区域整体呈现主体“湿化”、局部“干化”趋势(图7(a), (c), (e))。低排放强度下, 全国显著变湿区域位于塔里木盆地南部和北部、柴达木盆地南部、呼伦贝尔高原西部, 显著变干区域位于黄土高原中部、华北平原东部部分地区(图7(b))。中排放强度下, 全国显著变湿区域位于青藏高原中部和北部、东北平原中部(图7(d))。高排放强度下, 全国显著变湿区域仅存在于青藏高原西部和北部、塔里木盆地北部(图7(f))。中、高排放强度下, 全国显著变干区

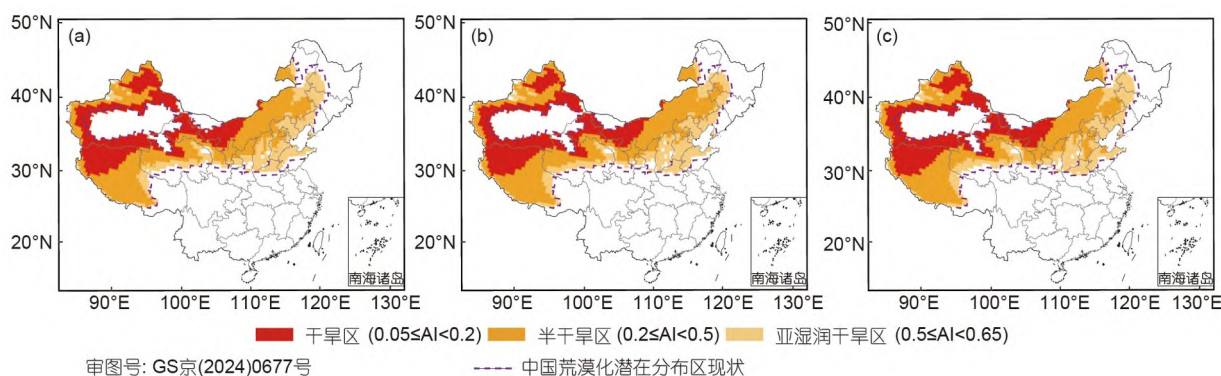
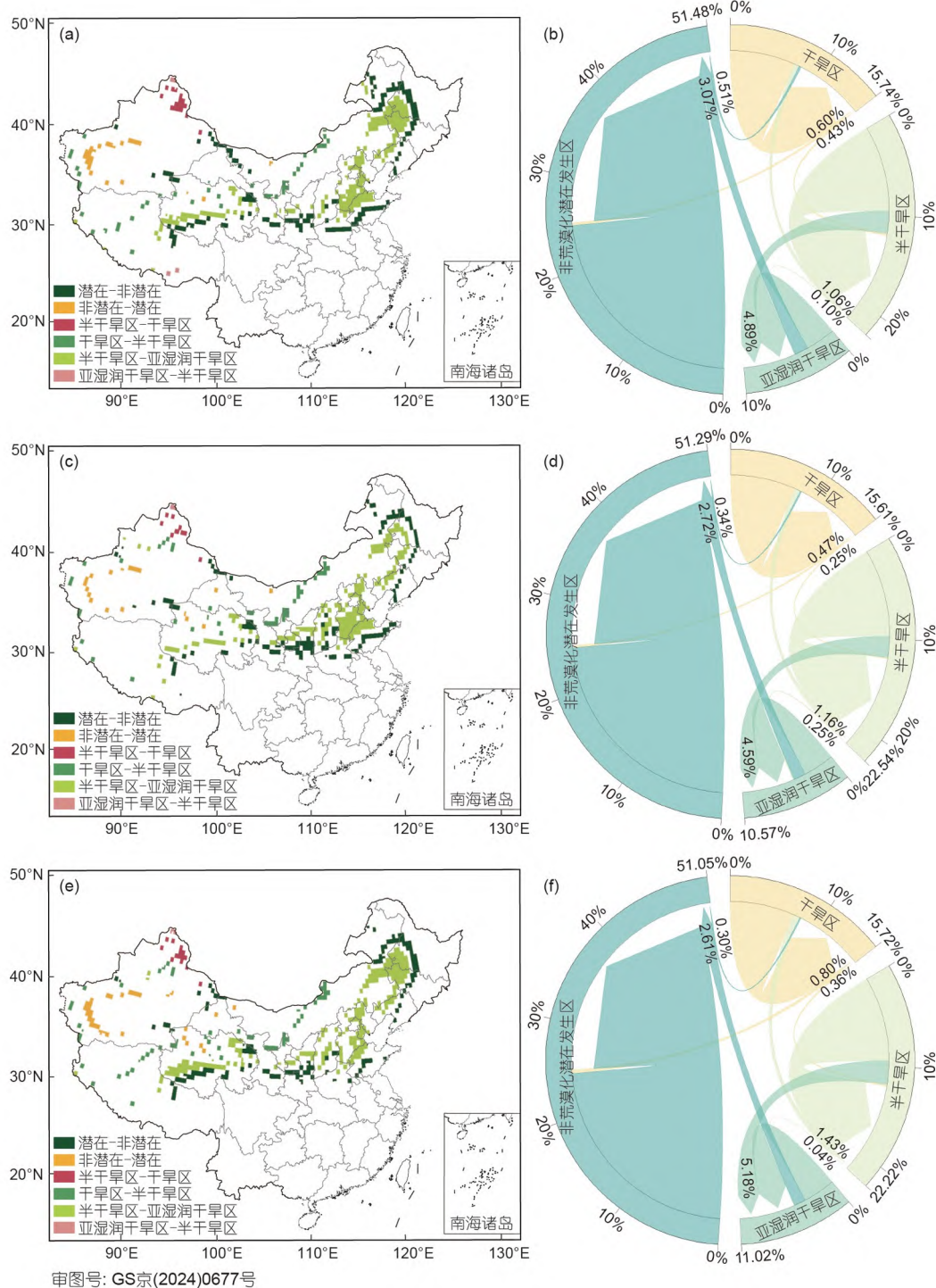


图5 不同共享社会经济路径下2050年中国荒漠化潜在发生区域及其气候区空间分布预测和比较。(a)为低排放强度(SSP1-2.6);(b)为中排放强度(SSP2-4.5);(c)为高排放强度(SSP5-8.5)

Figure 5 Prediction and comparison of potential geographical distribution of desertification in China under different shared socioeconomic pathway scenarios in 2050. (a) Low emission scenario (SSP1-2.6); (b) medium emission scenario (SSP2-4.5); (c) high emission scenario (SSP5-8.5)



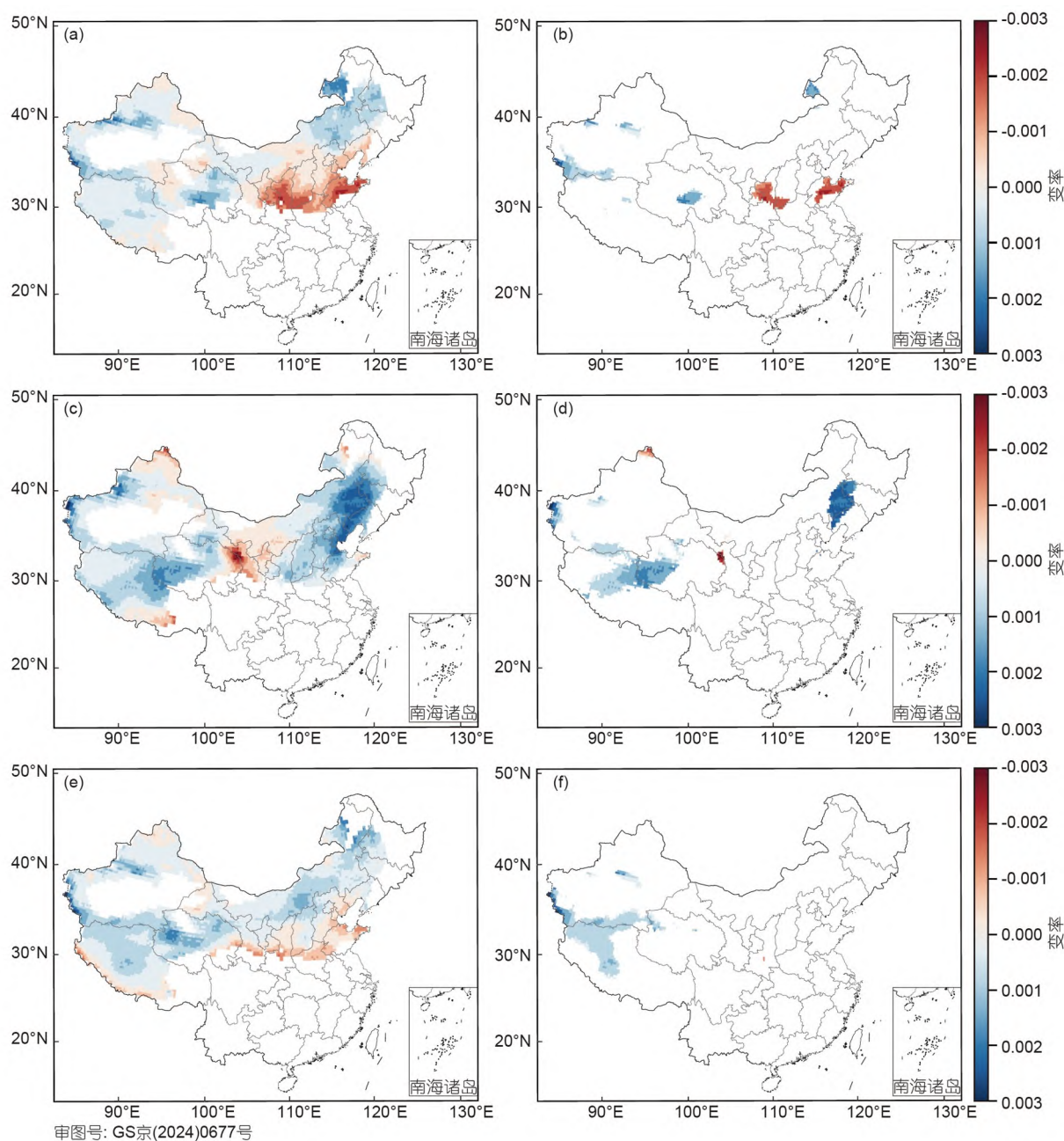


图 7 不同共享社会经济情景下2050年中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化趋势预测(以中国荒漠化潜在发生区域现状为基准期(1991~2020年)。其中(a)、(c)和(e)为中国荒漠化潜在发生区域干湿强度变化趋势空间分布,其中(b)、(d)和(f)为中国荒漠化潜在发生区域干湿强度显著变化区域($P<0.05$); (a)和(b)为低排放强度(SSP1-2.6); (c)和(d)为中排放强度(SSP2-4.5); (e)和(f)为高排放强度(SSP5-8.5)

Figure 7 Based on regional scope of the potential geographical distribution of desertification in China in 1991–2020, projections of the spatial distribution of variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification under different shared socioeconomic pathway scenarios in 2050. Subgraphs (a), (c), and (e) denote the spatial distribution of variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification in China; Subgraphs (b), (d), and (f) denote the spatial distribution of significantly variation trend of dry and wet intensity in the potential geographical distribution of desertification in China ($P<0.05$) (a) and (b) low emission scenario (SSP1-2.6); (c) and (d) medium emission scenario (SSP2-4.5); (e) and (f) high emission scenario (SSP5-8.5), respectively

域较少。从低到高3种排放强度,到2050年全国显著变湿的区域分别占中国陆域面积的2.86%、7.36%和

5.49%,而显著变干的区域仅占中国陆域面积的1.56%、0.44%和0.01%。总体来说,未来中国荒漠化潜

在发生区域整体转向更湿润气候。

3 讨论

3.1 中国荒漠化潜在发生区域现状研究

中国荒漠化潜在发生区域现状对中国荒漠化防治战略、中国现阶段北方重大生态修复工程布局具有重要参考价值。在以往的研究中,一些学者利用气象数据或者遥感数据对中国荒漠化潜在发生区域格局和面积进行了估算。慈龙骏和吴波^[9]利用1981~1990年全国1864个气象站数据第一次发表了中国荒漠化潜在发生区域,指出中国荒漠化潜在发生范围占中国陆域面积34.5%。吴波等人^[10]利用1950~1990年全国671个气象站数据使用PM公式替代Thornthwaite公式重新计算了潜在蒸散,修正后的结果为中国荒漠化潜在发生区域范围约占中国陆域面积的47.1%。Sun等人^[12]利用1981~2010年的高分辨率栅格气象数据,使用Thornthwaite公式计算潜在蒸散,估计中国荒漠化潜在发生区域占中国陆域面积的33.6%。

值得注意的是Thornthwaite公式是基于温度的单因素法估算潜在蒸散,忽略了风速、湿度和太阳辐射等其他气象因素的变化对潜在蒸散的影响^[3,8]。Thornthwaite公式适用于在气象观测要素较少的环境估计潜在蒸散,但会低估干旱环境下的潜在蒸散,高估湿润和寒冷环境下的潜在蒸散^[39]。PM公式基于能量和质量平衡原理,综合了气温、辐射、风速、湿度、气压等因素,对潜在蒸散估算更准确^[23]。本研究结果与前人利用PM公式计算的中国荒漠化潜在发生区域面积^[10]相近,以1991~2020年为基准期中国荒漠化潜在发生区域面积为480万平方公里,约占中国陆域面积的50%,相比30年前略有增加。

此外值得一提的是《联合国防治荒漠化公约》对于荒漠化潜在发生区域的划定是为了对易发生土地退化的区域进行保护和治理,并未将全球人迹罕至、自然条件差、治理难度大、投资成本高的极端干旱区划入荒漠化潜在发生区域^[40]。我国塔里木盆地、河西走廊西部额济纳地区、柴达木盆地虽然属于极端干旱区,但是该区域受高山冰雪融水影响^[41],有天然的绿洲分布,人类在此长期定居生活,也存在荒漠化风险。这种在极端干旱区但是有人类长期定居生活的区域,在未来应划入可能会发生荒漠化的区域,纳入全球荒漠化防治总体规划。

3.2 全球与中国荒漠化历史演变规律比较

近年来一些学者对全球干旱地区变化情况进行了大量研究,一般认为从20世纪50年代到本世纪初全球干旱地区呈扩张趋势^[14,15],亚洲干旱地区在过去100年(1901~2016年)整体经历了干燥趋势,干旱地区有所扩大^[5]。中国沙漠沙地自20世纪50年代以来有所增加,80年代中期后有持续减少^[8,42]。这可能是由于近二三十年中国西北地区进入了显著增湿期^[13]和国家增加了对大型生态修复工程建设的投入^[43,44]。本研究定义的中国荒漠化潜在发生区域是指可能由于干旱而发生荒漠化的地理区域,即干旱指数在0.05~0.65的气候区,与上述研究关注的对象不完全相同。研究发现中国荒漠化潜在发生区域在过去百年尺度上呈现先减小后增加的趋势,其中20世纪70~80年代是中国荒漠化潜在发生区域面积最小的阶段,1978年是趋势发生变化的转折点。

本研究在评估中国荒漠化历史演变规律时,更关注变化趋势的长时间序列的分析。CRU TS 4.06数据集满足百年时间尺度,虽然分辨率较低,但已有研究通过对比CRU数据与国家气候中心台站数据,发现CRU数据与观测数据有很好的相关性,降水和气温数据均接近观测值^[45,46]。CRU数据集所使用的中国地区早期台站资料,包括了160个气候基准站的观测数据,以及通过个人通讯方式获得的非基准站资料^[47]。我国早期西部地区站点数据较少,该数据集利用了青藏高原毗邻的中亚和南亚国家的观测站数据进行插值获取。虽然数据存在一定不确定性^[45],但仍可以有效补充我国西部地区历史气象数据,较为可靠和完整地描述我国20世纪上半叶气候变化的基本特征^[46]。

3.3 未来荒漠化发展趋势预测比较

早在21世纪初,已有学者预测未来中国荒漠化气候区面积将扩大,干旱程度进一步加剧^[48]。多篇基于CMIP未来气候数据的研究也预测,未来全球干旱地区土地面积将逐渐增加^[14,15,49],亚洲地区干旱将加剧,干旱面积将扩大^[5,50]。上述研究均利用联合国粮农组织推荐的传统PM公式^[20]计算潜在蒸散预测干旱趋势,没有考虑植被对大气中CO₂浓度升高的响应^[19]。近年来多项研究发现忽略CO₂浓度对植物生理作用的影响,会高估潜在蒸散,导致高估未来干旱的严重程度^[18,21~23]。

本研究发现未来低、中、高3种排放强度下,如果考虑CO₂浓度升高,到2050年中国荒漠化潜在发生区域面积均减少,相比现状分别下降了5.51%、4.70%和

3.73%。如果利用不考虑CO₂浓度的PM公式计算潜在蒸散, 3种排放强度下中国荒漠化潜在发生区域面积分别下降5.07%、4.11%和3.45%(图S3)。相比考虑CO₂浓度变化的修正PM公式, 传统PM公式确实会高估荒漠化潜在发生区域的面积。

本研究使用的未来气象数据来自最新的第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)。虽然CMIP6涵盖了更多的气候模式, 在物理和生物地球化学过程中有了很大的提升和改进^[51], 具有更高的气候敏感性^[52]。但CMIP6不同模式的模拟结果仍存在较大的差异^[53], 未来需要进一步提高和改善模式, 减少气候模拟和预估的不确定性, 提高预测的准确率^[54]。

3.4 荒漠化潜在发生区的不确定性分析

荒漠化是自然和社会经济因素双重作用的结果。当前研究主要从自然气候条件去分析荒漠化潜在发生区域的变化, 并未量化考虑人类活动对荒漠化的影响。在荒漠化潜在发生区域, 人口数量增加、过度放牧^[6]以及人类活动引起的温室气体浓度的变化^[55], 都会加剧生态系统的脆弱性和敏感性, 导致荒漠化的发生。但合理的人类土地利用管理是地球绿化的主要驱动力^[56], 在干旱区域开展生态保护和恢复工程建设对退化土地恢复和防治土地荒漠化具有重要意义。

另外当前划定荒漠化潜在发生区域的方法, 并未考虑局部区域的地理条件, 如新疆西部很多地区常年有高山冰雪融水的补给, 并不完全受当地气候干旱的影响。未来研究需进一步综合人类活动和自然条件对荒漠化潜在发生区域的影响, 深入分析和评估荒漠化潜在发生区域。

4 结论

以1991~2020为基准期, 中国荒漠化潜在发生区域约占全国陆域面积的50%, 约为480万 km²。过去120年中国荒漠化潜在发生区域的面积呈现先减小后增加的趋势, 其中20世纪70~80年代是中国荒漠化潜在发生区域面积最小时期, 趋势变化的转折点发生在1978年, 整体向更湿润气候类型转化。到2050年, 预测在不同排放强度下中国荒漠化潜在发生区域面积均将减少, 但排放强度越低荒漠化潜在发生区域面积越小。未来中国荒漠化潜在发生区域整体继续向更湿润的气候类型转化。若不考虑CO₂浓度增加的影响, 会高估未来荒漠化潜在发生区域。与过去相比, 预计中国荒漠化潜在发生区域会有更大面积的气候区向更湿润类型转化。尽管如此, 中国仍有近一半的区域面临土地荒漠化的风险, 维持较低的排放强度有助于降低中国荒漠化潜在发生区域的面积。

参考文献

- Huang J, Zhang G, Zhang Y, et al. Global desertification vulnerability to climate change and human activities. *Land Degrad Dev*, 2020, 31: 1380–1391
- Bastin J F, Berrahmouni N, Grainger A, et al. The extent of forest in dryland biomes. *Science*, 2017, 356: 635–638
- Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 2007, 316: 847–851
- Burrell A L, Evans J P, De Kauwe M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nat Commun*, 2020, 11: 3853
- Miao L, Li S, Zhang F, et al. Future drought in the dry lands of Asia under the 1.5 and 2.0 °C warming scenarios. *Earth's Future*, 2020, 8: E2019EF001337
- Li C, Fu B, Wang S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 858–873
- Li H, Li Z, Chen Y, et al. Projected meteorological drought over asian drylands under different CMIP6 scenarios. *Remote Sens*, 2021, 13: 4409
- Wang X, Geng X, Liu B, et al. Desert ecosystems in China: Past, present, and future. *Earth Sci Rev*, 2022, 234: 104206
- Ci L J, Wu B. Climate type and the potential extent determination of desertification in China (in Chinese). *J Desert Res*, 1997, 17: 107–111 [慈龙俊, 吴波. 中国荒漠化气候类型划分与潜在发生范围的确定. 中国沙漠, 1997, 17:107–111]
- Wu B, Su Z Z, Chen Z X. A revised potential extent of desertification in China (in Chinese). *J Desert Res*, 2007, 27: 911–917 [吴波, 苏志珠, 陈仲新, 等. 中国荒漠化潜在发生范围的修订. 中国沙漠, 2007, 27: 911–917]
- Wu S, Yin Y, Zheng D, et al. Aridity/humidity status of land surface in China during the last three decades. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, 48: 1510–1518
- Sun B, Gao Z, Li Z, et al. Dynamic and dry/wet variation of climate in the potential extent of desertification in China during 1981–2010. *Environ Earth Sci*, 2015, 73: 3717–3729

- 13 Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 3757–3771 [张强, 朱颀, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征. 科学通报, 2021, 66: 3757–3771]
- 14 Huang J, Yu H, Guan X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 166–171
- 15 Song F, Fu Q. Expansion of global drylands under a warming climate. *Atmospheric Chem Phys*, 2013, 13: 10081–10094
- 16 Zhang J, Sun F, Xu J, et al. Dependence of trends in and sensitivity of drought over China (1961–2013) on potential evaporation model. *Geophys Res Lett*, 2016, 43: 206–213
- 17 Wang F, Wang Z M, Yang H B, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI (in Chinese). *Sci Sin-Terrae*, 2018, 48: 1169–1183 [王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于SPEI的黄河流域干旱时空格局研究. 中国科学: 地球科学, 2018, 48: 1169–1183]
- 18 Greve P, Roderick M L, Ukkola A M, et al. The aridity Index under global warming. *Environ Res Lett*, 2019, 14: 124006
- 19 Yang Y, Roderick M L, Zhang S, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections. *Nat Clim Change*, 2019, 9: 44–48
- 20 Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao Rome, 1998, 300: D05109
- 21 Berg A, McColl K A. No projected global drylands expansion under greenhouse warming. *Nat Clim Change*, 2021, 11: 331–337
- 22 Milly P C D, Dunne K A. Potential evapotranspiration and continental drying. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 946–949
- 23 Yang Y, Zhang S, Roderick M L, et al. Comparing Palmer Drought Severity Index drought assessments using the traditional offline approach with direct climate model outputs. *Hydrol Earth Syst Sci*, 2020, 24: 2921–2930
- 24 Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci Data*, 2020, 7: 1–8
- 25 Van Vuuren D P, Stehfest E, Gernaat D E H J, et al. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Glob Environ Change*, 2017, 42: 237–250
- 26 Fricko O, Havlik P, Rogelj J, et al. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. *Glob Environ Change*, 2017, 42: 251–267
- 27 Kriegler E, Bauer N, Popp A, et al. Fossil-fueled development (SSP5): An energy and resource intensive scenario for the 21st century. *Glob Environ Change*, 2017, 42: 297–315
- 28 O'Neill B C, Tebaldi C, Van Vuuren D P, et al. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci Model Dev*, 2016, 9: 3461–3482
- 29 Xiang J, Zhang L, Deng Y, et al. Projection and evaluation of extreme temperature and precipitation in major regions of China by CMIP6 models. *Eng J Wuhan Univ*, 2021, 54: 46–57
- 30 Wang X, Ge Q, Geng X, et al. Unintended consequences of combating desertification in China. *Nat Commun*, 2023, 14: 1139
- 31 Xie W Q, Wang S S, Yan X D. Evaluation on CMIP6 global climate model simulation of the annual mean daily maximum and minimum air temperature in China (in Chinese). *Clim Environ Res*, 2022, 27: 63–78 [谢文强, 王双双, 延晓冬. CMIP6 全球气候模式对中国年平均日最高气温和最低气温模拟的评估. 气候与环境研究, 2022, 27: 63–78]
- 32 Cheng W, Dan L, Deng X, et al. Global monthly gridded atmospheric carbon dioxide concentrations under the historical and future scenarios. *Sci Data*, 2022, 22: 83
- 33 Carter T R, Hulme M, Lal M. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change, 1999. 69
- 34 Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *J Am Stat Assoc*, 1968, 63: 1379–1389
- 35 Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: J Econometric Soc*, 1945. 245–259
- 36 Kendall M G. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin & Co., Ltd., 1948
- 37 Wang L, Chen W, Huang G, et al. Changes of the transitional climate zone in East Asia: Past and future. *Clim Dyn*, 2017, 49: 1463–1477
- 38 Chen D, Gao G, Xu C Y, et al. Comparison of the Thornthwaite method and pan data with the standard Penman-Monteith estimates of reference evapotranspiration in China. *Clim Res*, 2005, 28: 123–132
- 39 Mather J R, Ambroziak R A. A search for understanding potential evapotranspiration. *Geogr Rev*, 1986, 76: 355–370
- 40 Ci L J. Desertification of extra-arid deserts (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 2616–2626 [慈龙俊. 极端干旱荒漠的“荒漠化”. 科学通报, 2011, 56: 2616–2626]
- 41 Zhou X D, Zhu Q J, Sun Z P, et al. Preliminary study on regionalization desertification climate in China (in Chinese). *J Nat Disasters*, 2002, 11: 125–131 [周晓东, 朱启疆, 孙中平, 等. 中国荒漠化气候类型划分方法的初步探讨. 自然灾害学报, 2002, 11: 125–131]
- 42 Wang X, Chen F, Hasi E, et al. Desertification in China: An assessment. *Earth-Sci Rev*, 2008, 88: 188–206
- 43 Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Glob Change Biol*, 2019, 2: 122–129
- 44 Wang F, Pan X, Gerlein-Safdi C, et al. Vegetation restoration in Northern China: A contrasted picture. *Land Degrad Dev*, 2020, 31: 669–676

- 45 Wang Z L, Li Y H, Wang S P, et al. Characteristics of drought at multiple time scales in the east of northwest China from 1901 to 2012 (in Chinese). *J Desert Res*, 2015, 35: 1666–1673 [王芝兰, 李耀辉, 王素萍, 等. 1901—2012年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征. *中国沙漠*, 2015, 35: 1666–1673]
- 46 Wen X Y, Wang S W, Zhu J H, et al. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution on grid data (in Chinese). *Chin J Atmos Sci*, 2006, 30: 894–904 [闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化. *大气科学*, 2006, 30: 894–904]
- 47 New M, Hulme M, Jones P. Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: Development of 1901–96 monthly grids of terrestrial surface climate. *J Clim*, 2000, 13: 2217–2238
- 48 Ci L J, Yang X H, Chen Z X. The potential impacts of climate change scenarios on desertification in China (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2002, 9: 287–294 [慈龙俊, 杨晓辉, 陈仲新. 未来气候变化对中国荒漠化的潜在影响. *地学前缘*, 2002, 9: 287–294]
- 49 Asadi Zarch M A, Sivakumar B, Malekinezhad H, et al. Future aridity under conditions of global climate change. *J Hydrol*, 2017, 554: 451–469
- 50 Li H, Li Z, Chen Y, et al. Drylands face potential threat of robust drought in the CMIP6 SSPs scenarios. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 114004
- 51 Zhu H, Jiang Z, Li L. Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6. *Sci Bull*, 2021, 66: 2528–2537
- 52 The CMIP6 landscape. *Nat Clim Change*, 2019, 9: 727
- 53 Zhang D F, Gao X J. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 2516–2526 [张冬峰, 高学杰. 中国21世纪气候变化的 RegCM4 多模拟集合预估. *科学通报*, 2020, 65: 2516–2526]
- 54 Zhou T J, Zou L W, Chen X L. Commentary on the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) (in Chinese). *Clim Change Res*, 2019, 15: 445–456 [周天军, 邹立维, 陈晓龙. 第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)评述. *气候变化研究进展*, 2019, 15: 445–456]
- 55 Lee X, Goulden M L, Hollinger D Y, et al. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature*, 2011, 479: 384–387
- 56 Gonsamo A, Ciais P, Miralles D G, et al. Greening drylands despite warming consistent with carbon dioxide fertilization effect. *Glob Change Biol*, 2021, 27: 1–14

补充材料

表S1 CMIP6模式简介

图S1 1901~2020年中国荒漠化潜在发生区域30年均降水量变化趋势

图S2 1901~2020年中国荒漠化潜在发生区域30年均潜在蒸散变化趋势

图S3 不考虑CO₂浓度升高的影响时, 不同共享社会经济路径下2050年中国荒漠化潜在发生区域及其气候区空间分布预测

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “中国荒漠化潜在发生区域150年变迁: 过去、现在和未来”

150-year shift of potential geographical distribution of desertification in China: Past, present and future

Yifei Cai^{1,2,3}, Feng Wang^{1,2,3*}, Xubin Pan⁴, Fangmin Zhang⁵, Guoyu Ren^{6,7} & Qi Lu^{1,2,3}¹ Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;² Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;³ Institute of Great Green Wall, Bayannur 015200, China;⁴ Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Beijing 100176, China;⁵ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;⁶ National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;⁷ School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China* Corresponding author, E-mail: wangfeng@caf.ac.cn

Land desertification is a major ecological challenge facing the world, profoundly affecting human life and sustainable development. As one of the countries with the most severe desertification issues across the world, China has a population of 580 million living on 6.6 million square kilometers of dry land. The climate in northern China has changed significantly over the past 20 years. Precipitation, aridity index, and comprehensive humidity index have all shown significant non-linear increasing trends in the northwest region. However, whether the current potential geographical distribution of desertification (PGDD) in China has changed and the changing pattern in the past century is still unclear. Recent research found that it underestimated the impact of increasing CO₂ on future potential evapotranspiration. This resulted in an overestimation of changes in potential evapotranspiration when predicting future aridity, thereby exaggerating the prediction of future desertification expansion. Here we investigated the current spatial distribution of PGDD in China and its historical evolution over the past 120 years (1901–2020), and predicted the spatial pattern trend of PGDD in 2050. This analysis considered the impact of increasing CO₂ concentrations on future potential evapotranspiration based on the modified Penman-Monteith (PM) equation by using high-resolution gridded meteorological data (CRU TS4.06) and datasets from ten global climate models within the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). The results show that the PGDD area in China is approximately 4.8 million square kilometers, accounting for nearly 50% of the country's land area in the baseline period of 1991–2020. In the past 120 years (1901–2020), the total area of PGDD in China has shown a trend of first decreasing and then increasing, with 1978 as the turning point. The study founded that the smallest area of PGDD in China occurred in the 1970s. During this period of 1901–2020, the changes in aridity of PGDD in China generally showed a trend of “dry in the east and wet in the west”. From 1901 to 2020, the area that became wetter in the PGDD was four times the area that became drier. The overall climate became wetter, resulting in a decrease in PGDD area of approximately 35000 square kilometers in 2020. It is projected that by 2050, China's PGDD is expected to decrease by 5.51%, 4.70%, and 3.73% respectively compared with the current situation from low emissions to high emissions under three shared socioeconomic pathway scenarios. The lower the emission intensity, the smaller China's PGDD. Compared to the modified PM equation that takes into account changes in CO₂ concentration, the traditional PM equation overestimates the area of PGDD in China. To sum up, the total area of PGDD in China has shown a downward trend over the past 120 years. However, nearly half of China's land area remains vulnerable to desertification risks. Keeping the emission intensity low helps reduce the area of PGDD. The climate of PGDD in China will become humid in the future. Current research mainly analyzes changes in PGDD based on natural climate conditions, without quantitatively considering the impact of human activities on desertification. In future studies, more comprehensive approaches are needed to integrate the impact of human activities and natural conditions on PGDD and conduct in-depth analysis and assessment to gain a deeper understanding of the dynamic changes in these regions. Finally, the understanding of current and future situations of PGDD in China will be conducive to its formulation of national key ecological project planning and desertification prevention and control strategy.

desertification, climate change, potential evapotranspiration, emission scenario, Penman-Monteith equationdoi: [10.1360/TB-2023-1244](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1244)