



中国气候干湿变化及气候带边界演变: 以集成土壤湿度为指标

李明星, 马柱国

中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

E-mail: Limx@tea.ac.cn

2012-04-05 收稿, 2012-05-17 接受, 2012-09-04 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB956202, 2011CB952003)、国家自然科学基金(40830956, 41105048)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-202)和国家科技支撑计划(2012BAC22B04)资助

摘要 依据观测气象资料驱动的陆面模式模拟土壤湿度, 比较评估了 25 个全球耦合气候模式的模拟土壤湿度, 选择其均值和趋势与陆面模式模拟均呈正相关的 11 个数据集. 采用多模式权重平均法集成了中国区域两种气候情景 1900~2099 年的土壤湿度. 以集成土壤湿度为指标, 分析中国区域 199 年气候干湿变化的时空特征, 区划干湿气候带, 分析干湿区边界的演变特征. 结果表明总体上典型干旱区土壤湿度呈增加趋势, 湿润区变化不显著, 干湿过渡带土壤湿度变化最剧烈, 呈显著干旱化趋势. 干湿气候带边界线演变表明半干旱区扩张, 半湿润区收缩是两种情景下我国干湿气候带演变的典型特征. 其中 20 世纪 30°N 以北的半干旱区面积与 1970~1999 年平均半干旱区面积比较扩大了 11.5%, 即使考虑湿润区向半湿润区的转变, 与 1970~1999 年平均面积相比, 半湿润区面积缩小也达 9.8%. 21 世纪 A1B 情景下干湿区界线的变化保持了同样的趋势, 但强度明显大于 20 世纪. 因此未来干旱化扩张影响下的区域生态环境变化和人类适应问题需要深入关注.

关键词

土壤湿度
气候干湿
气候区划
气候区界线

气候干湿状况及气候带边界演变特征的研究不仅具有气候学意义, 而且在区域生态环境和社会经济方面也具有重要价值. 长期以来, 气候干湿变化的研究通常是基于降水、气温等资料开展的. 如张庆云^[1]计算了我国需水量和降水量的关系, 揭示了 20 世纪 70 年代开始半干燥、半湿润区干旱化, 干燥区湿润化的气候发展趋势. 考虑降水、气温和土壤湿度变化的 Palmer 干旱强度指数(PDSI)也揭示了 20 世纪 70 年代以来华北变干, 80 年代以来西北变湿的气候特征^[2]. 观测降水变化表明我国东北部 20 世纪 70 年代以来气候干旱发生更加频繁^[3]. 在干湿气候带边界演变方面, 以降水和蒸发区划的干湿区界线变化表明 20 世纪末我国干旱区呈扩大趋势^[4]. 用干湿分类函数分析我国 10 年际干旱和半干旱区界限变化, 结

果表明东北、华北干旱区向东、南扩张^[5]. 其他指数也揭示了干旱区边界扩张, 湿润区相对缩小的趋势^[6].

以上基于降水和气温的气候干湿变化研究对理解我国气候变化特征具有重要的意义. 然而受近地层大气状况、地形、植被、土壤属性等因素的影响, 降水在陆面水循环过程中的分配存在很大的时空变异, 这直接影响着陆面状况. 因此仅考虑降水和气温, 无法完全体现气候变化对陆面状况的实际效应. 在气候系统中, 土壤湿度是调节陆气之间水循环的一个非常关键的变量, 影响陆气水循环过程的时效及各分量间的分配比例. Yeh 等人^[7]早期的数值实验证明土壤湿度异常对大尺度降水和水文过程有记忆功能. Koster 等人^[8]的研究表明我国东部地区是土壤湿度的气候敏感区. 左志燕等人^[9]通过综合数据分析也揭示

了中国东部春季土壤湿度与夏季降水显著相关. 土壤湿度异常反映了气候的干湿变化, 同时土壤湿度也是自然生态系统最主要的水分来源. Xiao 等人^[10]研究了中国区域陆地生态系统与干旱的关系, 揭示了长期的水分胁迫通常会导致陆地生态系统生产力的显著下降. Lovett^[11]也指出土壤湿度是大部分生态系统生长发育的首要胁迫因子. 遥感监测亦表明我国北方植被指数对生长季土壤湿度变化非常敏感^[12]. 因此以土壤湿度为指标, 评估气候的干湿状况和干湿区边界变化特征不仅具有气候学意义, 还对生态环境、农业发展等具有重要的参考价值.

目前, 在土壤湿度气候学研究方面, 已开展了诸多观测研究: 王磊等人^[13]分析了我国西北西部地区土壤湿度不同时间尺度的气候学特征; 左志燕等人^[14]指出我国东部地区春季土壤湿度呈不同程度的干旱化现象, 郭维栋等人^[15]的研究结果显示北方秋季土壤也存在干旱化趋势; 孙丞虎等人^[16]揭示了淮河流域土壤湿度及其与降水、气温的时空关系; 张秀芝等人^[17]给出了 0~100 cm 的土壤湿度垂直变化特征和区域差异. 但由于缺乏长期连续的观测资料, 因此观测研究无法在区域尺度上开展基于土壤湿度的气候干湿变化和干湿区边界演变的研究^[18]. 遥感观测虽然具有全球覆盖的空间优势, 但其对反演模式有很大的依赖性, 同时受观测深度的限制, 目前土壤湿度的遥感观测研究仍面临诸多挑战^[19].

随着数值模式的发展, 物理过程较完善的大尺度陆面、水文模式在土壤湿度气候学模拟研究方面得到越来越广泛的应用. 杜川利等人^[20]模拟分析了中国土壤湿度变化对全球变暖的响应. 李明星等人^[21,22]利用观测气象资料驱动陆面模式 CLM3.5 和分布式水文模式 SWAT 模拟研究了中国区域土壤湿度的时空变化特征. Wu 等人^[23]利用水文模型 VIC 模拟的土壤湿度分析了我国农业干旱的演变. Wang 等人^[24]利用多模式模拟的土壤湿度集成分析了我国干旱的时空特征. 这些研究表明采用输入大气场驱动陆面模式进行土壤湿气候学模拟研究已逐渐成为一种有效途径, 但受输入大气资料的限制对我国土壤湿度的模拟一般不超过 60 年, 这对长时间尺度的区域土壤湿度气候学研究仍显不足.

目前耦合气候模式(GCM)能够提供百年尺度的土壤湿度模拟数据, 是研究历史气候和评估未来气候变化影响所依赖的基础数据之一^[25]. 目前单个

GCM 的模拟土壤湿度仍存在较大的不确定性^[26,27]. 而已有的研究结果表明: 多模式集成能够明显改善单模式模拟的偏差, 多模式的集合预报显著优于单模式^[28-30]. 在土壤湿度集成研究方面, Guo 等人^[31]评估了 17 个模式集成的土壤湿度, 其绝对值、相位和年际变化明显好于多数单模式的模拟结果, Gao 等人^[32]的多模式多方法的土壤湿度集成比较研究结果也支持了这一结论. 在集成土壤湿度应用方面, GLACE 项目利用 16 个 AOGCMs 的集成土壤湿度评估了土壤湿度与降水和气温反馈的区域差异^[8]. Sheffield 等人^[33]利用 8 个耦合模式(AOGCMs)的土壤湿度模拟数据集成分析了 20 世纪的干旱变化, AOGCMs 很好地再现大尺度干旱事件. 另外, 其他研究也分析了 IPCC 或其他耦合模式的土壤湿度, 结果表明多模式集成土壤湿度能够描述气候变化的基本特征, 在大尺度陆面变化和陆气相互作用研究方面得到很好的应用^[34,35]. 因此, 利用多模式集成的土壤湿度数据, 进行区域气候干湿变化特征和干湿区边界演变特征的研究是一条可行的途径.

综上所述, 土壤湿度在气候干湿变化和陆面过程响应气候变化的应用研究方面都是一个十分重要的变量, 而且现有研究已表明多模式集成土壤湿度能够提供气候长期变化的时空特征, 满足区域年代尺度气候干湿变化研究的要求. 基于以上考虑, 本文比较了 CMIP3 的 25 个 GCMs 土壤湿度模拟数据, 选择 11 个模拟结果, 采用权重平均的方法集成了中国区域两种气候情景(历史 20C3M 和未来 A1B 情景)的土壤湿度, 以此为指标进行 1900~2099 年中国区域气候干湿变化特征的分析, 并区划中国干湿气候带, 分析边界线的移动特征. 为理解中国区域气候变化特征及其对生态环境、农业及社会经济发展的影响评估提供基础研究支持.

1 数据和方法

1.1 数据

本文所采用的模拟土壤湿度为 20C3M 和 A1B 两种情景共 199 年的数据, 包括了 25 个耦合气候模式的模拟土壤湿度数据集. IPCC 设定的 20C3M 和 A1B 两种情景^[36]的 CO₂ 排放及浓度变化如表 1, 模式的详细描述参考 IPCC 报告^[38](数据来自 <http://cera-www.dkrz.de>). 由于不同 GCM 的陆面模式或参数化方案不

完全一致, 因此对土壤深度的定义和分层也存在差异. 因此, 为了方便模拟土壤湿度的评估和集成分析, 在此将整层土壤湿度利用中国区域内的最大值、最小值进行了标准化处理, 鉴于体积百分比土壤湿度的标准差通常为 40%, 为了方便比较, 将标准化土壤湿度映射到 0~40% 区间式(1).

$$S_{\text{std}} = \frac{S_{\text{grid}} - S_{\text{min,cn}}}{S_{\text{max,cn}} - S_{\text{min,cn}}} \times 40.0, \quad (1)$$

式中 S_{std} 为标准化格点土壤湿度, S_{grid} 为 GCM 模拟的格点土壤湿度, 表示单位面积的整层土壤中所含水的质量, 单位为 kg m^{-2} . $S_{\text{min,cn}}$ 和 $S_{\text{max,cn}}$ 分别为中国区域内 GCM 模拟土壤的最小值和最大值, 单位同 S_{grid} .

评价不同 GCM 土壤湿度的标准为观测气象资料驱动的陆面模式模拟的土壤湿度(1951~2008 年). 气象驱动场包括了观测的降水、气压、气温、比湿、风速数据、辐射(其中辐射采用了 Sheffield 等人^[39]的数据)6 个要素. 水平分辨率约 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 时间分辨率为 3 h (该驱动场简称为 ObsFC). 陆面模式为 CLM3.5 (Community Land Model Version 3.5)^[40,41], 模拟土壤湿度简称为 CLM3.5/ObsFC. CLM3.5/ObsFC 土壤湿度(如图 1)与观测土壤湿度、黄河流量、遥感反演和 GLDAS(global land data assimilation system)模拟土壤

湿度进行了比较检验. 结果表明, CLM3.5/ObsFC 土壤湿度能够再现土壤湿度的空间特征和长期趋势, 具体 CLM3.5/ObsFC 模拟所用大气驱动场的建立, 陆面过程的模拟和检验请参考文献[42]. 另外, 文中使用的干旱强度指数(PDSI)为 Dai 等人^[43]计算的全球资料的中国部分, 水平分辨率为 2.5° 经纬度.

1.2 集成方法

土壤湿度的变化除受气候要素的控制外, 还与植被、地形、土壤属性等密切相关. 因此, 20C3M 情景的土壤湿度的验证和集成应当以观测土壤湿度为标准. 然而全球范围内仅有部分地区开展了土壤湿度的观测, 站点分布稀少(与常规气象观测比较), 大多观测较晚, 且间隔时间较长(约 10 d), 因此现有的土壤湿度观测数据只能用作单点或短期模拟的检验, 无法评估 GCM 模拟土壤湿度的区域特征和长期变化趋势. 鉴于此, 本文以 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度为参照, 选择 GCM 土壤湿度进行集成研究.

模拟土壤湿度的集成采用了权重平均法式(2), 权重系数分别考虑了 1970~1999 年 GCM 土壤湿度与 CLM3.5/ObsFC 土壤湿度的空间相关性, 以及两者线性趋势的空间一致性. 权重平均法集成的土壤湿度

表 1 IPCC 设定的两种气候情景^{a)}

情景	时段	CO ₂ 排放	CO ₂ 浓度
20C3M	1850~2000 年	峰值, 2000 年为 ~8 Gt C/a	峰值, 2000 年约为 370 μL/L
SRESA1B	2000~2100 年	逐渐增加, 2050 年约为 16 Gt C/a, 之后逐渐下降, 到 2100 年约为 13 Gt C/a	逐渐增加, 2100 年约为 720 μL/L

a) 引自文献[37]. 20C3M 选共同时段为 1900~1999 年, A1B 为 2001~2099 年

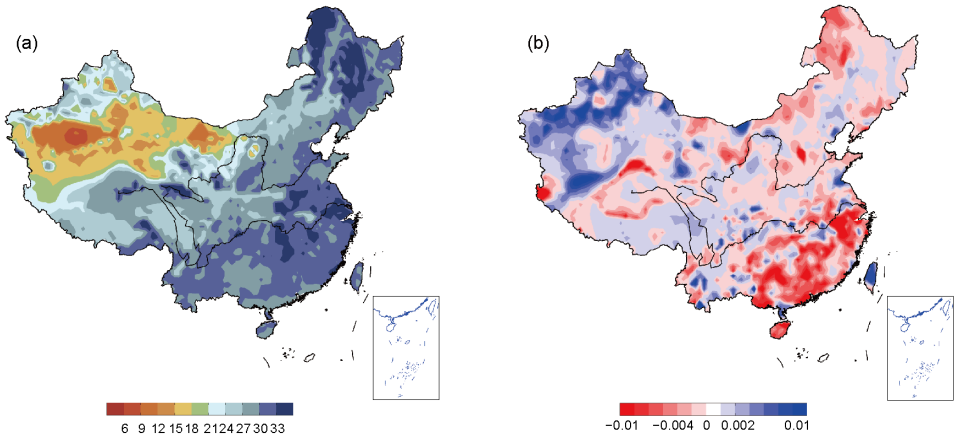


图 1 1970~1999 年 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度均值及其线性趋势的空间分布
(a) 平均土壤湿度(v v^{-1})空间分布; (b) 线性趋势($\text{v v}^{-1} \text{a}^{-1}$)的空间分布

其变化完全来自不同的 GCMs, 偏差与集成方法无关, 使集成土壤湿度的变化更易理解. 权重系数的计算, 首先依据式(4)分别计算 GCM 与 CLM3.5/ObsFC 土壤湿度均值的空间相关系数和两者线性趋势的空间相关系数(限于篇幅, 未列出). 然后, 选择相关系数均为正值的 11 个 GCM 模拟值, 按照式(3)确定权重系数, 依据式(2)集成土壤湿度. 集成计算前全部 GCM 土壤湿度按照双线性方法重新网格化为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 表 2 列出了参与集成的 11 个 GCM 的分辨率及陆面特征, 表 3 给出了 GCMs 和 CLM3.5/ObsFC 土壤湿度均值及其线性变化趋势的空间相关系数和集成权重系数.

$$S_{em} = \sum_{model=1}^m (W_{model} \times S_{std,model}), \quad (2)$$

式中 S_{em} 为集成土壤湿度, W_{model} 为各 GCM 的权重, 由式(3)计算. m 为参加集成的 GCMs 总数, 在此 $m=11$. $S_{std,model}$ 为不同 GCM 模拟的土壤湿度标准化值, 由式(1)计算.

$$W_{model} = \frac{R_{M,model} \times R_{T,model}}{\sum_{model=1}^m (R_{M,model} \times R_{T,model})}, \quad (3)$$

上式中 $R_{M,model}$ 和 $R_{T,model}$ 分别为 1970~1999 年不同 GCM 与 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度均值的空间相关系数和线性趋势的空间相关系数, 均按式(4)计算.

$$R = \frac{\sum_{grid=1}^k W_{grid} \times (S_{grid,GCM} - \bar{S}_{GCM,ave}) \times (S_{grid,CLM} - \bar{S}_{CLM,ave})}{\sqrt{\sum_{grid=1}^k W_{grid} \times (S_{grid,GCM} - \bar{S}_{GCM,ave})^2} \times \sqrt{\sum_{grid=1}^k W_{grid} \times (S_{grid,CLM} - \bar{S}_{CLM,ave})^2}}, \quad (4)$$

$$W_{grid} = \cos(0.01745329 \times lat), \quad (5)$$

式(4), $S_{grid,GCM}$ 和 $S_{grid,CLM}$ 分别为 GCM 和 CLM3.5/ObsFC 模拟 1970~1999 年标准化土壤湿度格点值; $\bar{S}_{GCM,ave}$ 和 $\bar{S}_{CLM,ave}$ 为两者在中国区域内的空间平均值. k 为中国区域的格点数. W_{grid} 为面积权重, 由式(5)计算, 其中 lat 为格点纬度.

2 结果和分析

2.1 集成土壤湿度与 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度的比较

集成土壤湿度与 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度(水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 1970~1999 年)均值和变化趋势空间分布的比较显示(图 2): 集成土壤湿度的空间变化基本再现了 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度由西北向东南土壤湿度逐渐增加的总体特征, 干湿区域

表 2 参加集成的耦合气候模式的信息

模式	发布年份	研究所、国家	陆面分辨率	土壤	植被	汇流	文献
CNRM-CM3	2004	CNRM (Centre National de Recherches Meteorologiques, Meteo-France, 法国)	64×128	多层	冠层	汇流	[44~47]
MPI-ECHAM5-MPI-OM	2005	MPI (Max-Planck-Institute for Meteorology, 德国)	48×96	“水桶”	冠层	汇流	[48,49]
DMI-ECHAM5-MPI-OM	2005	MPI, run 4 from DMI (Danmarks Meteorologiske Institut, 丹麦)	96×192	同上			
DMI-ECHAM-C	2005	MPI, run 3 from DMI (Danmarks Meteorologiske Institut, 丹麦)	48×96	同上			
FUB-EGMAM	2006	FUB IfM (Freie Universitaet Berlin, Institute for Meteorology, 德国)	48×96	“水桶”	冠层	汇流	[50,51]
UKMO-HadGEM1	2004	Hadley Centre for Climate Prediction and Research/Met Office, 英国	145×192	多层	冠层	汇流	[47,52]
IPSL-CM4	2005	IPSL (Institut Pierre Simon Laplace, 法国)	143×144	多层	冠层	汇流	[53]
MIROC3.2(medres)	2004	CCSR/NIES/FRCGC (Center for Climate System Research, 日本/National Institute for Environmental Studies, 日本/Frontier Research Center for Global Change, 日本)	320×640	多层	冠层	汇流	[47]
MRI-CGCM2.3.2	2003	MRI (Meteorological Research Institute, 日本)	64×128	多层	冠层	汇流	[54,55]
GISS-ER	2004	NASA/GISS (Goddard Institute for Space Studies, 美国)	46×72	多层	冠层	汇流	[56,57]
NCAR-CCSM3	2005	NCAR (National Center for Atmospheric Research, 美国)	128×256	多层	冠层	汇流	[58,59]

表 3 CLM3.5/ObsFC 与 GCM 模拟和集成土壤湿度均值、趋势的空间相关系数和集成权重系数^{a)}

模式	均值 R	趋势 R	权重系数
CNRM-CM3	0.37	0.01	0.008
MPI-ECHAM5-MPI-OM	0.82	0.21	0.290
DMI-ECHAM5-MPI-OM	0.76	0.03	0.033
DMI-ECHAM-C	0.82	0.12	0.171
FUB-EGMAM, 2006	0.59	0.19	0.188
UKMO-HadGEM1	0.56	0.02	0.017
IPSL-CM4	0.15	0.21	0.055
MIROC3.2(medres)	0.82	0.07	0.104
MRI-CGCM2.3.2	0.69	0.07	0.081
GISS-ER	0.44	0.06	0.041
NCAR-CCSM3	0.43	0.02	0.012
ENSEMBLE	0.88	0.31	

a) 时段: 1970~1999 年; 时间分辨率: 月均值; R 为空间相关系数

边界的位置基本一致; 土壤湿度变化趋势的空间分布总体上两者均呈西部变湿东部变干的趋势, 尤其西北、华北和长江以南的区域两者吻合程度较好. 均值和趋势空间格局差异最明显的区域主要为东北地

区, 集成土壤湿度偏干, 两者变化趋势在西北部相反, CLM3.5/ObsFC 模拟值呈变干趋势而集成结果则变湿. 两者差异的主要原因在于 GCM 水平分辨率较低, 其陆面过程难以描述地形和地表覆盖类型对土壤湿度变化的影响. 总之, 从空间分布和变化趋势的空间相关性来看(表 2), 1970~1999 年, 集成土壤湿度与 COM3.5/ObsFC 模拟值空间相关系数为 0.88, 线性趋势的空间相关系数为 0.31, 两者在 $\alpha=0.001$ 水平显著相关. 均值和趋势的空间分布与单个 GCM 模拟结果比较均有明显改善. 以上比较验证表明集成土壤湿度再现了中国区域土壤湿度空间分布和变化趋势的基本特征, 能够作为干湿指标进行区域气候变化特征的深入分析研究.

2.2 土壤湿度空间分布及其变化

1900~1999 年 20C3M 情景和 2001~2099 年 A1B 情景的中国区域土壤湿度空间分布的主要特征(图 3)与历史模拟(1951~2008 年)^[22]总体特征一致, 也与基

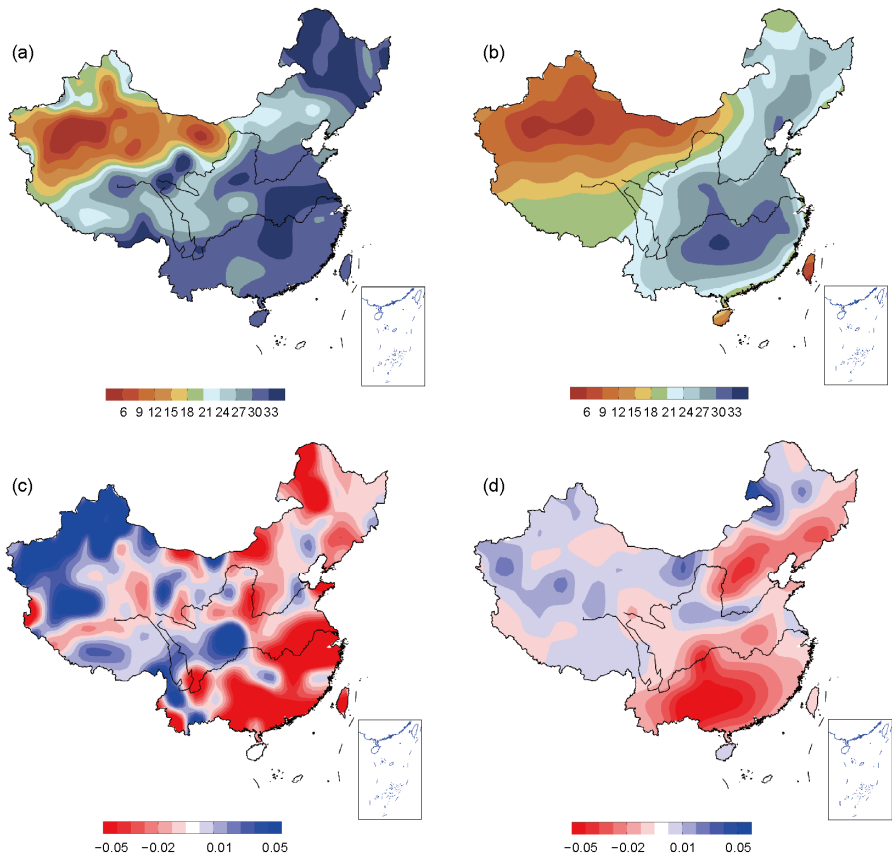


图 2 集成土壤湿度和 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度 1970~1999 年均值和同期变化趋势空间分布的比较

(a), (b) CLM3.5/ObsFC 和集成 GCMs 土壤湿度(标准化)空间分布; (c), (d) CLM3.5/ObsFC 和集成 GCMs 土壤湿度线性趋势的空间分布

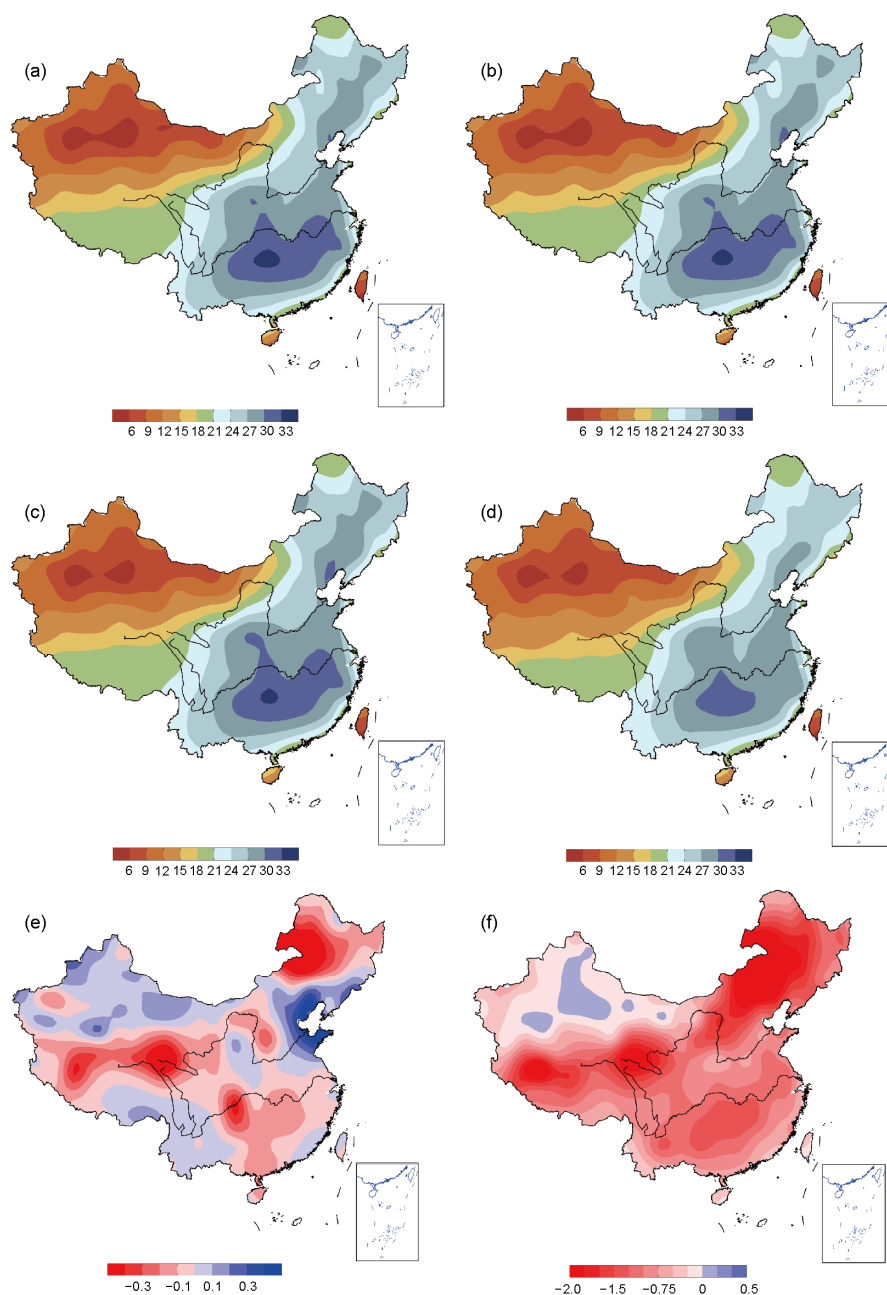


图3 集成标准化土壤湿度不同年代平均空间分布和变化比较

(a)~(d)分别为 1900~1949, 1950~1999, 2001~2050, 2051~2099 年代的平均值; (e), (f)分别为(b)与(a)之差, (d)与(c)之差

于降水、气温等观测资料的干湿指数的空间分布基本一致^[60,61]。表现为东南向西北土壤湿度呈逐渐减小的趋势。东北和长江中下游地区为主要湿区;西北沙漠、戈壁区为主要干区;中间贯穿东北至西南为干湿过渡带。两种情景不同时期的平均土壤湿度的空间分布表现出:20世纪后50年(1950~1999年)较前50年(1900~1949年)湿润区面积东向收缩,东北地区中

部的湿润区减小,两侧的干旱区扩大。西北干旱区也呈现出东扩的趋势;21世纪A1B情景的土壤湿度变化总体特征与20世纪相似,呈干旱区向东向南扩张的趋势,与20世纪相比,其扩张程度更加明显。

总体上,20世纪和21世纪前后50年均值的差异(图3(e), (f))可以看出,由于干旱区年降水总量少,土壤长期干燥,干旱区面积变化不明显,但50年平均

变化仍显示干旱呈缓和趋势. 土壤湿度的显著变化主要表现为湿区向东收缩, 从而干湿过渡区也向东南延伸. 其中, 1900~1999 年土壤湿度变化最显著的区域主要为东北地区, 除了明显的湿润区收缩外, 其西部的干旱区东扩也比较明显. 相对而言, 中国西北干旱区的变化则不明显. 而 2001~2009 年我国华北、东北地区干湿过渡区域的东扩达到 1~5 个经度; 中部

地区半干旱区界线变化微弱; 自兰州往西, 半干旱界线向东南扩张显著, 同时对应的湿润区界限收缩的距离也比较明显.

2.3 土壤湿度变化趋势及其空间分布

集成土壤湿度不同年代线性趋势空间分布(图 4)表明 1900~1999 年东北、华北大部分地区、青藏高原

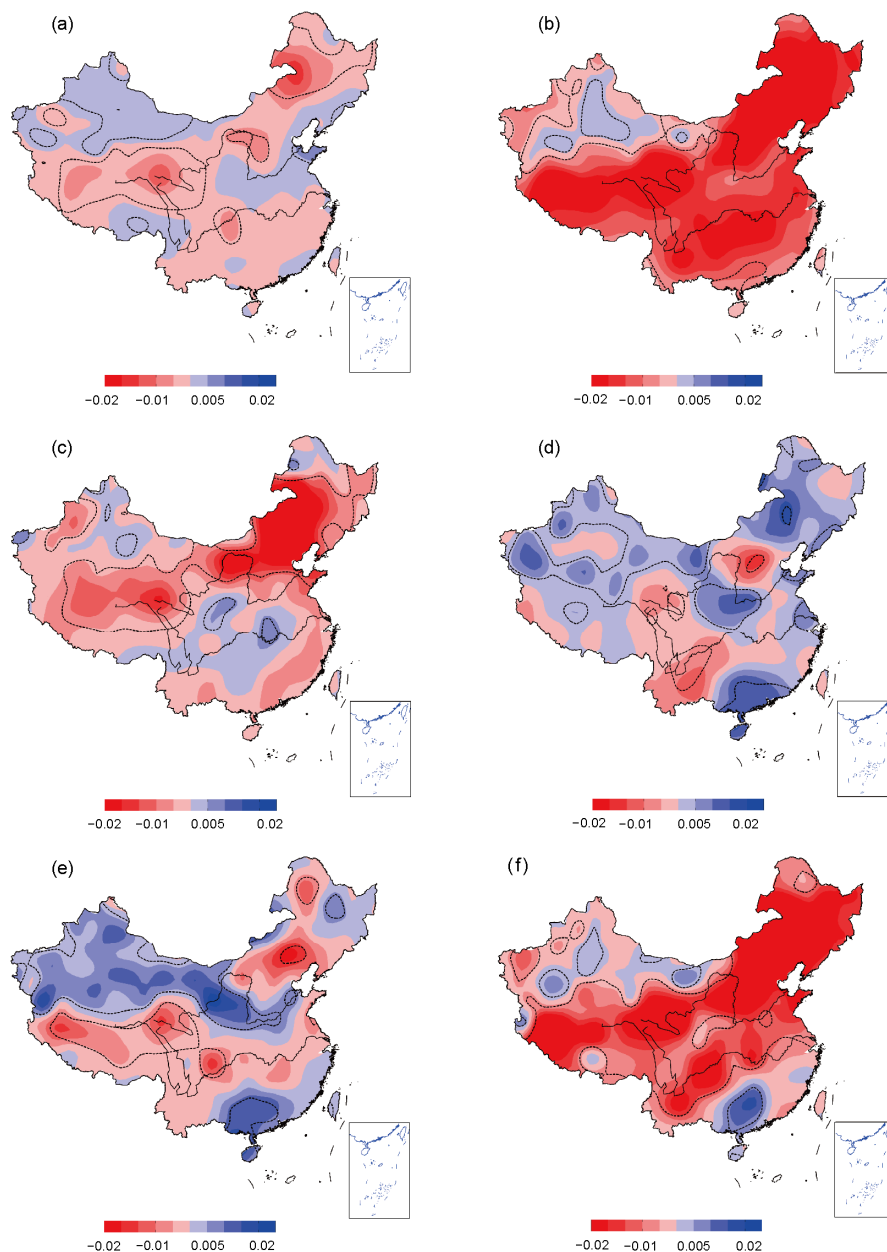


图 4 集成标准化土壤湿度不同年代线性趋势空间分布

(a), (b)为 1900~1999 和 2001~2009 年; (c), (d)为 1901~1950 和 1951~1999 年; (e), (f)为 2001~2050 和 2051~2099 年的线性趋势; 黑色点线为 $\alpha=0.05$ 水平趋势显著

北部和长江中下游区域呈持续变干的趋势,西北地区、黄河中下游和东北南部总体上呈变湿趋势.不考虑绝对值的大小,仅趋势的变化表明西北干旱地区20世纪总体上干旱程度趋于和缓,而半干旱区则呈干旱化发展的趋势.21世纪A1B情景下,不但半干旱区土壤湿度呈下降趋势,而且除西北小部分干旱区土壤湿度继续增加外我国大部分地区土壤均呈显著变干趋势.50年平均趋势来看,20世纪前50年大部分区域呈变干趋势,东北、华北和青藏高原变干趋势显著,仅有西北和长江流域部分区域土壤湿度增加显著;后50年大部分区域则呈变湿趋势.西北湿润化区域面积扩大,东北和长江以南大部地区也呈湿润化趋势,只有华北、西北东部和云贵高原小部分区域维持干旱化趋势.21世纪前50年干湿趋势的空间分布特征总体上与20世纪后50年一致,仅青藏高原南部和云贵高原转换为干旱化或干旱化增强趋势;后50年我国北方地区土壤湿度变化趋势的空间格局与20世纪前50年基本一致,但干旱化强度明显增加.而长江及江南地区空间分布相反.

不同年代土壤湿度变化趋势空间分布的演变大体上呈现出年代尺度的趋势转变特征(未给出图),或更长周期的变化(例如30~60年,图11).这种年代尺度的趋势转变表现最明显的仍然是干湿过渡区(尤其中部地区).趋势空间分布的变化也显示出西北干旱区和长江流域湿润区具有较好的时间同步性,而干湿过渡区变化频率较快.

为了分析土壤湿度随时间演变的区域差异,按照土壤湿度变化趋势的一致性将中国区域划分为6个特征区域.图5给出了6个区域的平均土壤湿度1900~2099年的11a滑动平均.1900~1999年除西北地区呈上升趋势外,其他5个区域总体上土壤湿度均呈现不同程度的下降趋势,其中青藏高原和东北下降趋势相对明显.华北和东北地区1950前后发生了干湿趋势的转折变化,前期主要呈变干趋势,后期呈变湿趋势,总体仍然呈变干趋势.A1B情景,21世纪40年代后期中国区域土壤湿度发生明显的转折性变干趋势,但不同区域湿度下降的程度差异明显,去线性趋势后的土壤湿度11a滑动平均值(未给出图)显示华北、青藏高原、云贵高原地区变化极差较大,表明这些干湿过渡区土壤湿度变化比干旱和湿润区更加剧烈,且随时间的延续土壤湿度变化幅度有不同程度的加剧趋势.不同区域土壤湿度相关系数(未列

出相关系数)也表明东北、华北和青藏高原——主要的干湿过渡带土壤湿度变化具有更高的一致性.

土壤湿度与降水和气温的关系区域差异明显(图5),尤其A1B情景,土壤湿度减小,气温上升是6个区域的共同特征,尽管变化幅度不同;降水在东北、西北、长江中下游地区呈增加趋势,而在华北、青藏、云贵地区呈下降趋势,其中青藏高原地区趋势系数偏小3个数量级,下降趋势微弱.东北和西北土壤湿度与气温呈显著的负相关(-0.462 , -0.469 , $\alpha=0.01$ 水平显著)表明尽管降水增加,但气温上升导致土壤水分蒸发损失同步增加,进而土壤湿度下降.华北、青藏、云贵地区降水下降与气温上升叠加导致了土壤变干的趋势.

土壤湿度与PDSI对比显示除东北地区 and 长江流域两者长期趋势一致外,其他区域均相反,变化的相关性也不显著.这与PDSI指数和集成土壤湿度本身的差异有很大关系,Dai等人^[43]指出PDSI并不能完全描述土壤湿度的变化.目前研究区域内有限的观测数据的时间分辨率为3次/月,且发生降水和土壤冻结后停止观测.因此观测数据无法进行集成土壤湿度月时间序列(日数据大部分模式未公开发布)的评估检验.考虑到CLM3.5/ObsFC土壤湿度时间分辨率为1次/日,且与现有观测数据对比表明其变化和趋势在区域尺度和月时间分辨率下都具有可信性(如在观测较多的东北地区CLM3.5/ObsFC与观测土壤湿度1990~2000年区域平均相关系数为0.84,呈变干趋势)^[22].因此图6给出了1960~1999年两者变化的比较.结果显示总体上两者年代尺度的变化趋势具有较好的一致性,尤其后20年.这表明集成土壤湿度在年代尺度分析区域干湿状况和气候区边界变化是可行的.

2.4 干湿区域及其边界的变化特征

现有中国干湿气候区的划分多以观测降水、气温或经过观测订正的格点资料(如CRU Climate Research Unit)通过不同干湿指数来划分^[5,62,63].这些指数考虑了控制区域干湿的主要因素——降水、蒸发和气温,反映了区域干湿的基本气候学特征.为了研究气候的干湿演变,本文参照以上干湿区划,以集成土壤湿度为标准划分了中国干湿气候区(图7).自西北至东南共分5级,与现有的干湿区划相比,干旱、极端干旱和湿润区的空间型吻合较好.半干旱和半湿

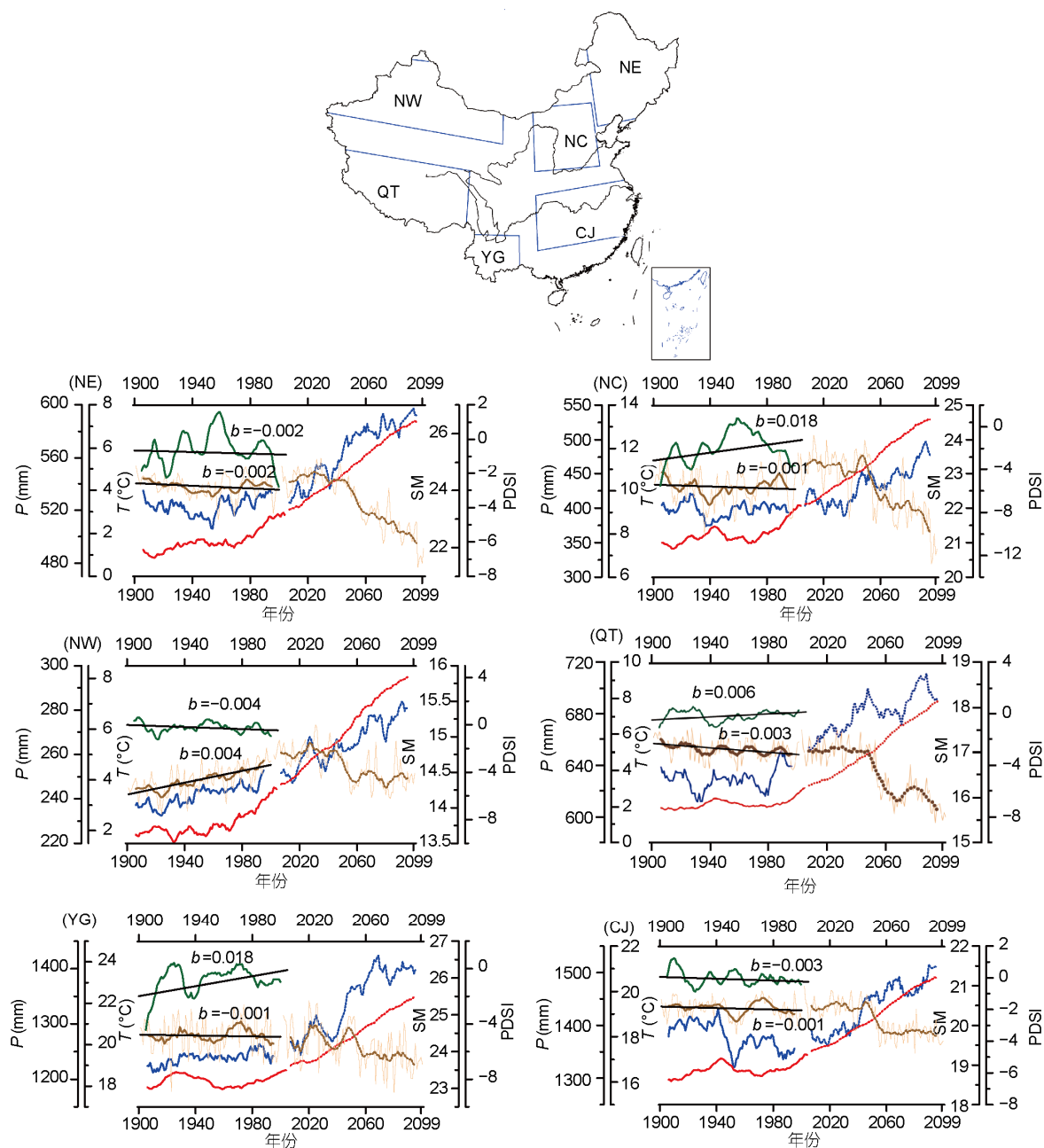


图 5 集成标准化土壤湿度不同区域均值与降水、气温、PDSI 变化比较

蓝色为降水(P), 红色为气温(T), 棕色为标准化土壤湿度(SM), 绿色为 Palmer 干旱强度指数(PDSI); 实线为 20C3M, 点线为 A1B 情景, 黑色直线为回归线性趋势, b 为线性趋势系数

润区土壤湿度的变化除了受降水的控制外, 地形、土壤属性和植被是影响降水下渗, 土壤水分存储、运动, 以及蒸腾损失的重要因子, 因此与仅考虑降水和气温变化的干湿指数区划差异较大^[5,62]。

图 8 给出了 1900~2099 年每 5 年平均的气候区边界演变过程。1900~1999 年 20C3M 情景干湿区面积变

化最明显的干湿气候带为半干旱区和半湿润区, 表现为半干旱区东移南扩和半湿润区向东收缩。2001~2099 年 A1B 情景除了更大幅度的半干旱区东移南扩和半湿润区向东收缩外, 湿润区面积的收缩也很显著, 这与降水增加较少而气温明显变暖的总体趋势(如图 5)有密切关系。极端干旱区主要分布在

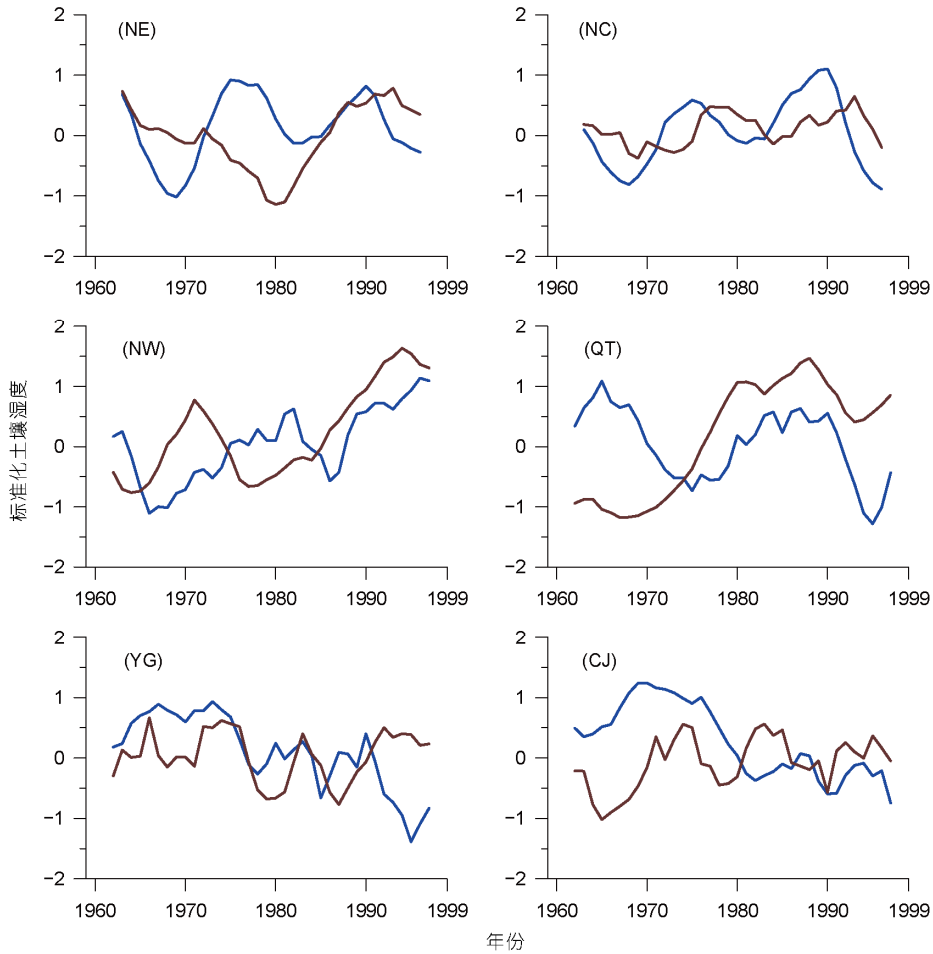


图 6 集成土壤湿度与 CLM3.5/ObsFC 模拟土壤湿度比较

曲线为 1960~1999 年 7 a 滑动平均土壤湿度; 蓝色线为 CLM3.5/ObsFC, 棕色线为集成土壤湿度

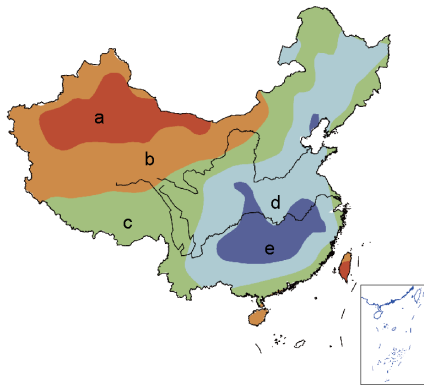


图 7 基于 1970~1999 年集成土壤湿度的中国干湿区域分布

a 为极端干旱区, b 为干旱区, c 为半干旱区, d 为半湿润区, e 为湿润区

新疆和内蒙西部的沙漠戈壁区, 且面积变化不明显, 甚至随着西北地区变湿的趋势, 极端干旱区出现面

积收缩的倾向。

中国区域土壤湿度变化的标准差空间分布也显示土壤干湿过渡带是湿度变化最剧烈的区域(图 9)。20C3M 情景下东北西部、华北和南岭山区一带的干旱半干旱区土壤湿度变化相对强烈, 其中东北和华北交接区域变化最剧烈。A1B 情景下, 典型的半干旱区土壤湿度变化最为强烈, 如东北、华北地区。表明历史(20C3M 情景)和未来(A1B 情景)土壤湿度变化最剧烈的区域仍然以半干旱区为主, 这势必导致区域内生态环境的重大变化, 其脆弱性值得进一步关注。

以上分析表明半干旱、半湿润区是土壤湿度变化最为剧烈的区域, 为了分析干湿区的收缩和扩张特征, 图 10 给出了半干旱、半湿润区边界线沿北纬 43° 东西移动和半干旱区沿东经 111°, 半湿润区沿东经 115° 南北伸缩的时间序列。1900~1999 年, 半干旱、半

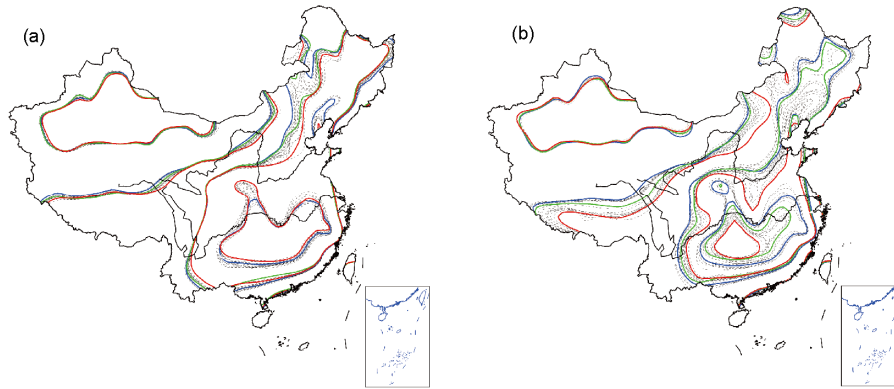


图 8 基于集成标准化土壤湿度划分的干湿区域 5 a 平均的界线变化

(a) 1900~1999 年; (b) 2001~2099 年. 蓝色线表示(a)1990~1904 年, (b)2001~2005 年; 绿色线表示(a)1950~1954 年, (b)2050~2054 年; 红色线表示(a)1995~1999 年, (b)2095~2099 年

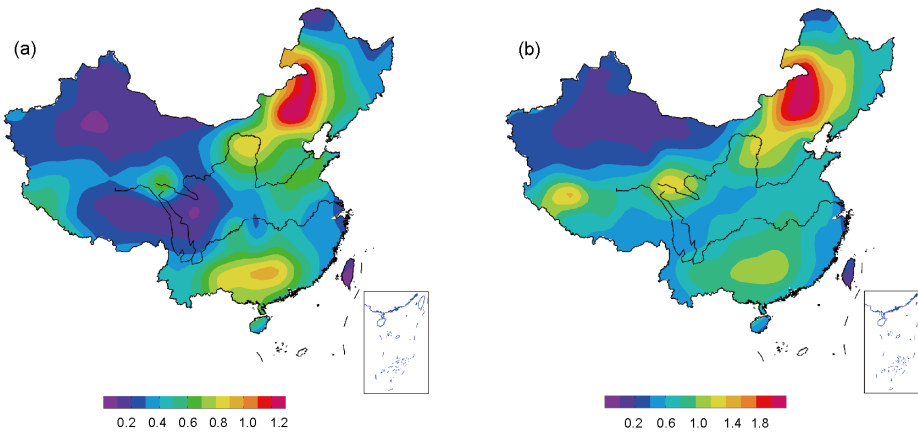


图 9 集成标准化土壤湿度 1900~1999 年(a)和 2001~2099 年(b)标准差的空间变化

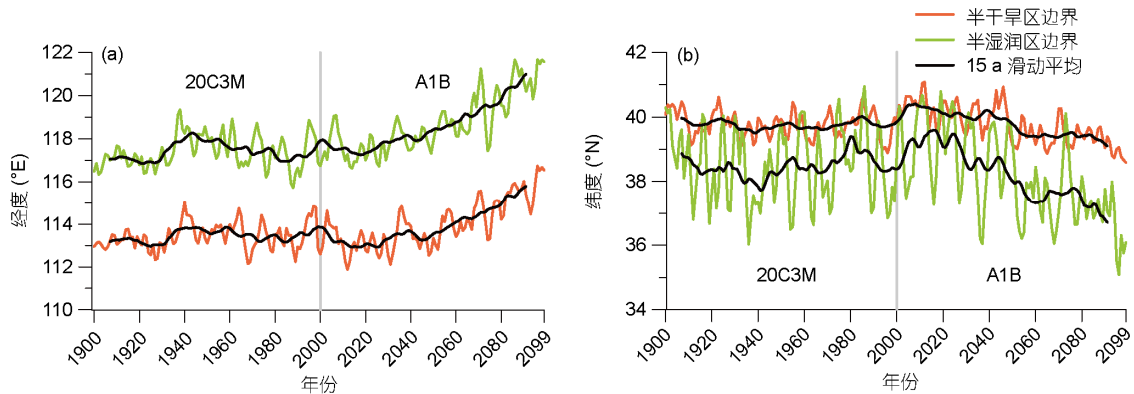


图 10 半干旱、半湿润区界线变化

(a) 半干旱、半湿润边界沿北纬 43°线东西移动; (b) 半干旱、半湿润边界线沿东经 111°和 115°线南北变化

湿润区界线变化以周期性震荡为主, 20 世纪 40 年代前呈东向扩张趋势. 而 20 世纪 40 年代后, 总体上两个气候带均向西收缩, 但震荡加剧. 20 世纪 80 年代前后是 20 世纪半干旱和半湿润区东向扩张十分明显

的时期. 边界的变化也清晰地描述了 20 世纪全国性或北方的严重干旱事件, 如 1928~1929 和 1941~1943 年全国性特大干旱、1997~2001 年北方严重干旱^[64]. 2001~2099 年 A1B 情景分界线呈准 8 年和 16 年周期

性的扩张收缩变化, 2001~2015 年半干旱、半湿润变化处在准 16 年周期的西向收缩位相, 之后总体上呈逐渐增强的东扩趋势. 半干旱、半湿润区边界线南北向的变化与东西伸缩具有时间同步性, 1940 年前后干旱发展最强烈, 边界向南扩张明显, 1980 年前后气候最湿润, 边界向北收缩最显著. 图 10(b)显示半干旱/半湿润界线比干旱/半干旱界线振幅明显增大, 表明干湿过渡带土壤水分收支过程变化强烈. 小波分析(图 11)亦表明, 干湿界线的伸缩移动除了具有 2~4 年较短的周期外, 还具有准 8 年、16 年、30 年、60 年的长期干湿变化周期. 以上分析主要针对 35°N 以

北和 100°E 以东的典型半干旱、半湿润区干湿演变.

干湿气候区边界的移动导致了不同干湿气候区面积的扩大或缩小, 图 12 为半干旱、半湿润及湿润区面积 1900~1999 年(20C3M 情景)和 2001~2009 年(A1B 情景)的变化. 图 12(a)中 5 a 平均边界线移动表明自 1900~1904 年到 1995~1999 年干旱区面积向东向南扩大了 $14 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为 1970~1999 年平均干旱区面积的 4.4%; 半干旱区在 30°N 以北面积向东扩大了 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$, 为 1970~1999 年平均半干旱区面积的 11.5%, 半干旱区扩张导致 100 年来半湿润区面积也明显缩小, 达平均面积的 9.8%. 图 12(b)显示

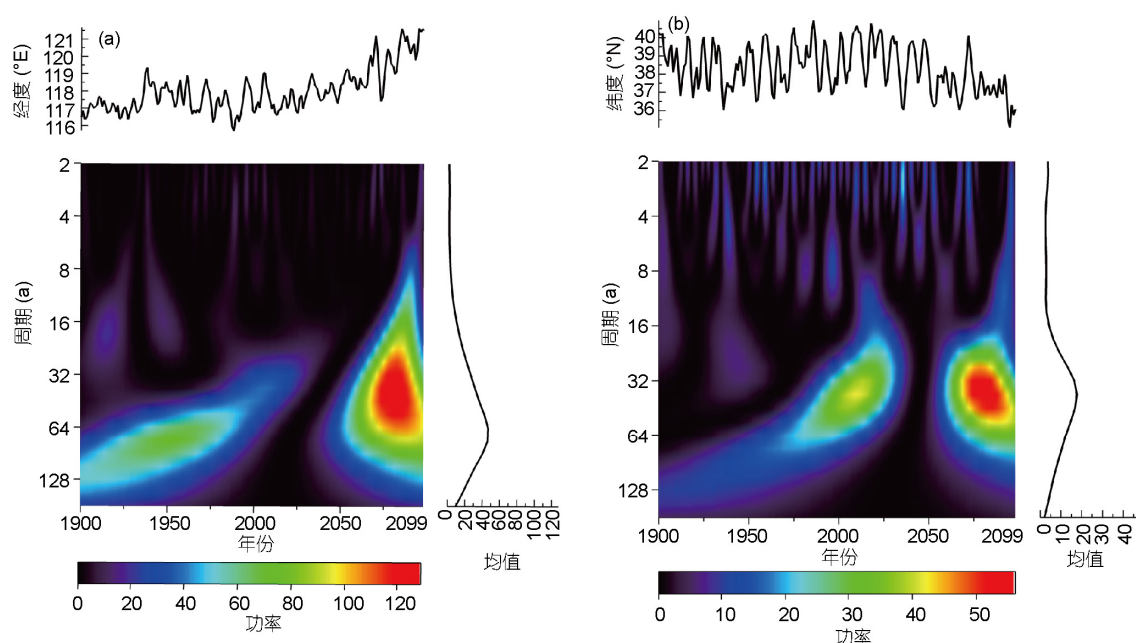


图 11 半干旱、半湿润区边界线伸缩变化的小波分析
(a) 半干旱区边界东西伸缩; (b) 半湿润区边界南北伸缩的小波分析

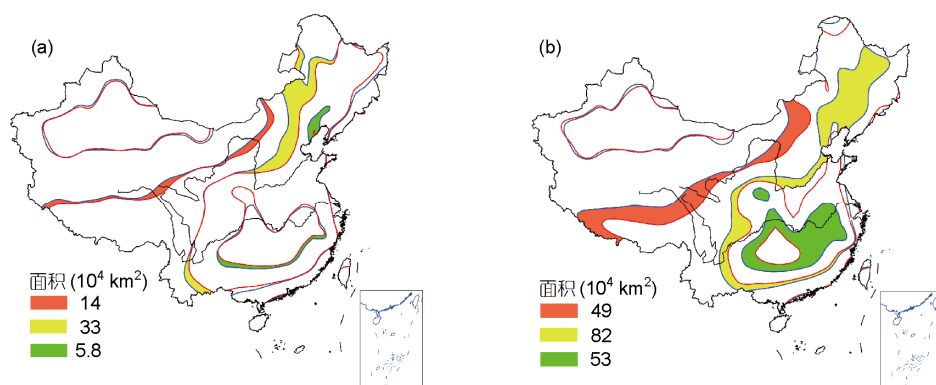


图 12 干湿区域面积的变化
(a)为 1900~1999 年平均; (b)为 2001~2009 年平均

A1B 情景自 2001~2005 年至 2095~2099 年平均的干湿区面积变化,其中干旱区面积向东南扩展了 $49 \times 10^4 \text{ km}^2$,占平均干旱区面积的 15.4%,半干旱区面积向东推移了 31.5%,多达 $82 \times 10^4 \text{ km}^2$,而湿润区则缩小了 70.4%,为 $53 \times 10^4 \text{ km}^2$,半湿润区位置显著东移,面积缩小.图 12 所示 20C3M 情景的干湿区位置移动和面积变化影响的主要区域为 35°N 以北和 105°E 以东的半干旱、半湿润区;而 A1B 情景下干湿区域移动和面积变化除了影响上述区域外, 35°N 以南干旱化发展影响的区域明显扩大,尤其湿润区收缩.

3 讨论和总结

本文以陆面模式模拟的较高分辨率土壤湿度为参照,分别计算了其 GCMs 模拟土壤湿度分布和趋势的空间相关系数,以此为权重系数,集成了中国区域 20C3M 和 A1B 情景 1900~2099 年的土壤湿度.以集成土壤湿度为指标分析了中国区域 1900~2099 年气候干湿变化的时空特征,并区划了 5 级干湿气候区,重点分析了干湿过渡带(半干旱、半湿润区)伸缩、扩张的年代特征和空间差异,及其导致的气候区的面积变化.

集成土壤湿度与单个 GCM 模拟土壤湿度相比,无论 1970~1999 年平均土壤湿度的空间分布,还是 30 年线性趋势的空间变化,其与陆面模式模拟土壤湿度的空间相关系数均明显提高,且显著相关.表明权重集成分析是多模式集合研究的一条可行的途径.集成土壤湿度与观测大气场驱动的陆面模式模拟土

壤湿度的空间分布总体上保持了较高的一致性,中国区域自西北向东南方向土壤湿度逐渐增加,极端干旱区主要分布在新疆中南部和内蒙古西部的沙漠戈壁区,湿润区主要分布在东北平原和长江中下游区域,干湿过渡区为东北至西南分布的半干旱和半湿润地区.趋势与陆面模式的结果及 PDSI 指数的空间相关性均统计显著,从其长期趋势来看,20 世纪东北、华北为主要干旱化区域,西北以湿润化趋势为主.长江及以南区域以变湿趋势为主,但干湿趋势的空间转换更加明显,自 20 世纪初北部地区由湿润化转变为干旱化,而南部则由干旱化转为湿润化.相对而言,东北地区集成土壤湿度与观测驱动模拟的土壤湿度差异较大,因此对这一区域的集成分析需要进一步深入研究.

以集成土壤湿度为指标,参照不同干湿指数对中国的干湿气候进行区划,将中国划分为极端干旱、干旱、半干旱、半湿润和湿润 5 个干湿气候带.气候带边界的收缩扩张变化反应了区域气候的干湿变化,尤其我国北方地区,半干旱、半湿润气候带具有向东向南扩张的特征,21 世纪 A1B 情景下,这一扩张趋势更加明显.考虑耦合气候模式和陆面模式模拟的偏差,基于集成土壤湿度的干湿气候区边界线的定量分析存在不确定性,但其定性分析与已有大多研究结果一致,无论历史,还是未来情景来看,干湿过渡带是气候变化的敏感区域,存在潜在的干旱化发展趋势,其对生态环境变化及社会经济的影响都需要进一步关注.

参考文献

- 1 张庆云,陈烈庭.近 30 年来中国气候的干湿变化.大气科学,1991,5: 72-81
- 2 苏明峰,王会军.中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性.中国科学 D 辑: 地球科学,2006,10: 951-958
- 3 Bordi I, Fraedrich K, Jiang J M, et al. Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China. Theor Appl Climatol, 2004, 79: 81-91
- 4 杨建平,丁永建,陈仁升,等.近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动.地理学报,2002,6: 655-661
- 5 马柱国,符淙斌.中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征.地球物理学报,2005,48: 519-525
- 6 刘波,马柱国.过去 45 年中国干湿气候区域变化特征.干旱区地理,2007,1: 7-15
- 7 Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil-moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment. Mon Weather Rev, 1984, 112: 474-490
- 8 Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science, 2004, 305: 1138-1140
- 9 左志燕,张人禾.中国东部夏季降水与春季土壤湿度的联系.科学通报,2007,14: 1722-1724
- 10 Xiao J F, Zhuang Q L, Liang E Y, et al. Twentieth-century droughts and their impacts on terrestrial carbon cycling in China. Earth Int, 2009, 13: 1-31

- 11 Lovett R A. Global warming-rain might be leading carbon sink factor. *Science*, 2002, 296: 1787
- 12 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析. *生态学杂志*, 2005, 7: 715–718
- 13 王磊, 文军, 韦志刚, 等. 中国西北部西部土壤湿度及其气候响应. *高原气象*, 2008, 6: 1257–1266
- 14 左志燕, 张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1428–1437
- 15 郭维栋, 马柱国, 姚永红. 近 50 年中国北方土壤湿度的区域演变特征. *地理学报*, 2003, 58: 83–90
- 16 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 淮河流域冬春季土壤湿度异常对夏季降水的影响及其应用的研究. *气象学报*, 2005, 1: 115–122
- 17 张秀芝, 吴迅英, 何金海. 中国土壤湿度的垂直变化特征. *气象学报*, 2004, 62: 51–61
- 18 Robock A, Vinnikov K Y, Srinivasan G, et al. The global soil moisture data bank. *Bull Am Meteorol Soc*, 2000, 81: 1281–1299
- 19 Kerr Y H. Soil moisture from space: Where are we? *Hydrogeol J*, 2007, 15: 117–120
- 20 杜川利, 刘晓东. CLM3 模拟的 1979–2003 年中国土壤湿度及其对全球变暖的可能响应. *高原气象*, 2008, 3: 463–473
- 21 李明星, 马柱国, 杜继稳. 区域土壤湿度模拟检验和趋势分析——以陕西省为例. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2010, 40: 363–379
- 22 李明星, 马柱国, 牛国跃. 中国区域土壤湿度变化的时空特征模拟研究. *科学通报*, 2011, 56: 1288–1300
- 23 Wu Z Y, Lu G H, Wen L, et al. Reconstructing and analyzing China's fifty-nine year (1951–2009) drought history using hydrological model simulation. *Hydrol Earth Sys Sci*, 2011, 15: 2881–2894
- 24 Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. Soil moisture drought in China, 1950–2006. *J Clim*, 2010, 24: 3257–3271
- 25 Meehl G A, Covey C, Delworth T, et al. The WCRP CMIP3 multimodel dataset—A new era in climate change research. *Bull Am Meteorol Soc*, 2007, 88: 1383–1394
- 26 Robock A, Schlosser C A, Vinnikov K Y, et al. Evaluation of the AMIP soil moisture simulations. *Glob Planet Change*, 1998, 19: 181–208
- 27 Li H B, Robock A, Wild M. Evaluation of intergovernmental panel on climate change fourth assessment soil moisture simulations for the second half of the twentieth century. *J Geophys Res*, 2007, 112, doi: 10.1029/2006JD007455
- 28 Krishnamurti T N, Kishtawal C M, Larow T E, et al. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble. *Science*, 1999, 285: 1548–1550
- 29 Barnston A G, Mason S J, Goddard L, et al. Multimodel ensembling in seasonal climate forecasting at IRI. *Bull Am Meteorol Soc*, 2003, 84: 1783–1796
- 30 Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. Development of a european multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER). *Bull Am Meteorol Soc*, 2004, 85: 853–872
- 31 Guo Z C, Dirmeyer P A, Gao X, et al. Improving the quality of simulated soil moisture with a multi-model ensemble approach. *Quart J Roy Meteorol Soc*, 2007, 133: 731–747
- 32 Gao X, Dirmeyer P A. A multimodel analysis, validation, and transferability study of global soil wetness products. *J Hydrometeorol*, 2006, 7: 1218–1236
- 33 Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Clim Dyn*, 2008, 31: 79–105
- 34 Wetherald R T, Manabe S. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *J Geophys Res*, 2002, 107, doi: 10.1029/2001JD001195
- 35 Wang G L. Agricultural drought in a future climate: Results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment. *Clim Dyn*, 2005, 25: 739–753
- 36 Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, NY (US): Cambridge University Press, 2000. 6–10
- 37 Frei A, Gong G. Decadal to century scale trends in north american snow extent in coupled atmosphere-ocean general circulation models. *Geophys Res Lett*, 2005, 32, doi: 10.1029/2005GL023394
- 38 Randall D A, Wood R A, Bony S, et al. Climate models and their evaluation. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al, eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York, NY (US): Cambridge University Press, 2007. 597–599
- 39 Sheffield J, Goteti G, Wood E F. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling. *J Clim*, 2006, 19: 3088–3111
- 40 Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al. The common land model. *Bull Am Meteorol Soc*, 2003, 84: 1013–1023
- 41 Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. Improvements to the Community Land Model and their impact on the hydrological cycle. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2007JG000563
- 42 Li M X, Ma Z G. Comparisons of simulations of soil moisture variations in the Yellow River basin driven by various atmospheric forcing data sets. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27: 1289–1302

- 43 Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. A global dataset of palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *J Hydrometeorol*, 2004, 5: 1117–1130
- 44 Mahfouf J F, Manzi A O, Noilhan J, et al. The land-surface scheme ISBA within the meteo-france climate model ARPEGE. Part I. Implementation and preliminary-results. *J Clim*, 1995, 8: 2039–2057
- 45 Douville H, Royer J F, Mahfouf J F. A new snow parameterization for the meteo-france climate model. Part I. Validation in stand-alone experiments. *Clim Dyn*, 1995, 12: 21–35
- 46 Douville H, Royer J F, Mahfouf J F. A new snow parameterization for the meteo-france climate model. Part II. Validation in a 3-D GCM experiment. *Clim Dyn*, 1995, 12: 37–52
- 47 Oki T, Sud Y C. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP)—A global river channel network. *Earth Interact*, 1998, 2: 1–37
- 48 Hagemann S, Gates L D. Validation of the hydrological cycle of ECMWF and NCEP reanalyses using the MPI hydrological discharge model. *J Geophys Res*, 2001, 106: 1503–1510
- 49 Schulz J P, Dumenil L, Polcher J. On the land surface-atmosphere coupling and its impact in a single-column atmospheric model. *J Appl Meteorol*, 2001, 40: 642–663
- 50 Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *J Clim*, 2006, 19: 3771–3791
- 51 Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L. The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstrasse 55 D-20146 Hamburg Germany, 2003. 35–43
- 52 Essery R, Pomeroy J, Parviainen J, et al. Sublimation of Snow from coniferous forests in a climate model. *J Clim*, 2003, 16: 1855–1864
- 53 Krinner G, Viovy N, De Noblet-Ducoudre N, et al. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Glob Biogeochem Cycle*, 2005, 19, doi: 10.1029/2003GB002199
- 54 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. *J Atmos Sci*, 1986, 43: 505–531
- 55 Sato N, Sellers P J, Randall D A, et al. Effects of implementing the simple biosphere model in a general-circulation model. *J Atmos Sci*, 1989, 46: 2757–2782
- 56 Abramopoulos F, Rosenzweig C, Choudhury B. Improved ground hydrology calculations for Global Climate Models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. *J Clim*, 1988, 1: 921–941
- 57 Miller J R, Russell G L, Caliri G. Continental-scale river flow in climate models. *J Clim*, 1994, 7: 914–928
- 58 Oleson K W, Bonan G B, Feddema J. Effects of white roofs on urban temperature in a global climate model. *Geophys Res Lett*, 2010, 37, doi: 10.1029/2009GL042194
- 59 Oleson K W, Niu G Y, Yang Z L, et al. Improvements to the community land model and their impact on the hydrological cycle. *J Geophys Res*, 2008, 113, doi: 10.1029/2007JG000563
- 60 马柱国, 符淙斌. 1951~2004 年我国北方干旱化的基本事实. *科学通报*, 2006, 51: 2429–2439
- 61 Ma Z, Dan L, Hu Y. The extreme dry/wet events in northern china during recent 100 years. *J Geogr Sci*, 2004, 14: 275–281
- 62 Yang J P, Ding Y J, Chen R S, et al. Fluctuations of the semi-arid zone in china, and consequences for society. *Clim Change*, 2005, 72: 171–188
- 63 毛飞, 孙涵, 杨红龙. 干湿气候区划研究进展. *地理科学进展*, 2011, 30: 17–26
- 64 张强, 潘学标, 马柱国, 等. 干旱. 北京: 气象出版社, 2009. 192–195