

DOI: 10.5846/stxb201910182191

常青青, 何洪林, 牛忠恩, 任小丽, 张黎, 孙婉馨, 朱晓波. 中国典型森林生态系统土壤水分时空分异及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(2): 490-502.

Chang Q Q, He H L, Niu Z E, Ren X L, Zhang L, Sun W X, Zhu X B. Spatio-temporal variation of soil moisture and its influencing factors in Chinese typical forest ecosystems. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 490-502.

中国典型森林生态系统土壤水分时空分异及其影响因素

常青青^{1,2,3}, 何洪林^{1,2,4,*}, 牛忠恩^{1,2,3}, 任小丽^{1,2}, 张黎^{1,2,4}, 孙婉馨^{1,2,3}, 朱晓波⁵

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

2 国家生态科学数据中心, 北京 100101

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049

5 西南大学地理科学学院, 遥感大数据应用重庆市工程研究中心, 重庆 400715

摘要: 森林土壤水分作为物质与能量循环的载体影响林木生长与发育, 并通过影响水分在陆气之间的循环与分配影响区域气候。基于我国不同气候带的 9 个森林生态系统定位观测站的长期观测数据, 探究了 2005—2016 年中国典型森林生态系统土壤水分的空间分异及其时间动态, 并进一步分析了影响其时空分异的环境因素。主要研究结论如下: (1) 9 个森林生态系统的土壤水分多年均值介于 12.45%—36.30% 之间, 空间上呈现中温带、亚热带、热带土壤水分较高, 暖温带土壤水分较低的分布特征。降水蒸散差(降水与蒸散的差值)可以解释我国森林生态系统土壤水分空间分异的 62% ($P < 0.05$); (2) 我国北部与东部季风区森林区域土壤水分呈上升趋势, 降水上升是主因, 其中暖温带北京、南亚热带鼎湖山与鹤山森林土壤水分上升趋势显著, 增幅分别为 0.67%/a、1.72%/a 与 0.69%/a; 西南地区森林生态系统土壤水分呈下降趋势, 该趋势由降水下降与蒸散上升共同导致, 其中中亚热带贡嘎山及哀牢山森林生态系统土壤水分下降趋势显著, 降幅分别为 -1.77%/a 与 -0.94%/a; 土壤水分时间分异与降水蒸散差的相关性最高 ($R = 0.59$, $P < 0.01$); (3) 土壤水分呈下降趋势的森林生态系统中, 春季土壤水分变化主导了年际变化, 土壤水分上升的森林生态系统中, 年际变化则是由秋、冬季主导。(4) 与 ERA-interim 土壤水分再分析数据比较得出, 两者在空间格局与变化趋势上均具有较高的一致性。CERN 土壤水分观测数据反映了无人为干扰的自然条件下森林土壤-植被-气候之间的反馈作用, 可为基于模型的土壤水分研究提供长时序的验证数据。

关键词: 土壤水分; 中国典型森林生态系统; 时间动态; 空间分异; 降水蒸散差

Spatio-temporal variation of soil moisture and its influencing factors in Chinese typical forest ecosystems

CHANG Qingqing^{1,2,3}, HE Honglin^{1,2,4,*}, NIU Zhongen^{1,2,3}, REN Xiaoli^{1,2}, ZHANG Li^{1,2,4}, SUN Wanxin^{1,2,3}, ZHU Xiaobo⁵

1 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 National Ecological Science Data Center, Beijing 100101, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 Chongqing Engineering Research Center for Remote Sensing Big Data Application, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing

基金项目: CERN 生态系统动态监测数据汇聚 (XDA19020301)

收稿日期: 2019-10-18; 网络出版日期: 2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hehl@igsnrr.ac.cn

400715 China

Abstract: Soil moisture of forest ecosystems acts as a carrier of matter and energy cycle, affecting growth and development of vegetation, and affecting regional climate by changing the circulation and distribution of water between land and atmosphere. Based on the long-term observation data of 9 forest ecosystem sites in different climatic zones in China, this study explores the spatial pattern and temporal dynamics of soil moisture in Chinese typical forest ecosystems from 2005 to 2016, and further analyzes its influencing environmental factors. The main research conclusions are as follows: (1) the multi-year mean of soil moisture in 9 forest ecosystems ranges from 12.45% to 36.30%. The spatial distribution is that soil moisture in the temperate zone, subtropical zone and tropical zone is relatively high, while that in the warm temperate zone is relatively low. Precipitation minus evapotranspiration (P-ET) can explain 62% ($P < 0.05$) of the spatial pattern of soil moisture of forest ecosystems in China. (2) Soil moisture shows an upward trend in north China and east monsoon area in China and the increase of precipitation is the main cause. Soil moisture of Beijing Forest Ecosystem (BJF), Dinghushan Forest Ecosystem (DHF), Heshan Forest Ecosystem (HSF) increases significantly by 0.67%/a, 1.72%/a and 0.70%/a, respectively. Soil moisture shows a downward trend in Southwest China which is caused by both the decrease of precipitation and the increase of ET. Soil moisture of Gonggashan Forest Ecosystem (GGF) and Ailaoshan Forest Ecosystem (ALF) shows a significant downward trend with the decreases of -1.77%/a and -0.94%/a. The correlation between the temporal trend of soil moisture and P-ET was the highest ($R = 0.59$, $P < 0.01$). (3) In the forest ecosystem where soil moisture is decreasing, the change of soil moisture in spring dominates the interannual trend, while in the forest ecosystems where soil moisture is increasing, the interannual trend is dominated by autumn and winter. The CERN soil moisture observation data reflects the feedback effect between soil-vegetation-climate under undisturbed natural forest conditions, which can also provide long-term verification data for model-based soil moisture research.

Key Words: soil moisture; typical forest ecosystems in China; temporal dynamics; spatial pattern; precipitation minus evapotranspiration

森林土壤水分是水循环过程中重要的水文参量,决定了森林生态系统水源涵养能力,同时作为物质与能量循环的载体影响林木生长与发育^[1-2]。在多重环境因素的调控下,土壤水分具有较大的时空异质性,其空间格局的变化会影响生态系统的分布与合理配置,其时间动态则通过影响植被生长以及水分在陆气之间的循环与分配作用于区域气候^[3-4]。探究森林生态系统土壤水分的时空分异特征及其影响因素在气候变化预测、林地生态水文过程及生态系统服务的研究中具有重要作用^[5]。

有研究表示过去几十年我国土壤水分负异常和蒸散正异常事件频繁发生,导致了更加严峻的干旱胁迫^[6]。在森林生态系统中,由于植物对土壤水分的高度敏感性,土壤水分异常通过改变植物生长与分布状况,将对生产力与水源涵养服务产生巨大的负面影响^[7-8]。多尺度下的土壤水分影响因素研究表明,尽管土壤水分受到气象、地形、土壤、植被、土地利用等多环境因子的综合作用,区域土壤水分的时空分异主要由气象因素主导(主要是降水与蒸散)^[9-11]。降水是土壤水分最主要的输入来源,大部分研究表示土壤水分与降水之间存在正相关关系,但两者之间的耦合强度大小存在差异;蒸散是主要的输出项,对土壤水分的影响受土壤水分大小的控制,使得两者之间的关系存在不确定性^[12-14]。当前,全球气候变化一方面导致大气对水分的需求增加,显著改变了蒸散的时空分布,加剧了土壤水分的消耗;另一方面通过影响大气环流使得降水的时空分布也发生了显著变化,两者共同作用于土壤水分的空间格局与年际变化^[15-16]。同时土壤水分时空分异变化也存在一定的季节差异,其在雨季与旱季对降水与蒸散的不同响应使得其在不同季节表现出不同的变化趋势^[17]。现阶段,由于我国土壤水分地面观测站主要分布于农田区域,基于观测数据的全国森林区域土壤水分时空分异及其影响因素的研究结果还较少^[18-19]。

中国生态研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)森林生态系统野外观测站的长期观测数据可以为全国尺度森林土壤水分研究提供可靠的数据支撑。本研究使用 CERN 的 9 个森林生态系统定位观测站的土壤水分长期观测数据,探究了(1)中国典型森林生态系统土壤水分的大小及空间分异;(2)2005—

2016 年土壤水分时间变化趋势及其影响因素;(3)与其他土壤水分再分析资料在时空分异上的异同。旨在为我国森林土壤水分大小与时空分异的分析、森林生态系统水源涵养服务的探究提供科学参考依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

本研究以 9 个来自中国生态系统网络(CERN, <http://www.cern.org.cn>)森林生态系统野外观测台站的天然林综合观测场作为我国不同区域森林生态系统的典型代表,分别为哀牢山森林生态系统(ALF),北京森林生态系统(BJF),版纳森林生态系统(BNF),长白山森林生态系统(CBF),鼎湖山森林生态系统(DHF),贡嘎山森林生态系统(GGF),鹤山森林生态系统(HSF),会同森林生态系统(HTF),茂县森林生态系统(MXF)。气候区从北到南涵盖了中温带、暖温带、中亚热带、南亚热带及热带,海拔 77—3160 m 不等,年均降水量介于 527—1918 mm 之间,年均温介于 3.7—22.6℃ 之间。其中茂县森林生态站与哀牢山森林生态站地理位置分别位于中亚热带和南亚热带,但由于海拔较高,其森林生态系统的实际气候类型分别为暖温带亚高山气候与中亚热带季风气候。在空间上基本覆盖了我国典型的森林植被类型,人为干扰少,水热梯度明显,具有较强的空间代表性。研究区森林生态系统的地形、植被、土壤基本概况见表 1,地理位置及水热梯度代表性见图 1。

表 1 研究区森林生态系统基本概况
Table 1 Basic features of forest ecosystems in study area

气候类型 Climate type	生态站 及代码 Site and code	植被类型 Vegetation type	北纬/(°) Latitude	东经/(°) Longitude	海拔/m Elevation	坡度/(°) Slope	坡向 Slope aspect	叶面积 指数 Leaf area index	归一化植 被指数 Normalized difference vegetation index	完全 持水量/% Total water content	田间 持水量/% Field capacity
中温带 Mid temperate zone	长白山(CBF)	落叶针阔混 交林	42.4	128.1	784	2	N	1.93	0.58	57.72	46.40
暖温带 Warm temperate zone	北京森林 (BJF)	落叶阔叶混 交林	40.0	115.4	1263	5.7	WN	1.44	0.47	54.77	42.18
暖温带 Warm temperate zone	茂县(MXF)	亚高山落叶针 叶混交林	31.7	103.9	1826	17	WN	1.29	0.68	27.40	16.64
中亚热带 Mid-subtropics	贡嘎山(GGF)	亚高山暗 针叶林	29.6	102.0	3160	30—35	SE	1.00	0.36	42.48	28.41
中亚热带 Mid-subtropics	会同(HTF)	次生常绿 阔叶林	26.9	109.6	300—415	32	ES	1.46	0.60	55.61	37.91
中亚热带 Mid-subtropics	哀牢山(ALF)	中山湿性常 绿阔叶林	24.5	101.0	2488	5—25	W	1.99	0.64	102.32	75.41
南亚热带 South subtropics	鼎湖山(DHF)	季风常绿阔 叶林	23.2	112.9	300	25—35	NE	2.35	0.59	50.99	33.70
南亚热带 South subtropics	鹤山(HSF)	常绿阔叶林	22.7	112.9	77	18—23	S	0.73	0.52	64.09	28.69
热带 Tropics	版纳(BNF)	热带常绿阔 叶季雨林	22.0	101.2	750	12—18	N	4.47	0.78	27.68	20.20

1.2 研究数据及来源

1.2.1 土壤水分数据

本研究采用土壤体积含水量(Soil water content,SWC)来表征土壤水分条件,数据来自 CERN 森林生态站 2005—2016 年的观测数据。使用中子仪或 TDR 测定土壤剖面不同深度的土壤含水量。其中北京、版纳与会同森林生态站分别在 2014 年、2009 年与 2008 年更换了土壤水分观测仪器,为保证土壤水分数据的时间连续性,使用 CERN 森林生态站 2005—2016 年烘干法测定的质量土壤含水量进行仪器校正与缺失值的插补,其余站点在年间保持观测仪器一致。长白山森林生态站由于观测数据的连续性问题,研究时段为 2005—

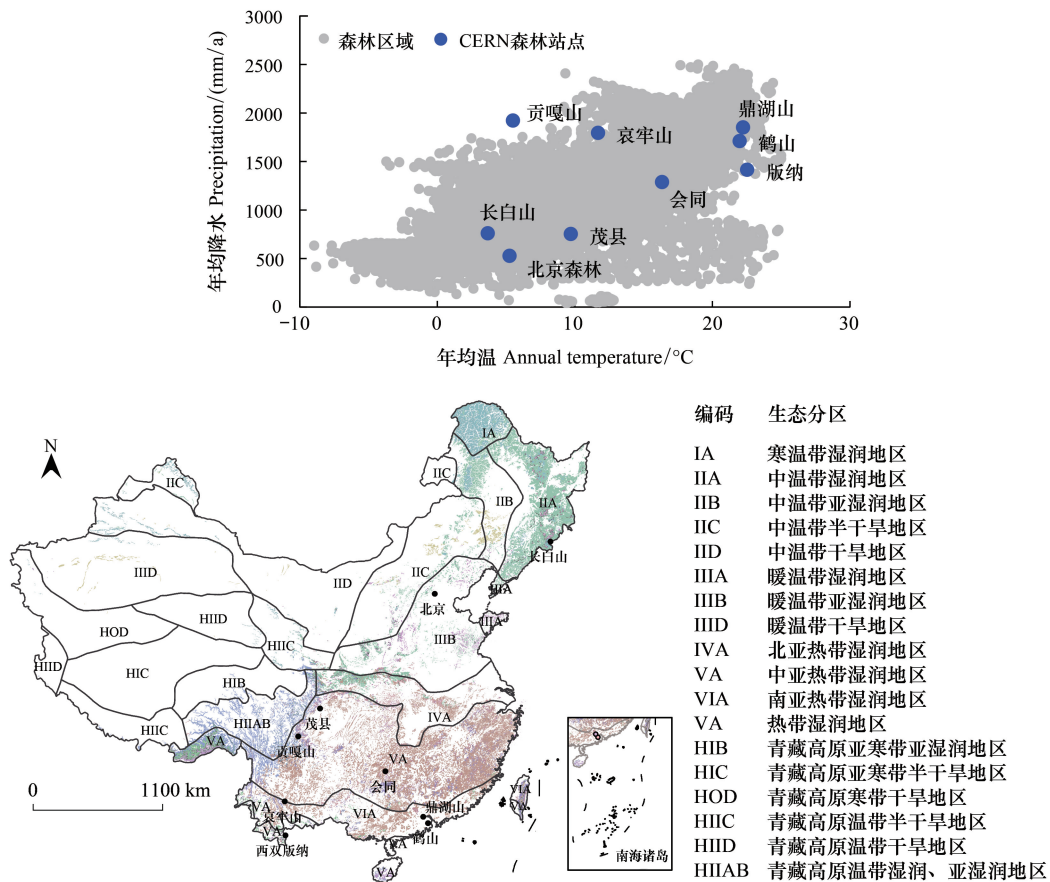


图1 中国森林区域、研究区森林台站地理位置及其年降水—年均温关系图

Fig.1 The position and relationship between mean annual temperature (°C) and precipitation (mm/a) of Chinese forest area and forest ecosystem sites in study area

2013 年^[20]。

土层测定间隔为 10—20 cm,不同站点探测的最大深度不同,为比较不同森林生态站之间土壤水分的大小,将 0—90 cm 土壤体积含水量的平均值作为研究对象。测定频率 4—10d,该测定频率由于不能及时捕捉到降水对土壤水分的影响,会造成一定程度上土壤水分的低估,但并不影响对土壤水分的空间分异以及时间趋势的探究^[5]。长白山、北京、贡嘎山森林生态站因冬季气温较低,存在冻土情况,因此仅测定生长季的土壤体积含水量,时间范围为 5—10 月,以生长季平均土壤体积含水量代表年土壤水分。使用 12 月—2 月、3—5 月、6—8、9—11 月的土壤水分平均值分别代表冬、春、夏、秋季的土壤水分进行季节趋势的分析讨论。

1.2.2 气象数据

气象数据中使用人工观测逐日降水量 (Daily precipitation) 计算季节及年降水量 (Precipitation, P)、自动观测逐日气温 (Daily temperature, T_a)、自动观测逐月相对湿度 (Monthly relative humidity, RH)、自动观测逐月净辐射 (Monthly net radiance, R_n) 均来自于 CERN 森林生态站 2005—2016 观测数据。

1.2.3 蒸散数据

由于难以获得连续、准确的蒸散 (Evapotranspiration, ET) 观测数据,在本研究中,采用模拟效果较好的 PT-JPL (Priestly-Taylor Jet Propulsion Laboratory Model) 模型对蒸散进行模拟,模型主要结构见公式 (1)—(4)^[21-22]。研究表明 PT-JPL 对蒸散的模拟在绝大部分生态系统和气候区表现最优,并且在多个站点均取得了较好的验证结果^[22-25]。

$$ET = T + E_i + E_s \quad (1)$$

$$T = (1 - F_{\text{wet}}) \cdot F_g \cdot F_m \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc} \quad (2)$$

$$E_i = F_{\text{wet}} \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc} \quad (3)$$

$$E_s = F_{\text{wet}} \cdot \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_{nc} \quad (4)$$

式中, F_{wet} 为相对表面湿度; F_g 为绿色冠层所占比例; F_m 为蒸腾水分限制因子; F_{sm} 为土壤蒸发水分限制因子; R_{nc} 和 R_{ns} 分别为冠层截获的净辐射和到达土壤表面的净辐射, 两者之和为净辐射; α 为 Priestly-Taylor 常数; Δ 为温度-饱和水汽压斜率; γ 为干湿表常数。

模型驱动变量包括气温 (T_a)、净辐射 (R_n)、相对湿度 (RH)、归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI), T_a 、 R_n 、 RH 来自 2.2.2 中的站点观测数据。EVI 与 NDVI 来自于 MODIS 数据产品 MOD13Q1, 空间分辨率为 250 m, 时间分辨率为 16 d。提取周围 3×3 格点平均值作为站点数据, 并使用当月平均值进行蒸散的模拟。

1.2.4 ERA-interim 土壤再分析资料

ERA-interim 土壤水分再分析资料能够较优秀地描述土壤水分空间格局及年际变化^[26]。ERA-interim 再分析资料是欧洲中尺度天气预报中心制作的第三代全球大气再分析资料, 空间分辨率 0.125°×0.125°, 时间覆盖范围是 1979 年至今, 并且能够近实时更新。陆面部分采用 TES-SEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchange over Land) 模式。土壤水分再分析资料垂直分为 4 层, 分别是 7、28、100、289 cm 处的土壤体积含水量数据。本研究采用中国森林区域 2005—2016 年 7、28、100 cm 这 3 个层次的土壤水分数据做进一步分析。首先使用 28 cm 与 100 cm 的土壤水分线性插值得到 90 cm 处土壤水分数据, 之后使用与 CERN 数据相对应的 0—90 cm 土壤水分逐年均值进行趋势计算。

2 结果与分析

2.1 森林生态系统土壤水分的空间分异

中国典型森林生态系统土壤水分均值为 26.58%, 呈现南北高、中部低的空间分布特征, 也即中温带、亚热带、热带土壤水分较高, 暖温带土壤水分较低 (表 2 与图 2)。具体来看, 位于中亚热带的贡嘎山亚高山暗针叶林与哀牢山中山湿性常绿阔叶林土壤水分平均值最高, 分别可达 36.30% 与 35.83%; 其次是位于中温带的长白山落叶针阔混交林, 为 30.16%; 南亚热带与热带的 3 个森林生态系统土壤水分较为相近, 均为 27% 左右; 位于暖温带的北京落叶阔叶混交林土壤水分最低, 仅有 12.45%。由表 2 还可以看出, 中国森林生态系统土壤水分的空间分布在春、夏、秋季也呈现出中温带、亚热带与热带地区土壤水分高, 暖温带地区较低的空间分布特征。比较土壤水分与各环境因子的 Pearson 相关性后得出, 我国典型森林生态系统的土壤水分与降水蒸散差最为吻合, 可以解释土壤水分空间分异的 62.3% (图 3, $R=0.79$, $P<0.05$)。

我国南方的热带亚热带地区降水整体较高, 随着纬度的降低气温上升, 蒸散逐渐增强, 降水蒸散差随之减小, 因此南方地区中的中亚热带土壤水分最高, 平均达 32.2%。位于南亚热带的鼎湖山与鹤山常绿阔叶林虽然降水更为丰沛, 但高温导致更强的蒸散使得该地区土壤水分较低于中亚热带。位于热带的版纳季节雨林降水量较亚热带稍低, 全年高温所致旺盛的蒸散发使其降水蒸散差进一步低于亚热带地区, 仅有 542.6 mm, 相应地, 其土壤水分略低于亚热带, 为 26.45%。

北方的温带地区降水量较南方显著减少, 蒸散量亦有所降低, 导致降水蒸散差显著降低。尤其是暖温带的北京与茂县森林生态系统的降水蒸散差分别仅有 262 mm 与 307 mm, 低降水与高占比的蒸散量使得该气候区森林生态系统土壤水分均低于 20%。中温带长白山森林生态系统的降水较暖温带地区稍高, 而高纬度低温导致的低蒸散量使其降水蒸散差略高于暖温带地区, 相应地土壤水分高于暖温带地区。

表 2 气候分区下森林生态系统平均降水蒸散差与土壤水分

Table 2 Average P-ET and soil moisture of forest ecosystems under climatic subregion

气候类型 Climate type	生态 站代码 Code	年均降水 Precipitation/ mm	年均蒸散 ET/mm	降水 蒸散差 P-ET/mm	土壤水分 Soil water content/%	土壤水分 Soil water content/%				
						年 Annual	春 Summer	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
中温带 Mid temperate zone	CBF	760.1	340.7	419.4	30.2	30.16	29.66	30.85	31.17	—
暖温带	BJF	641.7	356.7	285.0	15.9	12.45	12.77	12.44	12.27	—
Warm temperate zone	MXF					19.31	20.48	19.03	18.81	18.83
中亚热带	GGF	1667.5	482.6	1184.9	32.2	36.30	35.69	36.06	36.90	—
Mid-subtropics	HTF					24.54	27.06	25.40	20.23	23.66
	ALF					35.83	30.14	39.38	39.35	34.55
南亚热带	DHF	1781.7	716.2	1065.5	27.1	26.32	28.00	28.24	25.04	23.90
South subtropics	HSF					27.84	28.76	29.79	27.08	25.62
热带 Tropics	BNF	1416.5	873.8	542.6	26.5	26.45	22.74	28.57	28.80	25.57

其中 CBF、BJF、GGF 因冬季冻土,以生长季土壤水分均值代表年均值;P: 降水 Precipitation; ET: 蒸散量 Evapotran spiration

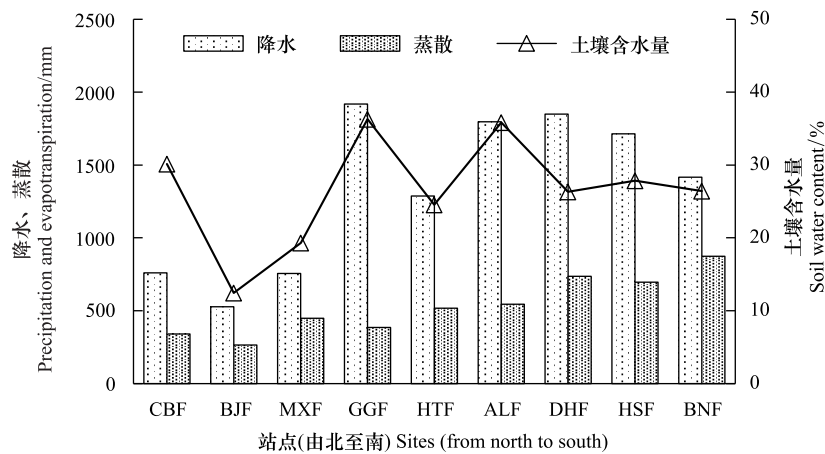


图 2 研究区森林生态系统土壤水分平均值、年降水、年蒸散量由北至南的空间分布

Fig.2 The Spatial distribution of soil moisture, annual precipitation and annual ET from north to south of forest ecosystems in study area
站点用生态站代码表示

2.2 森林生态系统土壤水分时间动态

2.2.1 年均值变化趋势

我国不同气候区森林生态系统土壤水分在 2005—2016 年间的变化趋势存在差异(图 4)。总体来说,我国北方地区的中温带长白山森林、暖温带北京森林,以及东部季风区的中亚热带会同森林、南亚热带鼎湖山与鹤山森林土壤水分呈现上升趋势,北京、鼎湖山、鹤山森林土壤水分上升趋势显著;西南地区的暖温带茂县、热带版纳、中亚热带贡嘎山及哀牢山森林生态系统土壤水分呈下降趋势,后两者下降趋势显著。降水蒸散差可以较好地解释土壤水分的变化趋势($R=0.59$, $P<0.01$),其中降水上升是导致土壤水分上升的主要原因,土壤水分下降趋势则是由降水减少与蒸散上升共同导致。

北方中温带长白山森林降水与蒸散均呈上升趋势,

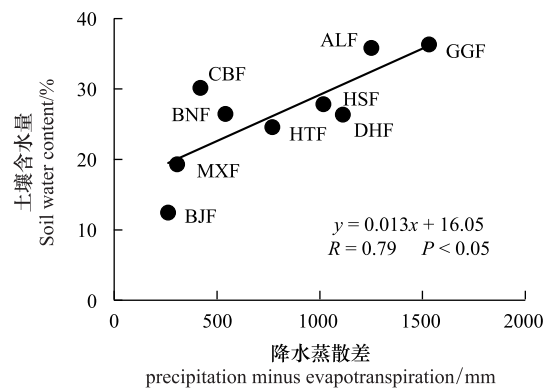


图 3 研究区森林生态系统土壤水分平均值与降水蒸散差的相关关系

Fig.3 The correlation between average soil moisture and P-ET in study area

但降水增幅大于蒸散增幅,降水蒸散差有所上升,土壤水分呈现 $0.43\%/a$ 的上升趋势(图 4)。由图 4 也可以看出北京是研究区中唯一蒸散呈下降趋势的森林站点,归因于净辐射在 12 年内呈显著下降趋势($-1.97 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $P < 0.05$),同时降水有所上升,即降水蒸散差上升,使得北京森林土壤水分呈 $0.67\%/a$ ($P < 0.01$) 的显著上升趋势。暖温带的茂县森林降水与蒸散在 2005—2016 年间均呈上升趋势,但增幅更大的蒸散(10.97 mm/a , $P < 0.05$) 导致其土壤水分以 $-0.06\%/a$ 的趋势微弱下降;净辐射上升($0.79 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 是导致茂县森林蒸散显著上升的主要原因。

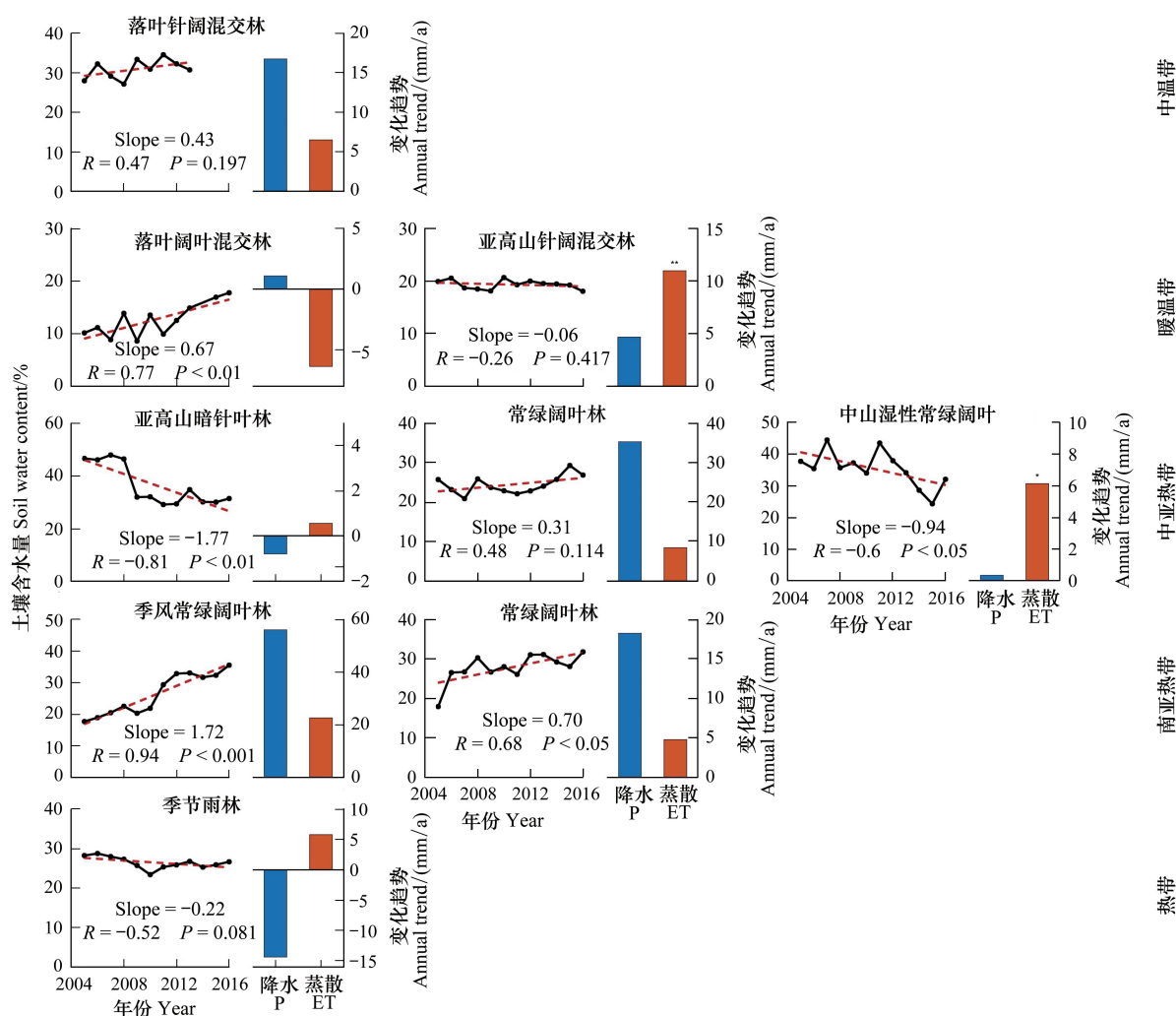


图 4 2005—2016 研究区森林生态系统年降水、年蒸散、土壤水分年均值变化趋势

Fig. 4 Annual trend of precipitation, ET and soil moisture of forest ecosystems in study area during 2005—2016

* 表示显著性水平为 5%, ** 表示显著性水平为 1%

由图 4 可以看出,中亚热带西部的贡嘎山与哀牢山森林土壤水分均显著下降,降幅分别为 $-1.77\%/a$ ($P < 0.01$)、 $-0.94\%/a$ ($P < 0.05$)。贡嘎山降水下降 (-0.79 mm/a) 的同时蒸散基本保持稳定 (0.57 mm/a);而哀牢山森林降水虽有略微上升 (0.35 mm/a),但蒸散呈显著上升趋势 (6.15 mm/a , $P < 0.05$),其中净辐射上升 ($0.96 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, $P < 0.05$) 对蒸散变化趋势的贡献最大;综合来看,降水蒸散差分别以 -1.36 mm/a 与 -5.80 mm/a 的速率减少,导致该地区森林生态系统土壤水分显著降低。会同森林位于中亚热带中部,在 2005—2016 年间,降水与蒸散均有所增加,但降水增幅大于蒸散增幅,因此土壤水分呈现 $0.31\%/a$ 的不显著上升趋势。

如图 4 所示,南亚热带的鼎湖山与鹤山森林土壤水分在 12 年间均存在显著上升趋势,增幅分别为 $1.72\%/a$ ($P < 0.001$) 与 $0.70\%/a$ ($P < 0.05$)。鼎湖山森林净辐射增加 ($1.38 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 与鹤山森林相对湿度上

升(0.73%/a)导致两者蒸散呈现上升趋势,增幅分别为 22.61 mm/a 与 4.80 mm/a,但增幅更大的降水(分别为 56.07 mm/a 与 18.26 mm/a)导致两者降水蒸散差分别以 33.46 mm/a 与 13.46 mm/a 的速率增加,进一步导致土壤水分上升。

热带版纳季节雨林降水降低(-14.38 mm/a)的同时蒸散上升(5.78 mm/a),相对湿度增加(0.48%/a)对蒸散变化的贡献最大,使得该森林生态系统的降水蒸散差以-20.15 mm/a 的速率降低,导致土壤水分以-0.22%/a的速率下降(图 4)。

2.2.2 季节均值的变化趋势

由表 3 可以看出,在 2005—2016 年各季节中,降水蒸散差的增减可以较好地解释土壤水分季节均值的变化趋势;北部与东部森林区域土壤水分年均值呈上升趋势,各季节均值也呈现出上升趋势,其年际变化由秋、冬季主导。西南地区土壤水分年均值呈下降趋势,除茂县森林冬季土壤水分略有上升外,其他三个森林生态系统土壤水分在各季节均呈下降趋势,并且其春季土壤水分变化主导了年际变化。

北方的中温带长白山、暖温带北京森林以及中亚热带的会同森林土壤水分年际上升由秋季主导,贡献率分别为 48.7%、67.8%与 64.7%;长白山森林秋季降水上升,蒸散基本保持不变,土壤水分以 0.73%/a 的速率上升;北京森林秋季降水增加,蒸散显著下降(-2.82 mm/a, $P<0.01$),土壤水分随之上升(0.94%/a, $P<0.01$);中亚热带会同森林秋季降水显著增加(17.21 mm/a, $P<0.01$),以及增幅小于降水的蒸散共同导致了秋季土壤水分的显著上升(0.68%/a, $P<0.05$)。东部季风区亚热带鼎湖山与鹤山森林土壤水分上升趋势由冬季主导,贡献率分别为 29.7%与 35.9%;两个森林生态系统冬季降水均显著上升,速率分别为 26.43 mm/a ($P<0.05$)、23.97 mm/a, ($P<0.05$),而蒸散仅略微增加,降水蒸散差增幅较其他三季更大,使得该三个森林生态系统的冬季土壤水分增幅最大。

西南地区的中亚热带贡嘎山与哀牢山、热带版纳森林春季土壤水分的下降主导了年际变化,贡献率分别为 37.3%、37.9%与 63.4%。三者春季降水均呈下降趋势,其中贡嘎山森林春季降水下降趋势显著(-12.14 mm/a, $P<0.01$),而蒸散有所上升,其中哀牢山森林春季蒸散上升趋势显著(3.92 mm/a, $P<0.01$),使得春季降水蒸散差降幅最大,进而导致春季土壤水分降幅亦最大,分别为-2.09%/a ($P<0.01$)、-1.42%/a ($P<0.05$)与 -0.55%/a ($P<0.05$)。

表 3 2005—2016 研究区森林生态系统各季节降水、蒸散、P-ET 变化趋势

Table 3 Annual trend of precipitation, ET, P-ET and soil moisture in every season of forest ecosystems in study area during 2005—2016

季节 Season	气候类型 Climate type	中温带 Mid temperate zone	暖温带 Warm temperate zone		中亚热带 Mid-subtropics			南亚热带 South subtropics		热带 Tropics
	生态站代码 Code	CBF	BJF	MXF	GGF	HTF	ALF	DHF	HSF	BNF
春 Spring	降水 /(mm/a)	-1.41	-2.33	-4.08	-12.14 **	9.82	-7.42	8.88	13.93	-7.60
	蒸散 /(mm/a)	1.79	0.30	2.65 *	0.57	0.13	3.92 **	5.05	0.59	3.54
	土壤水分/(%/a)	0.22	0.42	-0.10	-2.09 **	-0.11	-1.42 *	1.66 **	0.72	-0.55 *
夏 Summer	降水/(mm/a)	13.30	0.80	5.50	6.99	8.19	3.86	3.18	-36.45	-13.55
	蒸散/(mm/a)	5.28	-3.22	6.75 *	-0.65	6.05	1.56	11.00	-0.95	-1.65
	土壤水分/(%/a)	0.13	0.57 *	-0.02	-1.69 **	0.12	-0.76	1.59 **	0.51	-0.17
秋 Fall	降水/(mm/a)	4.87	2.61	3.40	4.36	17.21 *	-2.71	22.99 **	20.13 *	-2.66
	蒸散/(mm/a)	0.20	-2.82 **	1.45 **	0.17	1.76	-0.31	4.39	3.97 *	2.21
	土壤水分/(%/a)	0.73	0.94 **	-0.13	-1.83 **	0.68 *	-0.73	1.61 **	0.62 *	-0.12
冬 Winter	降水/(mm/a)	0.12	0.06	0.37	0.33	2.86	8.68	26.43 **	23.97 *	11.52 *
	蒸散/(mm/a)	-0.45	-1.01 **	0.33	0.67	0.83	2.16	2.20	1.91	3.31 *
	土壤水分/(%/a)	-	-	0.04	-	0.35	-0.85	2.12 **	1.02 **	-0.03

* 表示显著性水平为 5%, ** 表示显著性水平为 1%

2.3 与中国森林区域土壤水分再分析资料的比较

本研究进一步比较了 CERN 森林土壤水分观测数据与 ERA-interim 土壤水分再分析资料时空分异的异同,结果显示两者在空间分异和变化趋势上具有较高的一致性。ERA-interim 土壤水分再分析资料显示中国森林区域土壤水分整体呈现南北高、中部低的空间分异特征(图 5)。森林区域土壤水分高值主要分布在东北部寒温带与中温带地区、东南沿海的亚热带地区以及西南部中亚热带地区,土壤水分低值主要分布在中国北部的大部分暖温带气候区。根据本研究的气候分区情况,平均土壤水分由高到低依次为:热带(31.84%)>中亚热带(30.24%)>中温带(28.66%)>亚热带(28.65%)>暖温带(19.64%),除热带地区比 CERN 略有高估外,与本研究基于 CERN 森林生态站土壤水分观测数据所估算的空间格局基本一致。

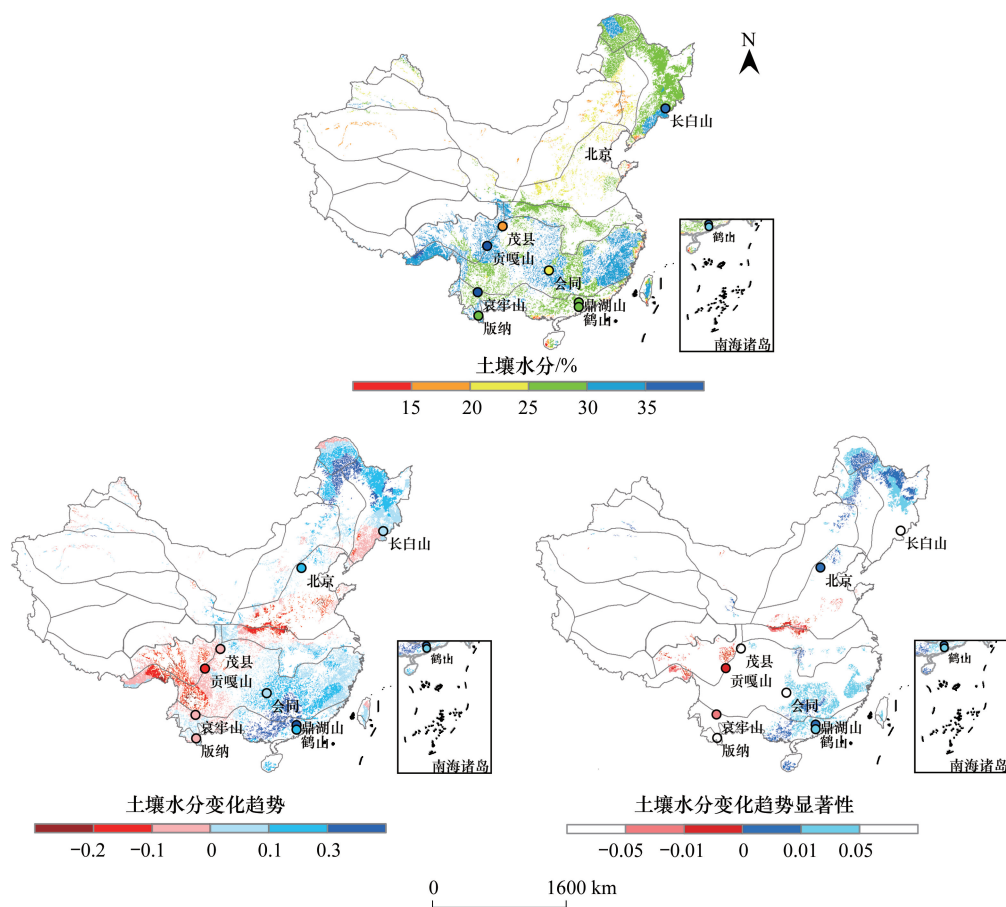


图 5 ERA-interim 再分析资料中国森林区域与 CERN 森林生态站 2005—2016 年平均土壤水分(%)、年均值变化趋势及其显著性水平

Fig.5 Mean soil moisture (%), Interannual trend (%/a) and significance of mean soil moisture from 2005 to 2016 in China's forest regions from ERA-interim and CERN forest ecosystem stations

$P < 0$ 部分表示变化趋势为负区域,绝对值为显著性

ERA-interim 中国森林区域土壤水分年均值在 2005—2016 年间的变化趋势如图 5 所示,森林区域土壤水分年际变化的总体趋势与本研究基于 CERN 森林生态站所得结果基本一致,但上升、下降的程度有所不同,整体呈现出由东南至西北的湿润—干燥—湿润趋势带状分布。位于我国东南的大部分亚热带热带地区,森林生态系统土壤水分呈现出上升趋势,平均增幅为 0.16%/a,其中华南地区土壤水分显著上升(平均增幅 0.20%/a, $P < 0.05$),对应在此区域的 CERN 森林站点土壤水分平均增幅 0.91%/a ($P < 0.05$);会同森林土壤水分亦有所上升,但统计上不显著,与再分析资料结果一致。西南地区的森林土壤水分则是以下降趋势为主,降幅平均为 -0.09%/a,与 CERN 相比,西南地区的版纳、哀牢山、贡嘎山和茂县森林土壤水分均呈下降趋势(平均降幅 0.74%/a),但显著程度与再分析资料有所差异。而华西北部地区以及东北大部分地区,土壤水分呈上

升趋势,平均增幅为 0.21%/a,对应 CERN 的北京、长白山森林土壤水分亦呈上升趋势。

3 讨论

3.1 中国森林生态系统土壤水分空间分异及影响因素

现阶段基于观测资料的中国森林区域土壤水分的探究较为有限,研究多基于某一特定的森林生态系统或某一流域的森林区域^[27]。贺淑霞等(2011)基于四个中国东部典型森林生态系统野外观测站(长白山站、北京站、会同站、鼎湖山站)2005—2007 年 5—10 月的观测数据,估算了各站点 0—60 cm 的平均土壤水分分别为 33.7%、10.8%、38.2%、22.8%,与本研究结果基本一致;然而该研究还表示中国东部森林生态系统土壤水源涵养量(主要为土壤水分)无明显空间分布规律^[28],在本研究进一步扩充了森林生态站的数量后,可以看出森林生态系统的土壤水分受水热梯度的影响,随着降水蒸散差的增减而增减。

降水蒸散差代表着地表和大气之间水分的净通量,可近似视为森林生态系统的可利用水资源量,调控土壤水分的大小,结合降水与蒸散来探究土壤水分的时空分异比单一地使用降水或蒸散更为合理全面^[15, 29-30],因此本研究主要探究了降水蒸散差与土壤水分的关系,结果显示降水蒸散差对土壤水分空间分异的解释率最高($R=0.79$, $P<0.05$)。一些基于标准化降水蒸散指数($SPEI=P-PET$)的研究结果表明,我国 SPEI 呈现出东北部、南部高,北部与西北部低的空间格局^[31-32],与本研究基于 CERN 观测数据以及 ERA-interim 再分析资料得到的土壤水分空间格局一致。

其他环境因素在一定程度上也会影响土壤水分的空间分异^[33]。例如,中温带的长白山森林生态系统完全持水量与田间持水量分别高达 57.72%与 46.40%(表 1),说明土壤发育情况较好,有利于土壤对水分的持存^[34]。西双版纳热带森林受到了季节干旱的影响,一定程度上限制了土壤的持水能力^[17],但在研究区中该森林生态系统的 LAI 与 NDVI 最高(表 1),旺盛的植被有利于减少地表径流,改善土壤结构,增强土壤的持水能力,使其具有较高的土壤水分^[27]。

3.2 土壤水分时间动态及影响因素

本研究基于 CERN 观测数据以及 ERA-interim 再分析资料的结果显示 2005—2016 年间我国森林区域土壤水分在北部与东部地区呈上升趋势,西南区域呈下降趋势。一些基于农田站土壤水分观测数据以及遥感与再分析资料的研究均在相近时段内得到了相似的结论^[19, 35-36]。本研究还表明降水蒸散差不仅能够解释土壤水分的空间分异,同时也能很好地解释时间动态。在全球气候变化背景下,本世纪以来我国森林区域降水与蒸散总体均呈现出上升趋势,但也存在一定的区域异质性^[6]。大量研究表明,我国近几十年 SPEI 变化趋势总体呈现出在东部地区上升,西南地区下降的空间分布^[17, 31-32]。Cheng 等表示我国东南地区土壤水分主要受降水的影响,同时有研究表明我国东南区域近几十年降水呈现显著增加趋势,因而该区域土壤水分有所上升^[37-38]。除此之外,我国进行大面积植树造林工程以来,华北与东南地区的森林覆盖与 LAI 均显著上升,进一步促进了降水的增加,抵消了蒸散增加对土壤水分的负向反馈,进一步导致相应地区土壤水分显著上升^[39]。2010 年西南地区特大干旱对该地区森林生态系统土壤水分具有深远的影响,研究表明我国近二十年间,西南区域土壤水分以降低趋势为主^[36, 40]。同时有研究显示在近几十年中国西南地区的降水受夏季西南季风减弱的抑制,而森林覆盖显著增加使得蒸散大幅增加,进一步加剧了西南地区的干旱情况^[19, 38-39]。

我国北方森林秋季土壤水分主导了该地区的年际上升趋势,华南地区土壤水分上升主要由冬季主导,降水对土壤水分的上升贡献最大。已有研究显示我国北部地区秋季降水显著上升、东南地区冬季降水显著上升,土壤水分变化趋势也呈现出相似的季节特征^[36, 38, 41]。同时由表 3 可以看出,我国东南森林区域夏季降水有所下降,但土壤水分仍呈上升趋势,东南亚季风带来了丰富的降水使得该区域水资源过剩,单个季节可利用水资源量的减少并不致土壤水分下降^[39]。而位于我国西南地区森林土壤水分下降则由春季主导,降水减小与蒸散上升共同导致了该变化趋势,已有研究证实我国西南地区的降水、SPEI 与土壤水分均在旱季降幅更大^[31, 42]。

区域的水文平衡受到降水、蒸散、径流和土壤水分的共同控制,受到径流观测数据的限制,本研究主要探讨了降水、蒸散和土壤水分之间的关系。虽然径流也受到降水蒸散差的控制,但不影响土壤水分时空分异的分析^[29]。同时,由以上讨论可以看出植被动态是通过影响气候条件(主要是降水与蒸散)从而作用于土壤水分^[43]。土壤-植被-大气(Soil-Plant-Atmosphere-Continuum, SPAC)作为有机的整体共同作用于气候系统,其中土壤作为森林生态系统提供水源涵养服务的主要场所使得土壤水分至关重要^[44]。因此,基于 SPAC 系统对土壤水分进行进一步探究,对研究区域碳水循环、气象反馈在中国的时空分异以及生态系统服务均有重要意义。

4 结论

本研究基于 9 个来自 CERN 森林生态站 2005—2016 年土壤水分的观测数据,探究了中国典型森林生态系统土壤水分时空分布特征及其影响因素,结果表明:

(1) 研究区森林生态系统的土壤水分在 2005—2016 年的平均值介于 12.45%—36.30% 之间,空间上呈现中温带、亚热带、热带土壤水分较高,在暖温带土壤水分较低的分布特征;降水蒸散差与土壤水分空间分异相关性最高。

(2) 我国北部与东部地区森林土壤水分呈现上升趋势,降水上升是主因;西南地区森林生态系统土壤水分呈下降趋势,降水下降与蒸散上升共同导致土壤水分的下降;

(3) 土壤水分呈下降趋势的森林生态系统中,春季土壤水分变化主导了年际变化,土壤水分上升的森林生态系统中,年际变化则是由秋、冬季主导。

参考文献(References):

- [1] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3/4): 125-161.
- [2] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, Gumuzzio A, Herrero-Jiménez C M. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 177: 277-286.
- [3] Lookingbill T, Urban D. An empirical approach towards improved spatial estimates of soil moisture for vegetation analysis. *Landscape Ecology*, 2004, 19(4): 417-433.
- [4] Korres W, Reichenau T G, Fiener P, Koyama C N, Bogen H R, Cornelissen T, Baatz R, Herbst M, Diekkötter B, Vereecken H, Schneider K. Spatio-temporal soil moisture patterns - A meta-analysis using plot to catchment scale data. *Journal of Hydrology*, 2015, 520: 326-341.
- [5] McColl K A, Alemohammad S H, Akbar R, Konings A G, Yueh S, Entekhabi D. The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 2017, 10(2): 100-104.
- [6] Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, Wu P L, Li Y H. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30571.
- [7] Green J K, Seneviratne S I, Berg A M, Findell K L, Hagemann S, Lawrence D M, Gentile P. Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake. *Nature*, 2019, 565(7740): 476-479.
- [8] Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Seneviratne S I, Peñuelas J. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 2019, 12(4): 264-270.
- [9] Vinnikov K Y, Robock A, Speranskaya N A, Schlosser C A. Scales of temporal and spatial variability of midlatitude soil moisture. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D3): 7163-7174.
- [10] Wang T J, Liu Q, Franz T E, Li R P, Lang Y C, Fiebrich C A. Spatial patterns of soil moisture from two regional monitoring networks in the United States. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 578-585.
- [11] Hu W, Chau H W, Qiu W W, Si B C. Environmental controls on the spatial variability of soil water dynamics in a small watershed. *Journal of Hydrology*, 2017, 551: 47-55.
- [12] Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z C, Bonan G, Chan E, Cox P, Gordon C T, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Lu C H, Malyshev S, McAvaney B, Mitchell K, Mocko D, Oki T, Oleson K, Pitman A, Sud Y C, Taylor C M, Verseghy D, Vasic R, Xue Y K, Yamada T. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305(5687): 1138-1140.

- [13] Guo Z C, Dirmeyer P A, Koster R D, Sud Y C, Bonan G, Oleson K W, Chan E, Versegny D, Cox P, Gordon C T, McGregor J L, Kanae S, Kowalczyk E, Lawrence D, Liu P, Mocko D, Lu C H, Mitchell K, Malyshev S, McAvaney B, Oki T, Yamada T, Pitman A, Taylor C M, Vasic R, Xue Y K. GLACE: the global land-atmosphere coupling experiment. Part II: analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 2006, 7(4): 611-625.
- [14] Tuttle S E, Salvucci G D. Confounding factors in determining causal soil moisture-precipitation feedback. *Water Resources Research*, 2017, 53(7): 5531-5544.
- [15] Berg A, Sheffield J, Milly P C D. Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 236-244.
- [16] Li H X, Chen H P, Wang H J, Yu E T. Future precipitation changes over China under 1.5 °C and 2.0 °C global warming targets by using CORDEX regional climate models. *Science of the Total Environment*, 2018, 640-641: 543-554.
- [17] Li X, He B B, Quan X W, Liao Z M, Bai X J. Use of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) to Characterize the Drying Trend in Southwest China from 1982-2012. *Remote Sensing*, 2015, 7(8): 10917-11937.
- [18] Jia B H, Liu J G, Xie Z H, Shi C X. Interannual variations and trends in remotely sensed and modeled soil moisture in China. *Journal of Hydrometeorology*, 2018, 19(5): 831-847.
- [19] Pan N, Wang S, Liu Y X, Zhao W W, Fu B J. Global surface soil moisture dynamics in 1979-2016 observed from ESA CCI SM Dataset. *Water*, 2019, 11(5): 883.
- [20] 唐新斋, 袁国富, 朱治林, 张心昱, 孙晓敏, 常学向, 戴冠华, 杜娟, 傅伟, 官有军, 郭永平, 何其华, 何永涛, 黄苛, 姜峻, 蒋正德, 李猛, 李伟, 李小丽, 李晓欣, 李新虎, 李玉成, 李玉强, 鲁志云, 苏宏新, 孙聃, 唐建维, 汪树超, 王吉顺, 王书伟, 徐文婷, 杨风亭, 尹春梅, 张法伟, 张加双, 张倩媚, 张志山, 章熙锋, 赵岩. 2005—2014 年 CERN 野外台站气象观测场土壤含水量数据集. *中国科学数据*, 2017, 2(1): 35-44.
- [21] Fisher J B, Tu K P, Baldocchi D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II data, validated at 16 FLUXNET sites. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 901-919.
- [22] Miralles D G, Jiménez C, Jung M, Michel D, Ershadi A, McCabe M F, Hirschi M, Martens B, Dolman A J, Fisher J B, Mu Q, Seneviratne S I, Wood E F, Fernández-Prieto D. The WACMOS-ET project-Part 2: evaluation of global terrestrial evaporation data sets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(2): 823-842.
- [23] Michel D, Jiménez C, Miralles D G, Jung M, Hirschi M, Ershadi A, Martens B, McCabe M F, Fisher J B, Mu Q, Seneviratne S I, Wood E F, Fernández-Prieto D. The WACMOS-ET project-Part 1: tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(2): 803-822.
- [24] 任小丽, 路倩倩, 何洪林, 张黎, 牛忠恩. 中国东部南北样带森林生态系统蒸腾与蒸散比值(T/ET)时空变化. *地理学报*, 2019, 74(1): 63-75.
- [25] 牛忠恩, 胡克梅, 何洪林, 任小丽, 张黎, 葛蓉, 李攀, 郑涵, 朱晓波, 曾纳. 2000—2015 年中国陆地生态系统蒸散时空变化及其影响因素. *生态学报*, 2019, 39(13): 4697-4709.
- [26] Zhang X H, Qiu J X, Leng G Y, Yang Y M, Gao Q Z, Fan Y, Luo J S. The potential utility of satellite soil moisture retrievals for detecting irrigation patterns in China. *Water*, 2018, 10(11): 1505.
- [27] Wang Y Q, Shao M A, Liu Z P, Warrington D N. Investigation of factors controlling the regional-scale distribution of dried soil layers under forestland on the Loess Plateau, China. *Surveys in Geophysics*, 2012, 33(2): 311-330.
- [28] 贺淑霞, 李叙勇, 莫菲, 周彬, 高广磊. 中国东部森林样带典型森林水源涵养功能. *生态学报*, 2011, 31(12): 3285-3295.
- [29] Leng G Y, Tang Q H, Huang M Y, Hong Y, Ruby L L. Projected changes in mean and interannual variability of surface water over continental China. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58(5): 739-754.
- [30] Swann A L S, Hoffman F M, Koven C D, Randerson J T. Plant responses to increasing CO₂ reduce estimates of climate impacts on drought severity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(36): 10019-10024.
- [31] Xu K, Yang D W, Yang H B, Li Z, Qin Y, Shen Y. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: a climatic perspective. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 253-264.
- [32] Yao N, Li Y, Lei T J, Peng L L. Drought evolution, severity and trends in mainland China over 1961-2013. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 73-89.
- [33] Salley S W, Sleezer R O, Bergstrom R M, Martin P H, Kelly E F. A long-term analysis of the historical dry boundary for the Great Plains of North America: implications of climatic variability and climatic change on temporal and spatial patterns in soil moisture. *Geoderma*, 2016, 274: 104-113.
- [34] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. *Journal of Hydrology*, 2004, 285(1/4): 199-214.
- [35] Kong D D, Zhang Q, Singh V P, Shi P J. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982-2013). *Global and*

- Planetary Change, 2017, 148: 1-8.
- [36] Zhu G F, Pan H X, Zhang Y, Guo H W, Yong L L, Wan Q Z, Ma H Y, Li S. Relative soil moisture in China's farmland. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(3): 334-350.
- [37] Cheng S J, Guan X D, Huang J P, Ji F, Guo R X. Long-term trend and variability of soil moisture over East Asia. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, 120(17): 8658-8670.
- [38] Qu B, Lv A F, Jia S F, Zhu W B. Daily precipitation changes over large river basins in China, 1960-2013. Water, 2016, 8(5): 185.
- [39] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. Science Advances, 2018, 4(5): eaar4182.
- [40] Chao N F, Wang Z T, Jiang W P, Chao D B. A quantitative approach for hydrological drought characterization in southwestern China using GRACE. Hydrogeology Journal, 2016, 24(4): 893-903.
- [41] Feng Y, Zhao X Y. Changes in spatiotemporal pattern of precipitation over China during 1980-2012. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(4): 1649-1662.
- [42] Qiu J X, Gao Q Z, Wang S, Su Z R. Comparison of temporal trends from multiple soil moisture data sets and precipitation: the implication of irrigation on regional soil moisture trend. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 48: 17-27.
- [43] Yu G R, Jie Z, Nakayama K, Yan J J P E. Root water uptake and profile soil water as affected by vertical root distribution. Plant Ecology, 2007, 189(1): 15-30.
- [44] Robinson N, Harper R J, Smettem K R J. Soil water depletion by *Eucalyptus* spp. integrated into dryland agricultural systems. Plant and Soil, 2006, 286(1/2): 141-151.