

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.019; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.019.

黄艳平, 罗贵文, 高林海, 等. 东北平原土体厚度和土壤水分的空间变异[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3):108-118.

Huang Yanping, Luo Guiwen, Gao Linhai, et al. Spatial variation of soil thickness and soil moisture in the Northeast Plain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 108-118.

东北平原土体厚度和土壤水分的空间变异

黄艳平, 罗贵文, 高林海, 付金霞, 李志

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究东北平原土体厚度和土壤水分的空间变异特征, 为黑土资源合理利用与有效保护提供重要理论参考。[方法] 基于 2010—2018 年 90 m 分辨率土体厚度数据和 1 km 分辨率 0—100 cm 深土壤分层水分数据, 利用 GIS 技术分析了东北平原土体厚度和土壤水分在主要环境因素(气候带、地形地貌、土壤质地)下的空间分布特征。[结果] (1) 土体厚度松嫩平原(平均 144 cm) > 辽河平原(平均 113 cm) > 三江平原(平均 103 cm), 土壤水分三江平原(均值 31.1%) > 松嫩平原(均值 29.3%) > 辽河平原(均值 24.9%)。土壤表层 0—20 cm 水分含量较高。当土体厚度 < 60 cm 时, 土壤水分随深度增大呈减小趋势; 而土体厚度 > 60 cm 时, 土壤水分随深度增大呈先减小再增大趋势。(2) 土体厚度在中温带半湿润地区最厚, 在中温带半干旱地区最薄。冲积平原和湖积平原区土体厚度最大。土体厚度与高程、坡度总体呈负相关, 300 m 高程以下、坡度 5° 以下(特别是 2° 以下) 土体较厚, 但辽河平原在高程 400~600 m 出现增厚现象。(3) 土壤水分在中温带湿润地区含量最大, 在中温带半干旱地区含量最小。辽河平原土壤水分随高程增加呈缓慢减小—增大—减小趋势, 松嫩、三江平原则总体呈缓慢增大趋势。辽河、松嫩平原土壤水分随坡度增大总体呈缓慢增大趋势, 三江平原则变化较稳定。砂黏土、黏壤的水分含量较高, 砂土、砂壤、粉壤的水分含量较低。[结论] 东北平原土体厚度和土壤水分受气候、地形和土壤质地等因素影响显著, 三江、松嫩、辽河平原间呈现明显区域差异。

关键词: 东北平原; 土体厚度; 土壤水分; 环境因素; 空间分布

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0108-11

Spatial variation of soil thickness and soil moisture in the Northeast Plain

Huang Yanping, Luo Guiwen, Gao Linhai, Fu Jinxia, Li Zhi

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatial variation characteristics of soil thickness and soil moisture in the Northeast Plain, providing important theoretical reference for the rational utilization and effective protection of black soil resources. [Methods] Based on soil thickness data with 90 m resolution and 1 km resolution layered soil moisture data at depths of 0—100 cm from 2010 to 2018, GIS technology was used to analyze the spatial distribution characteristics of soil thickness and soil moisture in the Northeast Plain under the influence of major environmental factors (climate zones, topography, soil texture). [Results] (1) The Songnen Plain had the highest soil thickness (average 144 cm), followed by the Liaohe Plain (average 113 cm) and the Sanjiang Plain (average 103 cm). The Sanjiang Plain had the highest soil moisture (mean 31.1%), followed by the Songnen Plain (mean 29.3%) and the Liaohe Plain (mean 24.9%). The soil moisture content was highest in the 0—20 cm soil surface layer. When soil thickness was less than 60 cm, soil moisture decreased with increasing depth. When soil thickness exceeded 60 cm, soil moisture initially decreased and then increased with increasing depth. (2) The thickest soil layer was found in the mid-temperate semi-humid region, while the thinnest was in the mid-temperate semi-arid region. Alluvial plain and lacustrine plain exhibited the largest soil thickness. Soil

收稿日期: 2024-08-10

修回日期: 2024-09-06

接受日期: 2024-09-20

资助项目: 国家重点研发计划项目课题(2022YFD1500102); 国家自然科学基金(41807070)

第一作者: 黄艳平(1997—), 女, 湖南溆浦人, 硕士, 主要从事土壤水文研究。E-mail: 137396651@qq.com

通信作者: 付金霞(1978—), 女, 甘肃靖远人, 博士, 副教授, 主要从事气候变化、土地利用覆被变化与土壤侵蚀研究。E-mail: fujinxia405@nwsuaf.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

thickness was generally negatively correlated with altitude and slope, and soil was thicker below 300 m altitude and with a slope of less than 5° , especially 2° . However, an anomaly of increased thickness was observed at altitudes between 400 m and 600 m in the Liaohe Plain. (3) Soil moisture content was highest in the mid-temperate humid region and lowest in the mid-temperate semi-arid region. In the Liaohe Plain, soil moisture showed a slowly decreasing-increasing-decreasing trend with increasing altitude, while in the Songnen Plain and Sanjiang Plain, the trend was generally a slow increase. Soil moisture in the Liaohe Plain and Songnen Plain increased slowly with the increase in slope, while the Sanjiang Plain showed relatively stable variation. Sandy clay and clay loam had higher moisture content, while sandy soil, sandy loam, and silty loam had lower moisture content. [Conclusion] Influenced by environmental factors such as climate, topography, and soil texture, soil thickness and soil moisture in the Northeast Plain showed obvious regional differences among the Sanjiang, Songnen, and Liaohe Plains.

Keywords: Northeast Plain; soil thickness; soil moisture; environmental factors; spatial distribution

土壤不仅是植物生长的基础,也是水文循环和生物地球化学循环的关键部分。土体厚度作为描述土壤垂直延伸特征的一个重要参数,直接影响着土壤的养分存储能力和水分调节能力^[1]。东北平原(由辽河平原、松嫩平原和三江平原组成)黑土资源丰富,土层深厚、土壤肥沃,是我国重要的粮食生产基地,在保障国家粮食安全中占有重要地位^[2-3]。然而由于长期的水土流失和人类高强度利用,黑土表层以年均0.3~1.0 cm厚度在减少^[4],土壤变薄导致土壤储水、持水能力降低^[5-6],进而引起土壤质量下降,农作物产量降低,东北平原正面临着严峻的土壤退化问题^[7-8]。目前,一些学者对东北平原局部地区土层厚度和水分的变异特征进行了研究^[9-11],但整个东北平原土体厚度以及土壤水分水平、垂直空间变异特征研究仍然薄弱。因此亟需开展东北平原土体厚度和土壤水分的空间变异特征研究,为东北平原土壤资源的合理利用、有效管理和保护提供科学依据。

东北平原土体厚度的空间分布主要受气候和地形地貌等因素的影响,而土壤水分的空间分布主要受气候、地形地貌和土壤质地等因素的影响^[12-13]。气候要素(气温、降水等)影响土壤发育过程和强度,进而影响土体厚度、土壤水热等理化性质以及土壤地域空间分布^[14-15]。地形地貌要素(如冲积平原和丘陵、高程和坡度等)影响土体厚度、土壤质地和土壤水分等的空间分布和再分配,如较高地势和较陡的坡度因排水较快易导致土壤侵蚀使土层变薄、土壤质地较粗,而地势低洼、坡度平缓地区因积水和物质沉积致使土壤较厚、质地较细和水分含量高^[16-18]。土壤质地的粗细影响土壤透水、储水和持水能力,砂质土透水性能良好但保水性能差,黏质土透水性差但保水性强,而壤质土透水性和保水性均良好^[19]。目前,在环境因素对东北平原局部

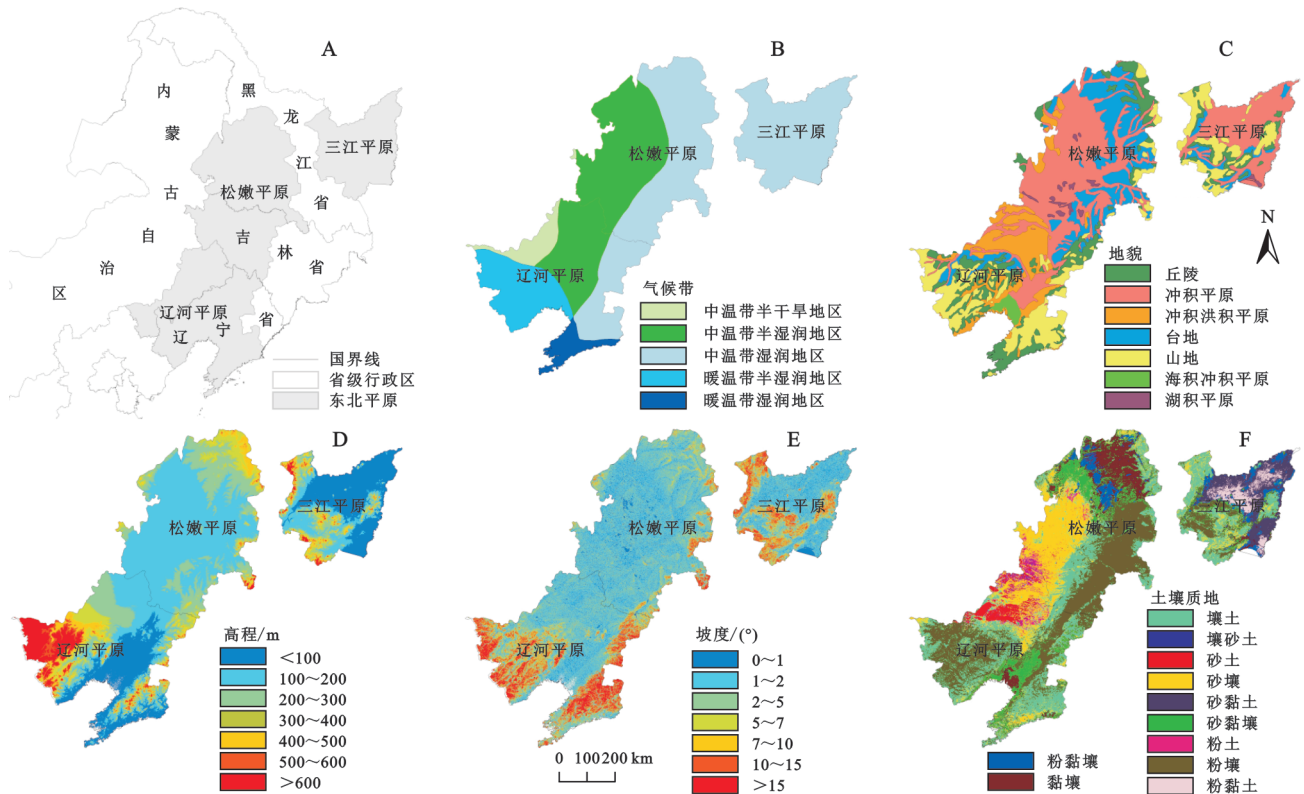
地区土壤水分变化的影响方面,取得了一定研究成果^[20-21],但土体厚度、土壤水分空间变化与环境因素关系的定量研究尚薄弱。因此有必要开展整个东北平原土体厚度、土壤水分空间变异与主要环境因素(气候、地形地貌、土壤质地)的关系研究。

因此,本研究以东北平原及其子平原(辽河平原、松嫩平原、三江平原)为研究对象,基于2010—2018年90 m空间分辨率土体厚度数据和1 km空间分辨率0—100 cm深,10 cm为间隔的分层土壤水分数据,利用GIS技术分析2010—2018年东北平原土体厚度和土壤水分的空间变化特征,明确土体厚度、土壤水分空间变异与主要环境因素(气候、地形地貌、土壤质地)的关系,以期为东北平原土壤资源的合理利用、有效保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

东北平原由辽河平原、松嫩平原和三江平原组成,介于东经 $118^\circ40'$ — $128^\circ00'$ 、北纬 $40^\circ25'$ — $48^\circ40'$,横跨黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古部分地区(图1),总面积约35万 km^2 。辽河平原主要位于辽宁省境内,海拔较高,地势起伏较大,地势西北高、东南低;松嫩平原主要分布在黑龙江省和吉林省的中部和东部地区,整体地势以低洼平坦为主;三江平原主要分布在黑龙江省的中部和东北部,地势低洼,河流谷地和冲积平原广泛分布。东北平原气候属温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥;年均降雨量500~800 mm,年均气温 $0\sim6^\circ\text{C}$ 。高程总体呈由中部向四周辐射增大趋势,多为100~200 m;坡度呈由西向东增大、由南到北减小的分布趋势,以 $1^\circ\sim5^\circ$ 坡度为主。自然植被类型主要为草原、落叶乔木和针叶林,其中温带草原居多。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)1822号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 东北平原研究区位置和环境因子空间分布

Fig. 1 Location of the study area in the Northeast Plain and spatial distribution of environmental factors

1.2 数据来源与预处理

本研究数据源包括土体厚度、土壤水分、气候带、地貌、DEM、土壤质地等空间数据。土体厚度数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集_90 m 土壤厚度(2010—2018年)^[22-23]。土壤水分数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)基于站点观测的中国1 km 土壤湿度日尺度数据集(2000—2020)^[24],本研究取2010—2018年平均值作为该时间段土壤水分数据。气候带数据来源于地理遥感生态网(<http://www.gisrs.cn>)发布的中国气候区划分布数据。地貌数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)中国1:400万数字地貌数据集^[25]。DEM数据来源于中国科学院地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>) ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据,用于计算研究区高程和坡度。土壤质地数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018年)^[22-23]。数据集投影坐标均为WGS_1984_UTM_Zone_51N。

1.3 空间分析方法

利用GIS空间分析技术明确整个东北平原及其子平原土体厚度的空间变化特征以及0—100 cm深

土壤水分的水平和垂直变化特征。其次,运用分区统计方法分析不同环境因子下土体厚度、土壤水分的空间分布特征。

2 结果与分析

2.1 土体厚度

2.1.1 土体厚度空间分布 2010—2018年,整个东北平原土体厚度平均值为124 cm。从空间上来看,土体厚度总体呈由南到北增大、由西到东减小的趋势(图2);以>130 cm 土体厚度为主,面积比例为46.6%。就三大子平原土体厚度而言,松嫩平原(平均厚144 cm)>辽河平原(平均厚113 cm)>三江平原(平均厚103 cm)。松嫩平原以>130 cm 厚度为主,面积比例为75.8%;辽河平原和三江平原均以100~130 cm 为主,面积比例分别为37.3%和46.7%。

2.1.2 环境因子下的土体厚度空间分布特征

(1) 不同气候带土体厚度。2010—2018年,整个东北平原及辽河平原、松嫩平原,在中温带半湿润地区土体厚度最大,平均厚度分别为140 cm,119 cm和151 cm,且均以>130 cm 厚度为主,面积比例分别为70.9%,43.4%和86.4%;在中温带半干旱地区土体厚度最小,平均厚度分别为101 cm,100 cm和117 cm,且均以100~130 cm 厚度为主,面积比例分别为

44.4%, 43.7% 和 70.8%。三江平原仅有中温带湿润气候, 土体厚度均值为 103 cm, 以 100~130 cm 土体厚度为主(图3)。

(2) 不同地貌区土体厚度。2010—2018年, 辽河平原和三江平原均在冲积平原土体厚度最大, 松嫩平原在湖积平原土体厚度最大, 其平均厚度分别为 133 cm, 119 cm、和 158 cm; 其中, 辽河平原、松嫩平原均以 >130 cm 厚度为主, 面积比例分别为 70.6% 和 91.1%; 三江平原以 100~130 cm 厚度为主, 面积比例为 70.4%。辽河平原、松嫩平原和三江平原均在山地区土体厚度最小, 平均厚度分别为 99 cm, 76 cm 和 73 cm, 且均以 60~100 cm 厚度为主, 面积比例分别为 56.8%, 65.1% 和 70.3%(图4)。

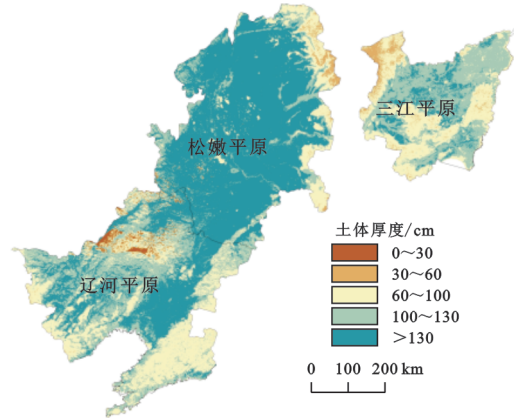


图2 2010—2018年东北平原土体厚度空间分布
Fig. 2 Spatial distributions of soil thickness in the Northeast Plain from 2010 to 2018

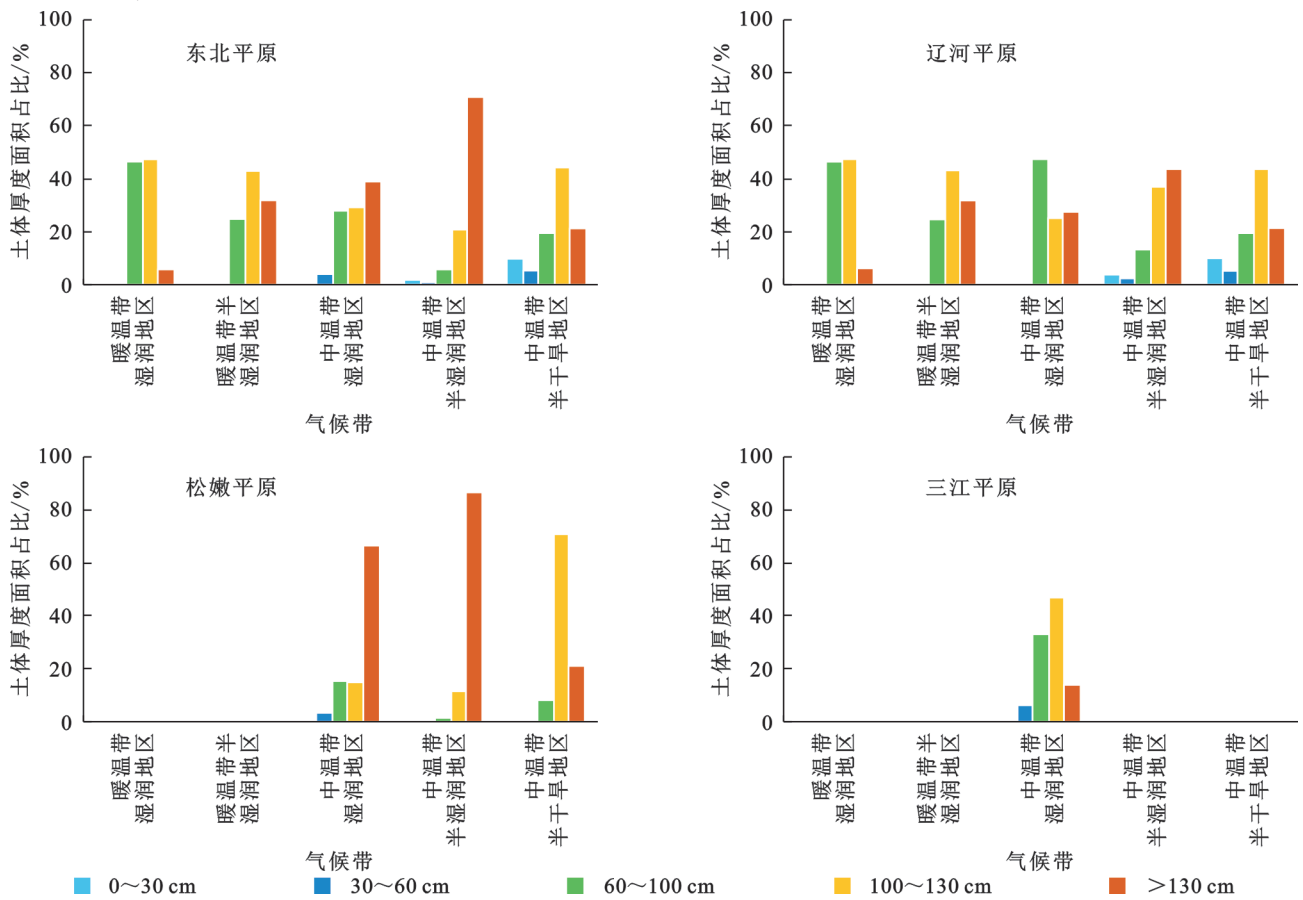


图3 2010—2018年东北平原不同气候带下土体厚度面积占比

Fig. 3 Area proportion of soil thickness under different climate zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

(3) 不同高程区土体厚度。2010—2018年, 松嫩平原、三江平原土体厚度随高程增加总体呈减小趋势, 辽河平原和整个东北平原土体厚度随高程增加总体呈减小—增大趋势(图5)。高程 300 m 以下土壤较厚, 土体厚度松嫩平原 > 辽河平原 > 三江平原。高程 300 m 以上, 松嫩平原、三江平原土体厚度迅速降低, 而辽河平原土体厚度开始增大(特别是 400~600 m 高程区间), 致使土体厚度辽河平原 > 松嫩平原 > 三江平原。辽河平原和三江平原在 <100 m 高程区土体厚度最大, 平均厚度分别为 128 cm 和 118 cm, 均以 100~130

cm 厚度为主, 面积比例分别为 51.3% 和 70.9%。松嫩平原在 100—200 m 高程区土体厚度最大(平均厚 153 cm), 以 >130 cm 厚度为主(面积比例 87.4%)。

(4) 不同坡度区土体厚度。2010—2018年, 整个东北平原和三大子平原土体厚度随坡度增大总体呈减小趋势(图6)。坡度 5° 以下(特别是 2° 以下)土壤较厚, 主要以 >130 cm 和 100~130 cm 厚度为主, 土体厚度松嫩平原 > 辽河平原 > 三江平原。坡度 5° 以上土体厚度迅速降低, 逐渐以 60~100 cm 厚度占主导, 其中松嫩平原、三江平原降幅较大; 土体厚度辽河平原 > 松嫩平原 > 三江平原。

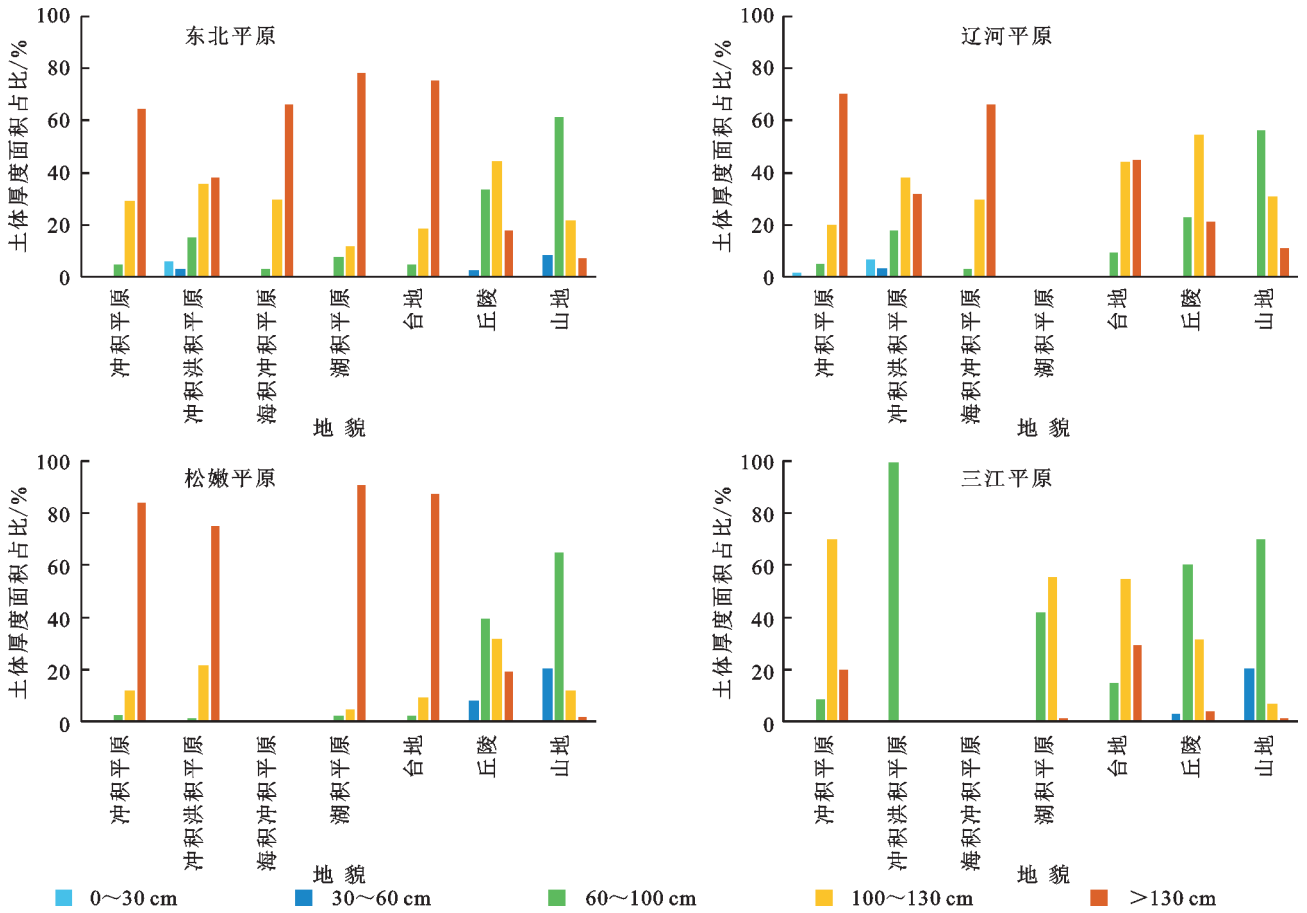


图 4 2010—2018年东北平原不同地貌区土体厚度面积占比

Fig. 4 Area proportion of soil thickness across different landform regions in the Northeast Plain from 2010 to 2018

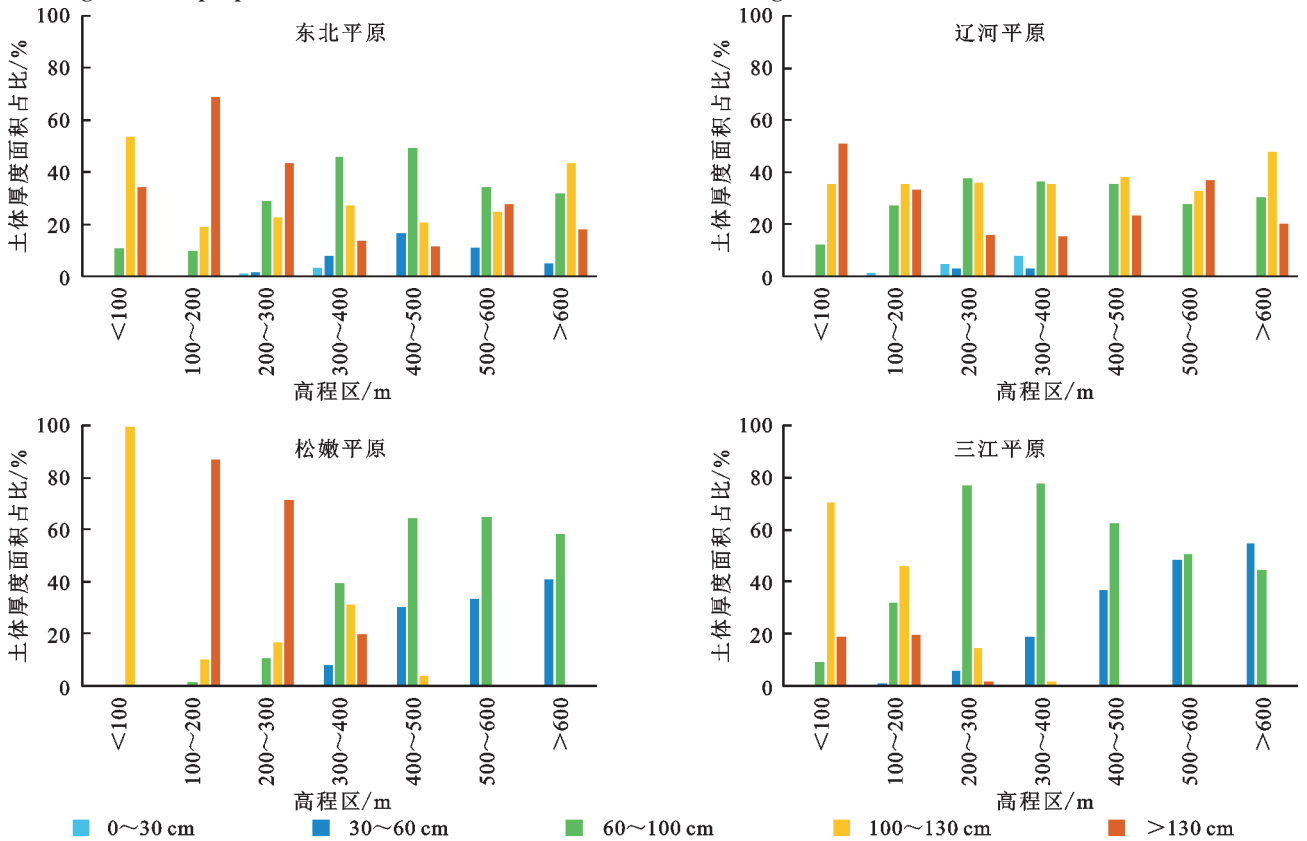


图 5 2010—2018年东北平原不同高程区土体厚度面积占比

Fig. 5 Area proportion of soil thickness across different altitude zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

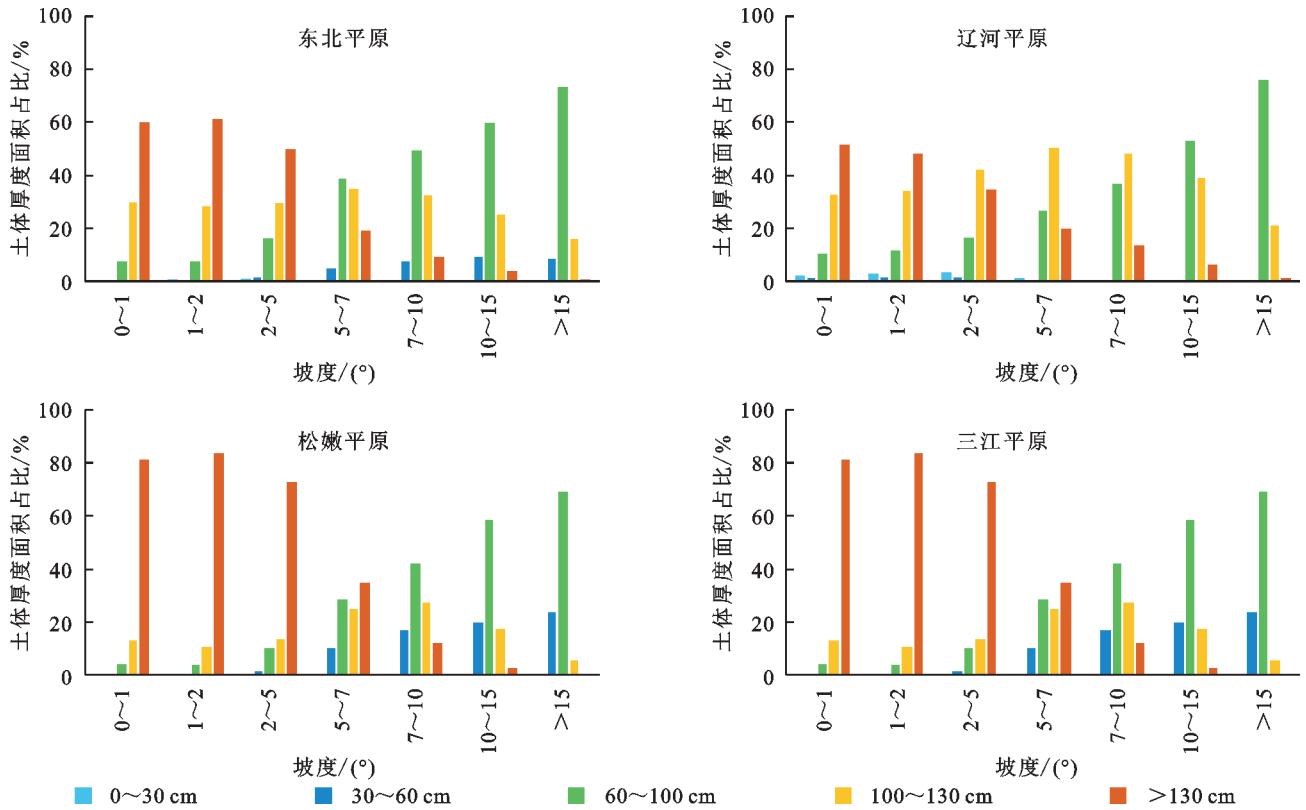


图6 2010—2018年东北平原不同坡度区土体厚度面积占比

Fig. 6 Area proportion of soil thickness across different slope zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

2.2 土壤水分

2.2.1 0—100 cm 深土壤水分空间分布 2010—2018年,东北0—100 cm深度土壤各层水分含量均值介于5.6%~39.1%,区域平均值为28.1%;空间上总体呈由南到北增大、由西到东减小的水平分布规律;整个平原土壤水分含量主要集中在20%~35%,其中20%~25%,25%~30%,30%~35%水分含量的面积比例分别为24.5%,35.0%和36.0%。就三大子平原土壤水分而言,三江平原(均值31.1%)>松嫩平原(均值29.3%)>辽河平原(均值24.9%)。三江平原土壤水分含量介于5.6%~37.9%,其中,25%~30%,30%~35%水分含量的面积比例分别为27.0%和70.6%。松嫩平原土壤水分含量介于20.0%~38.6%,其中,20%~25%,25%~30%,30%~35%水分含量的面积比例分别为14.1%,43.9%和38.4%。辽河平原土壤水分含量介于17.3%~39.1%,其中,20%~25%,25%~30%,30%~35%水分含量的面积比例分别为50.3%,29.2%和13.7%。

从10个垂直分层的土壤水分含量来看,表层0—20 cm水分含量较高,20—60 cm水分含量降低且趋于稳定(图7);在60 cm以下深度,70—80 cm,90—100 cm水分含量稳定,但60—70 cm,80—90 cm水分含量增加,接近或超过表层0—20 cm水分含量。土体厚度<60 cm时,土壤水分随深度增大呈减小趋势;而土体厚度>60 cm时,土壤水分随深度增大呈

先减小再增大趋势。三江平原各层土壤水分含量均以30%~35%和25%~30%为主。松嫩平原0—10 cm,10—20 cm,60—70 cm和80—90 cm土层水分含量以30%~35%和25%~30%为主,其他深度层水分含量则以25%~30%和30%~35%含量为主。辽河平原60—70 cm水分含量以30%~35%和25%~30%为主,其他深度层土壤水分含量则以20%~25%和25%~30%为主。

2.2.2 环境因子下的土壤水分空间分布特征

(1)不同气候带土壤水分。2010—2018年,无论暖温带还是中温带,东北平原及其子平原的土壤水分从湿润区、半湿润区到半干旱区不断降低。东北平原及辽河平原、松嫩平原,在中温带湿润地区土壤水分含量最大,平均含水量分别为30.4%,29.4%和30.2%,分别以30%~35%,25%~30%和30%~35%含水量为主,面积比例分别为56.4%,50.6%和48.6%;在中温带半干旱地区土壤水分含量最小,平均含水量分别为20.6%,20.6%和23.1%,均以20%~25%含水量为主,面积比例分别为66.1%,65.4%和99.1%。三江平原中温带湿润气候区,土壤水分均值为31.1%;以30%~35%土壤水分为主,面积比例占70.5%(图8)。

(2)不同高程区土壤水分。2010—2018年,整个东北平原和辽河平原土壤水分随高程增加总体呈缓慢减小—增大—减小趋势,松嫩平原和三江平原土壤

水分随高程增加总体呈缓慢增大趋势(图9)。高程300 m以下地区,土壤水分三江平原>松嫩平原>辽河平原;辽河平原土壤水分以20%~25%和25%~30%为主,松嫩平原和三江平原土壤水分分别以25%~30%和30%~35%为主。高程300 m以上地区,土壤水分松嫩平原>三江平原>辽河平原;辽河平原土壤水分以20%~25%为主,松嫩平原和三江平原土壤水分均以30%~35%为主。辽河平原和东北平原在<100 m高程区土壤水分含量最大,平均含水量分别为26.3%和28.9%;二者分别在500~600 m、>600 m高程区土壤水分含量最小,平均含水量分别为22.8%和23.9%。松嫩平原和三江平原均在>600 m高程区土壤水分含量最大,平均含水量分别为

33.0%和32.0%;二者均在100~200 m高程区土壤水分含量最小,平均含水量分别为28.5%和30.6%。

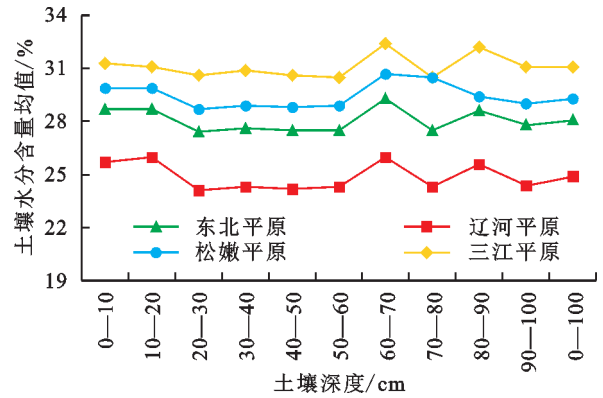


图7 2010—2018年土壤水分含量均值随土层深度变化
Fig. 7 Variation in the mean soil moisture content with soil depth from 2010 to 2018

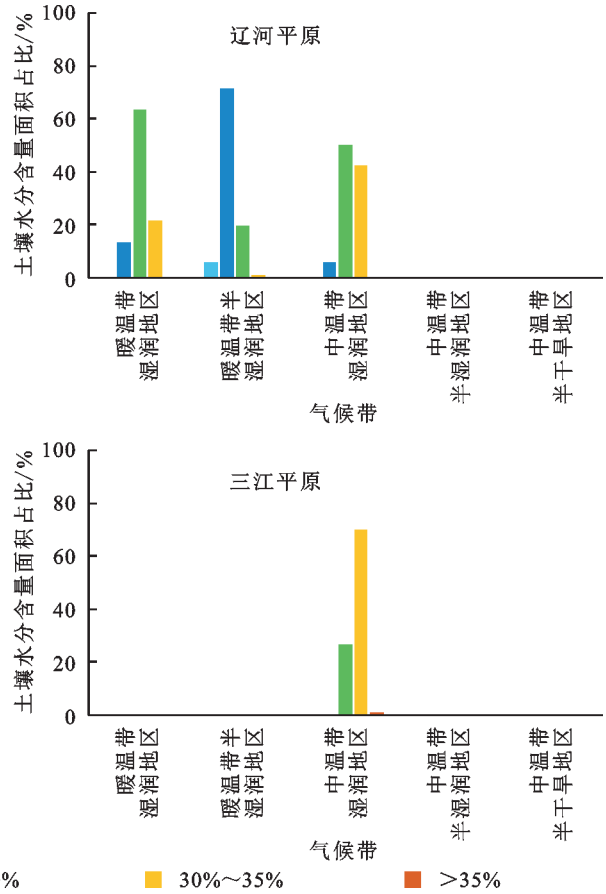
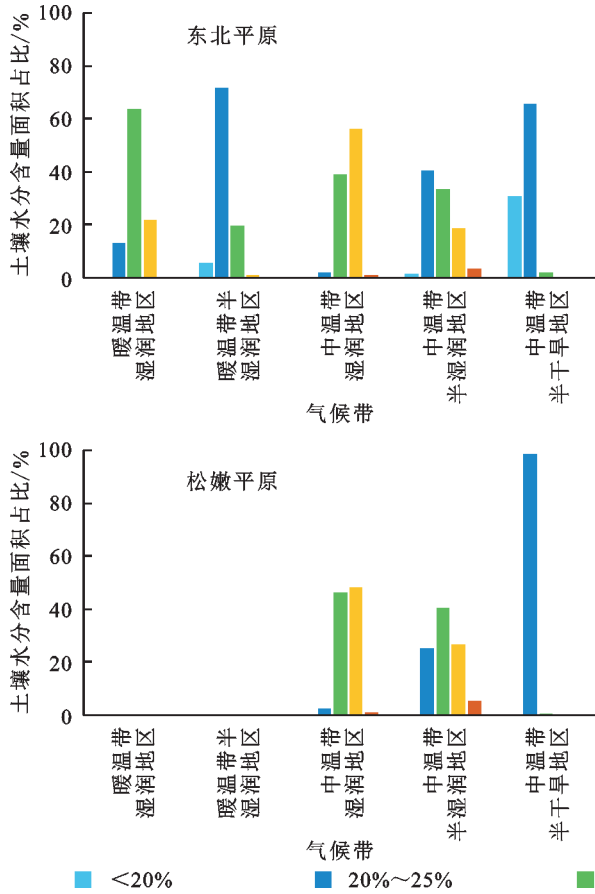


图8 2010—2018年东北平原不同气候带土壤水分含量面积占比

Fig. 8 Area proportion of soil moisture content across different climate zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

(3) 不同坡度区土壤水分。2010—2018年,辽河平原和松嫩平原土壤水分随坡度增大总体呈缓慢增大趋势,而三江平原和整个东北平原土壤水分随坡度增大变化不大,较稳定(图10)。坡度7°以下,土壤水分三江平原>松嫩平原>辽河平原;坡度7°以上,松嫩平原>三江平原>辽河平原。辽河平原和松嫩平原土壤水分在>15°坡度区土壤水分含量最大,平均含水量分别为27.4%和32.3%,以30%~35%含水量为主,

面积比例分别为36.9%和89.1%;二者分别在2°~5°, 0°~1°坡度区土壤水分含量最小,平均含水量分别为24.1%和28.9%,分别以20%~25%和25%~30%含量为主,面积比例分别为56.6%和46.4%。

(4) 不同土壤质地的水分含量。随着土壤质地黏粒含量增加,2010—2018年,整个东北平原和辽河平原土壤水分总体呈增大趋势,而松嫩平原、三江平原土壤水分呈缓慢波动趋势。东北平原和三江平原

的砂黏土、辽河和松嫩平原的粘壤水分含量最大,其平均含水量分别为31.8%,31.8%,27.4%和30.6%,分别以30%~35%,30%~35%,25%~30%和30%~35%含水量为主,面积比例分别为78.7%,79.9%,66.0%和58.0%。东北平原及辽河平原的砂土、松嫩

平原的砂壤、三江平原的粉壤的水分含量最小,其平均含水量分别为22.2%,21.5%,27.8%和29.9%;前三者以20%~25%含水量为主,而三江平原以25%~30%含水量为主,面积比例分别为74.8%,81.1%,35.6%和57.0%(图11)。

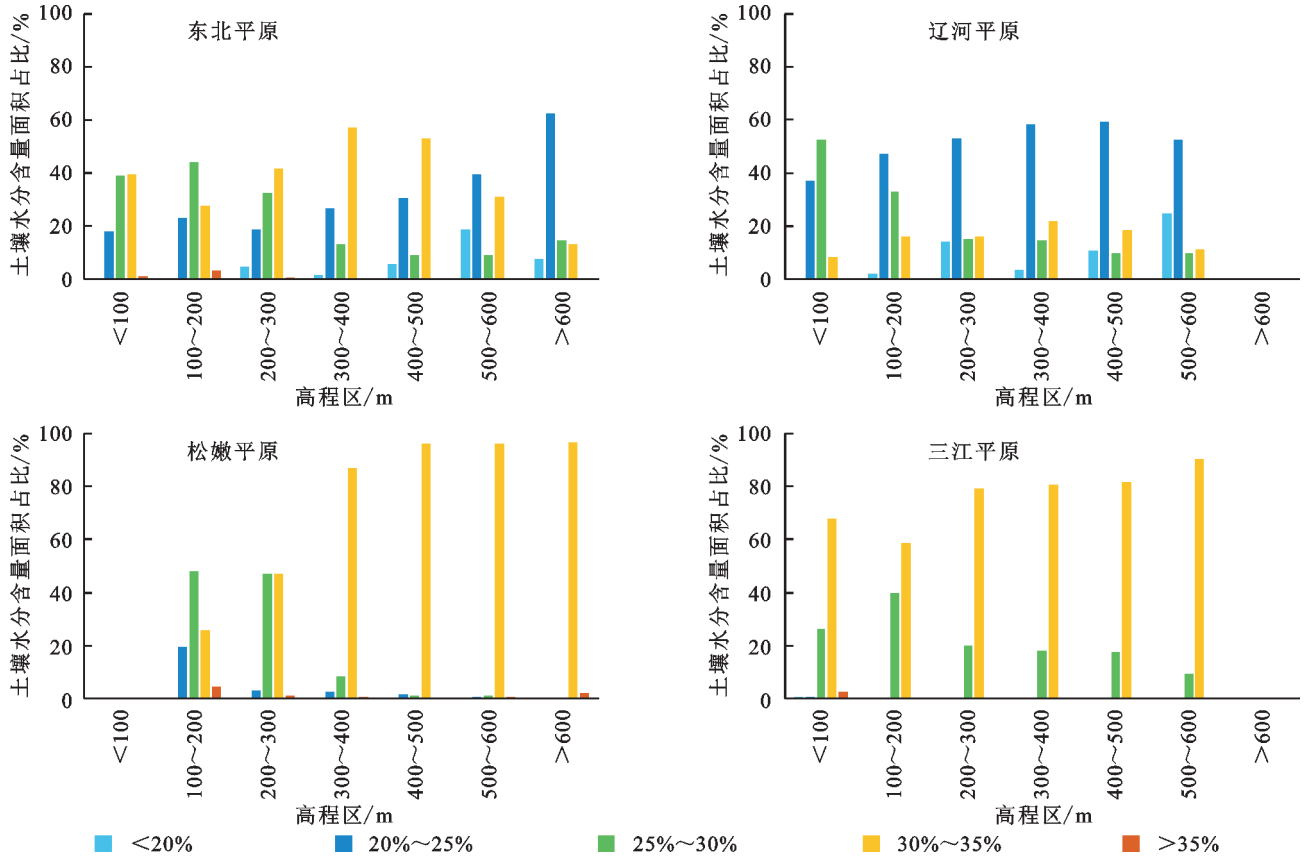


图9 2010—2018年东北平原不同高程区土壤水分含量面积占比

Fig. 9 Area proportion of soil moisture content across different altitude zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

3 讨论

研究整个东北平原土体厚度、水分空间变异特征及其与主要环境因素的关系,可为黑土资源合理利用与有效保护提供重要理论参考。本研究发现,东北平原土体厚度松嫩平原>辽河平原>三江平原,这与刘凯等^[26]的研究结果一致。东北平原及其3个子平原在中温带半湿润地区土体最厚,主要由于这些区域的气候和植被条件有利于土壤的形成和积累。在冲积平原和湖积平原区,由于地势较平坦,流水搬运的物质在这里大量沉积,因而这些区域土体厚度较大。土体厚度与高程、坡度总体呈负相关,这与刘若轩等^[27]的研究结果一致。海拔越高,气候条件较严酷,土壤形成过程缓慢,加之因排水较快易导致土壤侵蚀,因而土层较薄;坡度越平缓,越有利于土壤的沉积和积累,因而土体厚度较大。辽河平原在高程400~600 m出现土壤增厚的现象,主要原因在于平原西部和东部海拔较高,>400 m海拔区占本研究辽河平原的22.3%。

在0—100 cm深土层中,土壤水分三江平原>松嫩平原>辽河平原。土壤表层0—20 cm水分含量较高;当土体厚度<60 cm时,土壤水分随深度增大呈减小趋势;而土体厚度>60 cm时,土壤水分随深度增大呈先减小再增大趋势,这与刘苏峡^[28]、乔江波^[29]等的研究结果基本一致。0—20 cm土壤表层是降水和灌溉等补给的最敏感区,因此水分含量较高。水分在下渗过程中不断被下层土壤及植物根系所吸收和利用,故土体厚度<60 cm时水分含量随深度增加而减少。但在更深土层,由于土壤质地变化、下渗水分的前期积累以及毛管上升水的影响,使得水分含量有所增加,故土体厚度>60 cm时水分随深度增大呈先减小再增大趋势。三大平原土壤水分在中温带湿润地区含量最大,这些区域降水量充足且蒸发量较低,加之植被茂密,枯枝落叶和植物根系涵养水源作用显著,故土壤水分含量较高。受到区域地形特征变化的影响,三大子平原土壤水分随地形变化出现区域差异。辽河平原土壤水分随高程增加呈缓慢

减小—增大—减小趋势,而松嫩平原和三江平原土壤水分随高程增加总体呈缓慢增大趋势。辽河平原和松嫩平原土壤水分随坡度增大总体呈缓慢增大趋

势,而三江平原土壤水分随坡度变化较稳定。砂黏土、黏壤等因黏粒含量高、土壤孔隙小,土壤持水、存水能力强,故水分含量高。

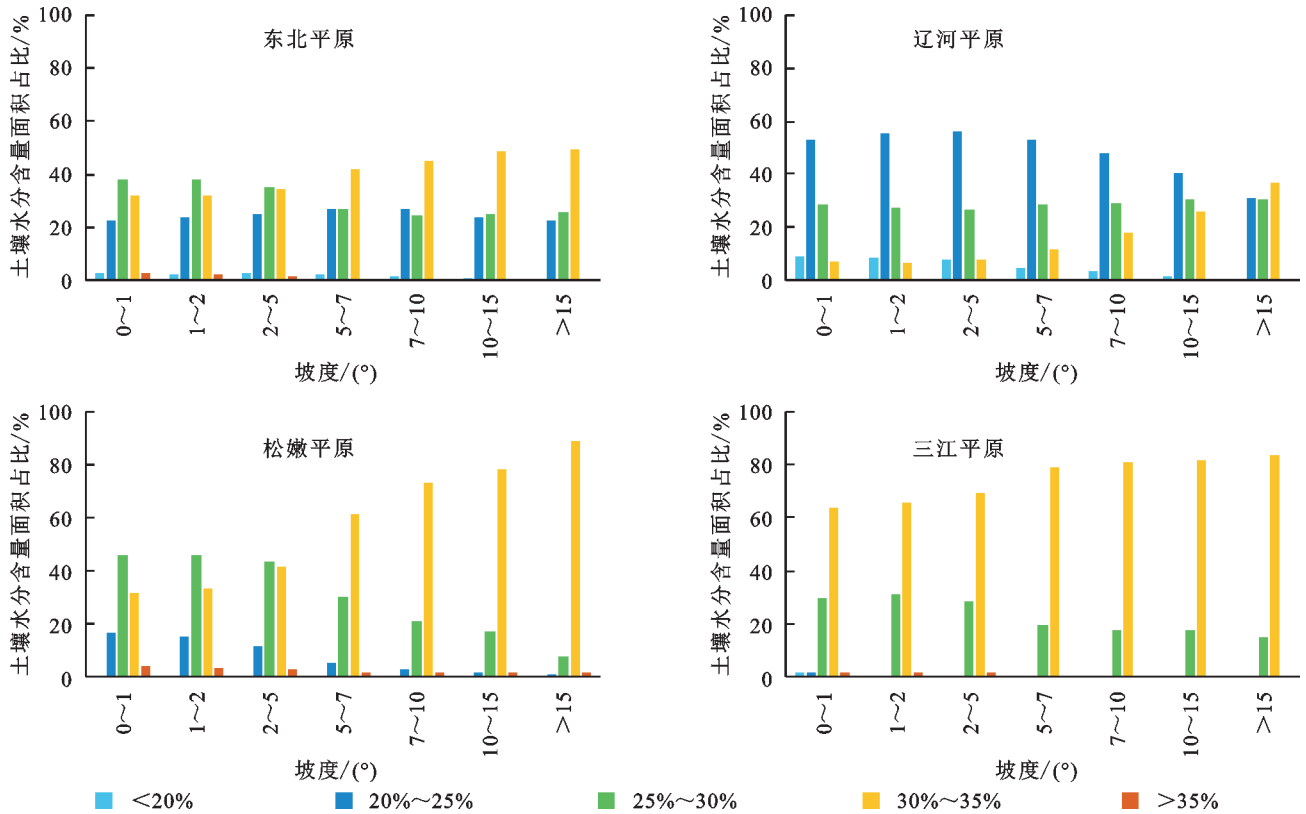


图 10 2010—2018 年东北平原不同坡度区土壤水分含量面积占比

Fig. 10 Area proportion of soil moisture content across different slope zones in the Northeast Plain from 2010 to 2018

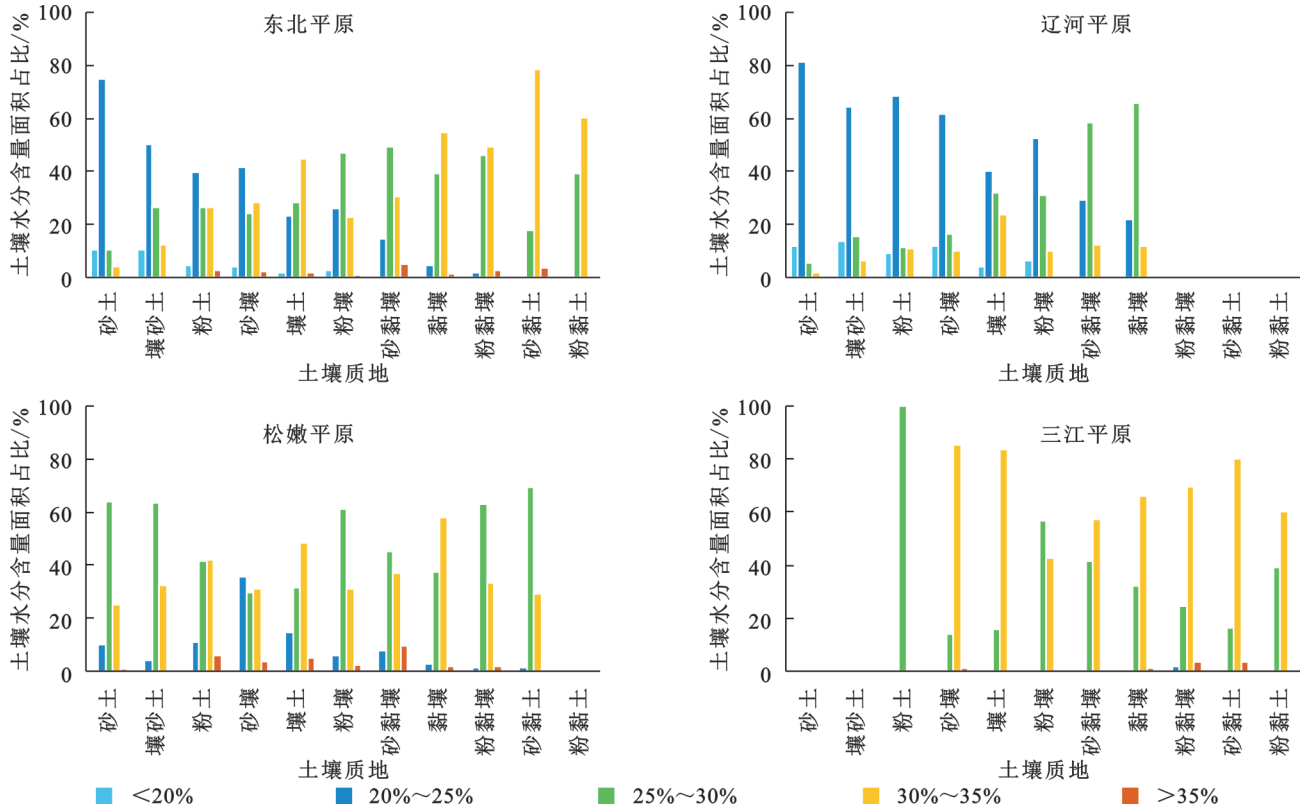


图 11 2010—2018 年东北平原不同土壤质地的土壤水分含量面积占比

Fig. 11 Area proportion of soil moisture content across different soil textures in the Northeast Plain from 2010 to 2018

本研究也存在以下不足:土体厚度和土壤水分含量是多种自然和人为因素综合作用的结果,本研究主要考虑主要自然因素对其空间分异的影响,后续将深入开展多因素对土体厚度、水分时空变化的影响研究。

4 结论

(1) 东北平原土体厚度呈由南向北增大、由西向东减小的空间分布特征,其中松嫩平原>辽河平原>三江平原。松嫩平原以>130 cm厚度为主,辽河、三江平原以100~130 cm厚度为主。在东北平原的0—100 cm土层中,从水平方向来看,东北平原土壤水分含量总体上从西南向东北递增;三江平原>松嫩平原>辽河平原。从垂直方向来看,表层0—20 cm水分含量较高;当土体厚度<60 cm时,土壤水分随深度增大呈减小趋势;而土体厚度>60 cm时,土壤水分随深度增大呈先减小再增大趋势。

(2) 东北平原及其3个子平原在中温带半湿润地区土体最厚,而中温带半干旱地区土体最薄。辽河平原、三江平原在冲积平原区土体厚度最大,分别以>130 cm厚度、100~130 cm厚度为主;松嫩平原在湖积平原区土体厚度最大,以>130 cm厚度为主。土体厚度与高程、坡度总体呈负相关,300 m高程以下、坡度5°以下(特别是2°以下)土壤较厚,但辽河平原在高程400~600 m出现土壤增厚的现象。

(3) 三大平原土壤水分在中温带湿润地区含量最大,而在中温带半干旱地区含量最小。辽河平原土壤水分随高程增加呈缓慢减小—增大—减小趋势,而松嫩平原和三江平原土壤水分随高程增加总体呈缓慢增大趋势。辽河平原和松嫩平原土壤水分随坡度增大总体呈缓慢增大趋势,而三江平原土壤水分随坡度变化较稳定。以高程300 m、坡度7°为界,三大子平原土壤水分的高低排序发生变化。辽河平原和松嫩平原的黏壤、三江平原的粘砂土的水分含量最大,辽河平原的砂土、松嫩平原的砂壤、三江平原的粉壤的水分含量最小。

参考文献(References):

- [1] 张甘霖,史舟,朱阿兴,等.土壤时空变化研究的进展与未来[J].土壤学报,2020,57(5):1060-1070.
Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1060-1070.
- [2] Gu Z J, Xie Y, Gao Y, et al. Quantitative assessment of soil productivity and predicted impacts of water erosion in the black soil region of Northeastern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 637-638, 706-716.
- [3] 尹映华,彭晓宗,翟丽梅,等.东北黑土水稻主产区氮肥减施潜力研究[J].地理学报,2022,77(7):1650-1661.
Yin Y H, Peng X Z, Zhai L M, et al. Nitrogen fertilizer reduction potential in the main rice producing region of black soil in Northeast China [J]. Acta Geographica Sinica, 2022, 77(7): 1650-1661.
- [4] Wang H, Yang S L, Wang Y D, et al. Rates and causes of black soil erosion in Northeast China [J]. Catena, 2022, 214: 106250.
- [5] 韩晓增,李娜.中国东北黑土地研究进展与展望[J].地理科学,2018,38(7):1032-1041.
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(7): 1032-1041.
- [6] 冯喆,马理辉,王志昊.山地枣树在不同土层厚度下的土壤水分状况变化[J].西北林学院学报,2024,39(1):140-146.
Feng Z, Ma L H, Wang Z H. Variation of soil moisture of jujube trees under different soil thickness in hilly region of Loess Plateau [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(1): 140-146.
- [7] 陈发虎,傅伯杰,夏军,等.近70年来中国自然地理与生存环境基础研究的重要进展与展望[J].中国科学:地球科学,2019,49:1659-1696.
Chen F F, Fu B J, Xia J, et al. Major advances in studies of the physical geography and living environment of China during the past 70 years and future prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62: 1665-1701.
- [8] 许文旭,杨献坤,崔斌,等.东北黑土区典型坡耕地土层厚度及退化程度分析[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(3):28-36.
Xu W X, Yang X K, Cui B, et al. Analysis of the soil thickness and the degradation degree of the typical slope farmland in the black soil region of Northeast China [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(3): 28-36.
- [9] 刘畅,刘勤,张琼,等.利用探地雷达测定东北黑土层厚度在坡面的空间变化[J].土壤学报,2024,61(4):952-963.
Liu C, Liu Q, Zhang Q, et al. Spatial variation of black soil thickness on slope measured by using ground penetrating radar in Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 952-963.
- [10] 邹文秀,陆欣春,陈旭,等.东北黑土区农田土壤水分剖面分布与大气降水关系的研究[J].土壤通报,2019,50(2):267-273.
Zou W X, Lu X C, Chen X, et al. Relationship between distribution of soil water contents within soil profiles and precipitation in farmland of black soil region of Northeast China [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(2): 267-273.
- [11] 靖亭亭,胡海棠,邱春霞,等.东北黑土漫岗区春耕期土壤水分空间变异及地形影响[J].水土保持研究,2022,29(1):58-65.
Jing T T, Hu H T, Qiu C X, et al. Spatial variability and its controlling topographic factors of soil moisture

- during spring plowing season in black soil hilly region of Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(1):58-65.
- [12] Huang X F, Zhang Z M, Zhou Y C, et al. Spatial heterogeneity of soil thickness and factors controlling it in a karst basin [J]. *Eurasian Soil Science*, 2021, 54 (4) : 478-486.
- [13] Shan Y L, Xie J C, Lei N. Spatial distribution characteristics of soil moisture in different slopes on Loess Gully Region [J]. *Agronomy Journal*, 2023, 115 (2) : 997-1005.
- [14] 王磊, 高阳, 沈振. 气候变化背景下农田土壤碳储量评估方法研究进展[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(16):1-11.
Wang L, Gao Y, Shen Z. Research progress on the assessment methods for agricultural soil carbon storage under climate change [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(16):1-11.
- [15] 杨阳, 马绎皓, 赵鸿, 等. 甘肃省不同气候类型区土壤水分特性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5):213-220, 226.
Yang Y, Ma Y H, Zhao H, et al. Soil moisture properties of different climate types in Gansu Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5) : 213-220, 226.
- [16] 陈玉蓝, 梁太波, 张艳玲, 等. 基于特征集成学习的四川省土壤厚度预测[J]. *土壤*, 2023, 55(4):894-902.
Chen Y L, Liang T B, Zhang Y L, et al. Spatial prediction of soil thicknesses in Sichuan Province based on feature-ensemble learning[J]. *Soils*, 2023, 55(4):894-902.
- [17] 邓大鹏, 刘琦, 卢耀如, 等. 贵州贞丰—关岭花江喀斯特石漠化地区土壤厚度的空间分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(1):197-206.
Deng D P, Liu Q, Lu Y R, et al. Spatial distribution characteristics of soil thickness in the Zhenfeng-Guanling-Huajiang karst rocky desertification area in Guizhou Province [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1):197-206.
- [18] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, et al. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: a multi-year study in the loess hilly region in China[J]. *Ecohydrology*, 2020, 13(3): e2196.
- [19] 曾锐, 张陶, 蒲俊兵, 等. 岩溶断陷盆地不同地貌部位土壤水时空分布规律及其影响因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1):50-57.
Zeng R, Zhang T, Pu J B, et al. Spatiotemporal dynamics of soil water and its influencing factors along transect of landform in karst graben basin, southwestern China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(1):50-57.
- [20] 张光辉, 杨扬, 刘琪娜, 等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2):1-12.
Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, et al. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):1-12.
- [21] 郭欣欣, 付强, 卢贺, 等. 东北黑土区农林混合利用坡面土壤水分空间异质性及主控因素[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(19):123-130.
Guo X X, Fu Q, Lu H, et al. Spatial variability and its controlling factors of soil moisture on cropland-forestland mixed hillslope in black soil area of Northeast China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(19):123-130.
- [22] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution national soil information grids of China [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(3):328-340.
- [23] Liu F, Zhang G L, Song X D, et al. High-resolution and three-dimensional mapping of soil texture of China [J]. *Geoderma*, 2020, 361:114061.
- [24] Li Q L, Shi G S, Shangguan W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning [J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14:5267-5286.
- [25] 程维明, 周成虎. 中国 1:400 万数字地貌数据集 [DS]. 国家青藏高原数据中心, 2014.
Cheng W M, Zhou C H. Geomorphological of China 1:4 000 000 [DS]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center, 2014.
- [26] 刘凯, 魏明辉, 戴慧敏, 等. 东北黑土区黑土层厚度的时空变化[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3):434-442, 394.
Liu K, Wei M H, Dai H M, et al. Spatiotemporal variation of black soil layer thickness in black soil region of Northeast China [J]. *Geology and Resources*, 2022, 31 (3):434-442, 394.
- [27] 刘若轩, 王志强, 谭玉萍. 东北典型黑土区小流域黑土层厚度及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4):346-353, 361.
Liu R X, Wang Z Q, Tan Y P. The thickness of black soil layer and its influencing factors in a small watershed of typical black soil region in Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4):346-353, 361.
- [28] 刘苏峡, 邢博, 袁国富, 等. 中国根层与表层土壤水分关系分析[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(1):1-17.
Liu S X, Xing B, Yuan G F, et al. Relationship analysis between soil moisture in root zone and top-most layer in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(1):1-17.
- [29] 乔江波, 朱元骏, 贾小旭, 等. 黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J]. *水科学进展*, 2017, 28(4):515-522.
Qiao J B, Zhu Y J, Jia X X, et al. Spatial variability of soil water for the entire profile in the critical zone of the Loess Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28 (4):515-522.