DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.002 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.002
邹思诗,郭小平,李锦荣,等."三北"工程区近25年土地利用变化对土壤有机碳储量的影响[J].水土保持研究,2026,33(6):160-167.
Zou Sishi, Guo Xiaoping, Li Jinrong, et al. Impact of land use change on soil organic carbon stocks in Three-North Shelterbelt Program region over past 25 years[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):160-167.

"三北"工程区近25年土地利用变化对土壤有机碳储量的影响

邹思诗[1],郭小平[1],李锦荣[2,3],廖梓龙[2,3],潘嘉琛[1],申泽鑫[1],王昀凯[1]
(1.北京林业大学 水土保持学院,北京 100083;2.水利部 牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020;
3.黄河几字弯区域生态环境变化与综合治理内蒙古自治区野外科学观测研究站,呼和浩特 010020)

摘 要:[**目的**]厘清"三北"工程区土地利用/覆盖变化对土壤有机碳储量的影响,为本区固碳潜力研究和优化土地管理策略提供理论依据。[**方法**]基于1995—2020年数据,采用空间分析、分区统计及最小二乘线性回归法,分析了土壤有机碳储量的时空变异特性。[**结果**](1)研究期内林地、水体面积增加,耕地、草地及湿地面积减少。(2)林草地分布上呈现向高干旱程度区域偏移:新增草地向高干旱程度区聚集(半干旱区占56.06%,干旱区占26.06%);新增林地集中于半干旱区(34.81%)及干燥亚湿润区(34.51%),林地转出集中在湿润区(68.30%)。(3)全区土壤有机碳总储量呈整体增长趋势,草地(270.41 Tg C)与林地(181.20 Tg C)是增汇核心;但受农业开垦驱动,林地、草地及湿地等生态用地的逆向开垦造成共计52.2 Tg C的储量减少。[**结论**]"三北"工程区土壤有机碳储量动态变化受土地利用变化的驱动,并受到区域干旱程度的调节。未来应持续深化三北防护林体系建设,遵循"以水定绿"原则,在提升固碳能力的同时强化北方生态安全屏障。

关键词:土地利用变化;土壤有机碳储量;干旱程度;"三北"工程区
中图分类号:F301.24;X171.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0160-08

Impact of land use change on soil organic carbon stocks in Three-North Shelterbelt Program region over past 25 years

Zou Sishi[1], Guo Xiaoping[1], Li Jinrong[2,3], Liao Zilong[2,3], Pan Jiachen[1], Shen Zexin[1], Wang Yunkai[1]
(1.*School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*; 2.*Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot* 010020, *China*; 3.*Yellow River Great Bend Region Eco-environmental Change and Integrated Management Field Observation and Research Station of Inner Mongolia, Hohhot* 010020, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to clarify the impact of land use and land cover change (LUCC) on soil organic carbon (SOC) stocks in the Three-North Shelterbelt Program (TNSP) region, providing a theoretical basis for evaluating regional carbon sequestration potential and optimizing land management strategies. [**Methods**] Based on data from 1995 to 2020, this study integrated spatial analysis, zonal statistics, and ordinary least squares (OLS) linear regression to analyze the spatiotemporal variation characteristics of SOC stocks. [**Results**] (1) During the study period, the areas of forestland and water bodies increased, while cropland, grassland, and wetland contracted. (2) The distribution of forestland and grassland exhibited a distinct spatial shift toward regions with higher aridity levels. Specifically, newly added grasslands were concentrated in semi-arid (56.06%) and arid (26.06%) areas. Newly added forestlands were primarily located in semi-arid (34.81%) and dry sub-humid (34.51%) areas, whereas forestland loss was notably concentrated in humid areas (68.30%). (3) Total SOC

收稿日期:2026-01-21 **修回日期:**2026-02-21 **接受日期:**2026-03-09
资助项目:内蒙古自治区科技重大专项(揭榜挂帅项目)课题"乌兰布和沙漠水循环过程及水土资源承载力研究"(2024JBGS0013-01)
第一作者:邹思诗(2001—),女(苗族),云南楚雄人,硕士研究生,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:m15368863018@163.com
通信作者:郭小平(1962—),男,北京人,博士,教授,主要从事工程绿化研究。E-mail:guoxp@bjfu.com

stocks in the region showed an overall increasing trend, with grassland (270.41 Tg C) and forestland (181.20 Tg C) serving as the primary contributors to carbon sequestration. However, driven by agricultural expansion, the reverse conversion of ecological lands (forestland, grassland, and wetland) resulted in a cumulative SOC loss of 52.2 Tg C. [**Conclusion**] The dynamics of SOC stocks in the TNSP region are driven by land use change and regulated by the regional aridity level. Future efforts should continue to advance the construction of the TNSP and strictly adhere to the principle of "water-determined greening", while strengthening the ecological safety barrier in northern China.
Keywords: land use change; soil organic carbon stocks; aridity level; Three-North Shelterbelt Program region

土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库[1],全球土壤有机碳库总量约为生物碳库的3倍、大气碳库的2倍[2],其储量规模直接决定了土壤在全球碳循环中的核心地位。作为连接大气碳库与生物碳库的关键纽带,土壤通过碳输入(植被凋落物、根系分泌物)与碳输出(微生物分解、土壤侵蚀)的动态平衡调控全球碳循环的速率与方向,对缓解气候变化具有不可替代的作用。土地利用/覆被变化是人类活动改造土壤最直接、最剧烈的方式[3]。在全球气候变化背景下,诸多地区干旱频率增加、强度增强,进一步加速土地退化与沙漠化进程。研究表明,干旱程度与土地覆被类型的交互作用对土壤碳库稳定性存在显著相关性,构成额外威胁[4]。因此,基于遥感技术分析土地利用类型及干旱程度变化对土壤有机碳的交互作用,对全球碳循环研究和确保生态安全具有重要意义。

现有研究已广泛探讨了土地利用变化与土壤有机碳动态之间的关系。不同土地利用方式下的土壤有机碳储量差异显著,大规模土地利用变化显著驱动了土壤有机碳储量的演变[5]。天然林地或草地转为耕地会因植被破坏减少碳输入、机械耕作加速有机质分解,导致有机碳储量下降[6];而耕地退耕为林地或草地则通过植被恢复提升碳输入、降低人为干扰,促进有机碳积累[7]。目前学界普遍认为,土壤有机碳的影响机制具有复杂性,除土地利用外,其还受到环境变化(如气候、地形)的驱动[8]。在气候干旱化的背景下,植被的生长受到抑制,导致植物碳输入减少,进而引起土壤有机碳的减少。Li等[9]采用干旱指数(AI为降水量与潜在蒸散发量之比)量化干旱程度并分析干旱影响。Ren等[10]针对中国干旱区的研究进一步指出,干旱通过多路径对土壤有机碳稳定性构成威胁:在半干旱至半湿润偏干区域,干旱抑制植被碳输入并加速微生物分解及风蚀,致使SOC显著下降;而在极端干旱区,无机碳的累积可部分补偿土壤有机碳的损失。Wen等[11]研究表明,干旱程度会影响不同土地利用类型的固碳特征:湿润区林地固碳优势显著,但随干旱加剧其SOC快速下降;草地在半干旱和干旱区凭借密集的根系比林地更能维持表层土壤有机碳;而高干旱程度会加剧风蚀和有机质矿化,限制了农田土壤有机碳的积累。因此,在分析土壤有机碳储量这一复杂变化时,不仅需要考虑土地利用变化对土壤有机碳的影响,还应充分考虑区域的干旱程度及其时空分布特征。

我国三北防护林体系建设工程以及天然林保护计划和退耕还林还草工程等关键森林可持续发展政策,引起了以“退耕还林还草”与“沙化土地人工植被重建”为核心的土地利用剧烈变迁[12],由此大规模土地利用演变引起的土壤有机碳储量动态及其空间响应特征仍有待进一步厘清。本研究以“三北”工程区为研究区域,利用遥感技术解译土地利用时空动态变化,并结合干旱指数(AI),量化不同土地利用变化类型及干旱程度下的土壤有机碳储量动态变化规律,旨在揭示不同土地利用变化及干旱程度对土壤有机碳储量的影响,以期为该区固碳潜力研究和土地管理策略优化提供理论依据。

1　材料与方法

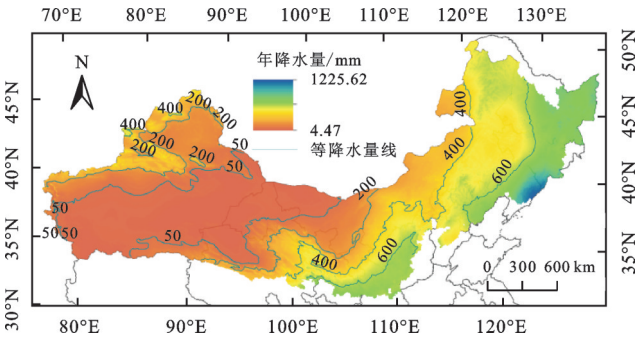
1.1　研究区概况

本研究以“三北”工程区为研究区,地理范围介于73°26′—127°50′E,33°30′—50°12′N,东西跨度超过4 400 km(图1),覆盖中国东北、华北和西北的大部分地区,总面积达435.8万km^2,占中国国土总面积的45%[13]。工程区主要位于温带大陆性气候和温带季风气候带,其中青藏高原东北部边缘、北部及西部高山地区则属高原高寒气候。年均降水量空间分异显著,从东北湿润地区的600 mm以上到西北极端干旱地区的不足50 mm,整体呈现“从南向北,从东向西逐渐递减”的分布格局,年平均气温范围为−10～14 ℃。区域地形复杂多样,涵盖平原、高原、山地及盆地等主要地貌类型,整体地势呈“西高东低”分布,海拔跨度大,介于−170～7 623 m[14]。

1.2　数据来源与处理

土地利用数据采用武汉大学杨杰和黄昕教授团队开发的中国年度土地覆盖数据集(China Land Cover Dataset, CLCD)[15]。该数据集基于335 709幅Landsat影像,结合随机森林分类器与时空滤波技术

构建而成，空间分辨率为30 m。数据集涵盖1985—2024年9类一级地表覆盖类型，总体准确率达80%，具备良好的时空一致性。



注：基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2024)0650号的标准地图制作，底图未做修改。

图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

土壤有机碳密度数据来源于Dong等[16]提供的1995—2020年中国1 km分辨率土壤有机碳密度数据集(0—100 cm土层)。该数据融合了Landsat影像、地形、气象及实测样点等多源数据，采用气候区划模型与随机森林算法估算获得。经与HWSD，SoilGrids 250 m及GSOCmap等全球主流产品对比，该数据集显示出较高的一致性与可靠性。

气候数据包括1995—2020年中国1 km逐月降水量及逐月潜在蒸散发(PET)数据集，均获取自国家青藏高原科学数据中心(https://www.tpdc.ac.cn)。其中降水量数据集由Peng等[17]基于CRU 0.5°数据与WorldClim高分辨率数据，通过Delta空间降尺度方案生成；潜在蒸散发数据集则由彭守璋等[18]基于月均、最高及最低气温数据，采用Hargreaves潜在蒸散发公式计算所得。

为统一数据时空一致性，本研究将所有空间数据的分辨率统一为1 km，并以1995—2020年为研究周期，按每5 a为一个时间段进行划分，共分为1995—2000年、2000—2005年、2005—2010年、2010—2015年及2015—2020年5个时期，以分析土壤有机碳的时空动态特征。

1.3 研究方法

基于ArcGIS 10.8软件对原始土地利用数据进行重分类，将研究区地类归纳为6大类；利用土地利用转移矩阵，定量评估1995—2020年“三北”工程区的土地利用演变特征。核算全时期及5个子时期的干旱指数，并据此构建5级干旱程度体系。采用最小二乘线性回归法，计算“三北”工程区整个时期及各子时期的1 km像元大小的逐像元土壤有机碳储量和土壤有机碳密度变化率(斜率)。最后通过分区统计系统分析土地利用变化和干旱程度对土壤有机碳时空分异特征及演变规律的影响。

1.3.1 *土地利用转移矩阵* 土地利用转移矩阵通过建立二维矩阵，定量描述研究期内不同土地利用类型之间转换的方向与规模。公式如下：

$$\boldsymbol{S}_{ij}=\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{S}_{ij}$为研究期初第i类土地利用类型转化为期末第j类土地利用类型的面积；n为地类总数；$i,j=1,2,\cdots,n$分别为转移前后的土地利用类型序号。

1.3.2 *干旱指数计算与等级划分* 本研究计算了1995—2020年全时期及5个子时期(5年间隔)的年均降水量与潜在蒸散发量。干旱指数(AI)定义为年降水量(P)与潜在蒸散发量(PET)之比。参照联合国环境规划署(United Nations Environment Programme，UNEP)标准及相关研究[19]，将研究区划分为5个干旱等级：极端干旱(AI<0.03)、干旱(0.03≤AI<0.2)、半干旱(0.2≤AI<0.5)、干燥亚湿润(0.5≤AI<0.65)及湿润(AI≥0.65)。

1.3.3 *土壤有机碳储量核算* 基于研究区0—100 cm土层的土壤有机碳密度数据，对研究区进行逐像元土壤有机碳储量计算。土层深度为100 cm，土壤有机碳储量等于土壤有机碳密度与对应面积相乘。计算公式如下[20]：

$$\mathrm{SOCR}_i=\mathrm{SOCD}_i\times A \tag{2}$$

式中：SOCR_i为第i个像元土壤有机碳储量(kg，后续根据结果换算为Tg或Pg)；SOCD_i为对应的土壤有机碳密度(kg/m^2)；A为用地类型的面积(m^2)。

1.3.4 *土壤有机碳趋势分析* 利用最小二乘线性回归法计算逐像元的土壤有机碳密度随时间演变的趋势，斜率(S)表示土壤有机碳密度的年际变化率[21]。计算公式如下：

$$S=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}(i\times\mathrm{SOCD}_i)-\sum_{i=1}^{n}i\times\sum_{i=1}^{n}\mathrm{SOCD}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{3}$$

式中：n为研究时段数(全时期分析时$n=25$，分段分析时$n=5$)；i为年份或时期序号；SOCD_i为第i个时期的土壤有机碳密度。当$S>0$时，表示土壤有机碳储量在该时段内呈现增加趋势；当$S<0$时，表示呈现减少趋势；当$S=0$时，则表示无明显增减。

2 结果与分析

2.1 “三北”工程区土地利用变化特征及与干旱程度的关系

1995—2020年“三北”工程区土地利用格局发生

了显著变迁(图 2),从整体趋势看,林地与水体面积扩大,而耕地、草地、湿地及其他用地面积均有所收缩。在此过程中,草地处于土地利用转化的核心地位,既是主要的转出源,也是最主要的转入目标。林地面积由 501 249 km²增加至 524 676 km²,增幅为 4.67%(表 1)。其中,“退耕还林”等生态修复措施成效显著,研究期内共有 15 145 km²的耕地转化为林地,成为林地面积扩张的重要来源。水体面积在各类型中增幅最为显著,从 34 813 km²增至 39 486 km²,增长了 13.43%。湿地由 3 150 km²锐减至 1 205 km²,减幅高达 61.75%,是研究区内减少比例最大的地类。耕地面积从 759 517 km²减至 751 960 km²,下降 0.99%;草地面积由 1 381 960 km²减至 1 378 424 km²,微降 0.26%,整体规模保持相对稳定。其他用地始终是研究区内面积占比最大的地类,其面积由 1 852 387 km²降至 1 837 324 km²,下降 0.81%。

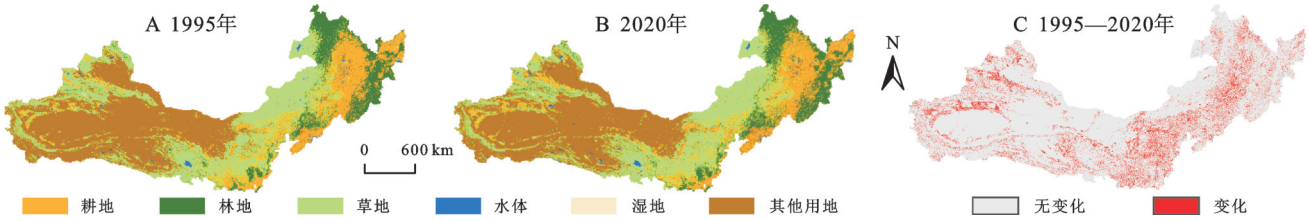


图 2　1995—2020 年土地利用变化

Fig. 2　Land use change (1995—2020)

表 1　“三北”地区 1995—2020 年土地利用转移矩阵

Table 1　Land use transition matrix in Three-North region (1995—2020)　　km²

年份	土地利用类型	2020 年						
		耕地	林地	草地	水体	湿地	其他用地	总计
1995 年	耕地	620836	15145	90237	3684	20	29595	759517
	林地	24345	473508	2566	192	0	638	501249
	草地	85267	35543	1184135	2230	220	74565	1381960
	水体	2667	263	1542	26891	0	3449	34812
	湿地	1821	152	118	67	967	25	3150
	其他用地	17023	64	99826	6422	0	1729052	1852387
	总计	751959	524675	1378424	39486	1207	1837324	4533075

通过分析 1995—2020 年“三北”工程区土地利用变化(转入或转出)在不同干旱程度下的构成特征(图 3),林地新增面积来源表现出高度集中性,主要由草地(69%)和耕地(30%)转化而来,区域分布上主要位于水分条件相对较好的区域——半干旱区(37.81%)、干燥亚湿润区(34.51%)和湿润区(27.20%)。水体转入主要来自其他用地(51%)、耕地(29%)及草地(18%),且在各干旱程度区内分布相对均衡,其中干旱区占比 36.73%,半干旱区、湿润区及干燥亚湿润区占比均在 16%~20%。耕地的转入以草地为主(65%),且在空间分布上主要集中在干旱程度较低的地区-半干旱区(59.73%)和干燥亚湿润区(21.63%)。草地转出方向较为分散,主要流向耕地(43%)、其他用地(38%)和林地(18%),空间上集中在半干旱区(43.36%)和干旱区(30.79%)。湿地转出方向高度集中于耕地(84%),且主要发生在湿润区(88.26%)。

2.2　土地利用变化与土壤有机碳储量分布

本研究定量分析了 1995—2020 年不同土地利用变化下土壤有机碳储量的动态响应(图 4),草地的转入是驱动区域碳储量增加的主要动力。其中,耕地和其他用地向草地的转移分别带动土壤有机碳储量增加 23.197,34.641 Tg C;草地向林地、水体及湿地的转化亦表现为显著的碳汇效应,增量分别为 10.223,0.633,0.534 Tg C。而耕地向林地、水体及湿地等生态用地的转换规模较小,储量增益仅介于 0.036~0.373 Tg C 之间。高碳地类的逆向转换是区域碳流失的主要原因,林地由于具备最高的土壤有机碳基础,其向耕地、草地及其他用地的转化均导致碳储量损失,损失量分别为 3.236,0.876,0.600 Tg C;耕地向其他地类的转换同样不利于土壤有机碳的积累,造成 1.270 Tg C 的损失。湿地土壤有机碳储量对土地利用变化表现出高度的脆弱性,其向耕地、草地及其他用地转换分别导致土壤有机碳储量下降 1.742,0.029,0.002 Tg C。

2.3　干旱程度与土壤有机碳密度分布

本研究基于像元尺度分析了 1995—2020 年不同干旱等级下的土壤有机碳密度及变化趋势(表 2),发现土壤有机碳密度随干旱程度的递减呈现出显著的阶梯式增长趋势,即从极端干旱区、干旱区、半干旱区、干燥亚湿润区到湿润区依次递增,土壤有机碳密度在极端干旱

区与干旱区始终维持在较低水平(5.398~6.333 kg/m^2),两者间差异相对平缓;跨越半干旱区后,土壤有机碳密度显著提升,至湿润区达到峰值。从时间序列来看,各干旱程度区内的有机碳密度在25年间整体保持相对稳定,极端干旱区和干旱区土壤有机碳密度表现为小幅上升趋势。半干旱区、干燥亚湿润区及湿润区的土壤有机碳密度均呈现不同程度的损失,其中干燥亚湿润区的降幅最为剧烈,湿润区的降幅相对较小。

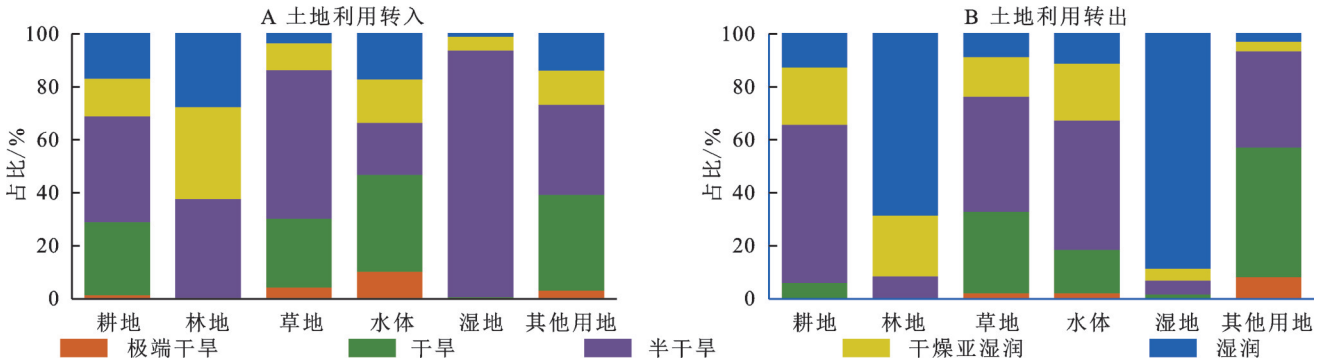


图3 土地利用变化(转入或转出)对应的干旱程度结构比较

Fig. 3 Structural comparison of aridity levels associated with land use change (gains and losses)

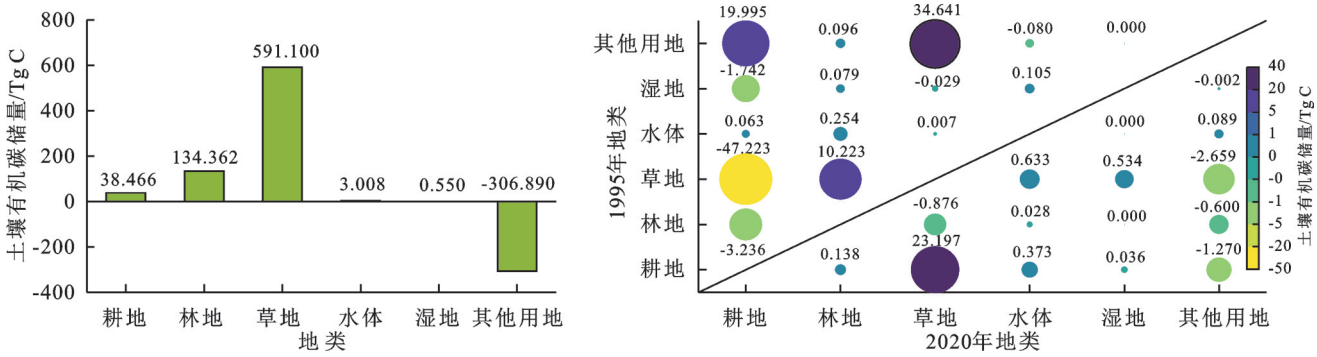


图4 1995—2020年土地利用变化下土壤有机碳储量的动态响应

Fig. 4 Dynamic response of soil organic carbon stocks to land use change (1995—2020)

表2 不同干旱程度区下平均土壤有机碳密度及变化趋势

Table 2 Mean soil organic carbon density and its variation trends across different aridity levels

干旱程度	土壤有机碳密度/(kg·m^{-2})					25 a年均变化率/(kg·m^{-2}·a^{-1})
	1995—2000年	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	2015—2020年	
极端干旱	5.556	4.850	5.517	5.506	5.398	0.023
干旱	6.333	6.120	6.258	6.191	6.058	0.006
半干旱	9.603	10.160	10.311	9.571	9.574	−0.005
干燥亚湿润	14.431	16.631	15.753	13.121	14.226	−0.013
湿润	19.427	19.246	19.234	18.895	19.233	−0.002

3 讨 论

3.1 土地利用变化对土壤有机碳储量的影响

在1995—2020年“三北”工程区土壤0—100 cm土层有机碳总储量增加(图5),其中草地和林地分别增加270.41,181.20 Tg C,是驱动土壤有机碳储量增加的重要地类。这一发现有力地证实了大规模植被恢复和保护工程在提升碳汇能力方面的决定性作用。Lu等[22]的研究中指出,中国自21世纪初实施的六大生态修复工程显著增强了陆地生态系统的固碳潜力,而“三北”工程区作为其中的关键区域,通过“退耕还林还草”和防护林营建有效扭转了因早期土地退化导致的碳流失局面。本研究进一步证明林草地是“三北”工程区土壤有机碳储量较高的类型之一[23],其固碳效应更具有垂直深度的优势。相较于表层土壤,0—100 cm土层的动态变化反映了该区域通过地下生物量(尤其是根系)实现长期固碳的机制。Jobbágy等[24]的研究表明,林草生态系统通过发达的根系周转与根际沉积,将碳源源不断地输送至深层土壤,这种效应不仅增加了碳的数量,而且由于深层环境较低的微生物矿化速率,有效提升了碳库的稳定性[25]。而这种由生态恢复构建的土壤有机碳储量的增长正受到土地利用逆向转变的威胁。现有研究[26]表明,从自然或半自然生态系统(森林和草

地)转变为耕地后,会导致土壤有机碳下降20%~60%。这种从“生态固碳”向“农业扰动”的转换对土壤有机碳储量产生显著负面影响,开垦导致凋落物输入量剧减,削弱了植被对土壤的碳源供给[27];同时人类活动破坏土壤结构,改变微气候,进而加速土壤有机碳向大气的释放[28]。本研究的结果也验证了这一理论,草地、林地和湿地等生态用地的开垦会导致52.2 Tg C的储量损失(其中草地、林地和湿地分别减少47.22,3.24,1.74 Tg C),这表明在持续推进植被恢复的同时,严格管控生态用地的逆向流转对于维持区域碳平衡至关重要。

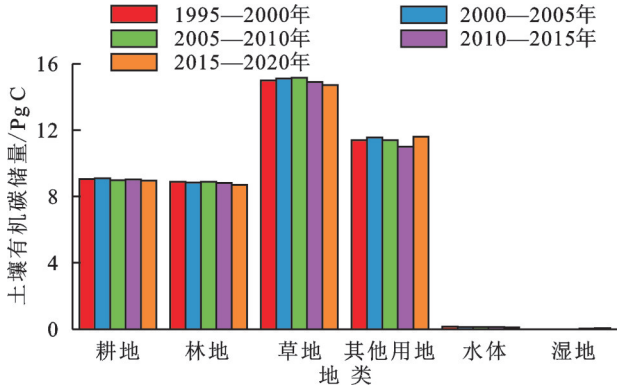


图5　研究区土壤有机碳储量变化

Fig. 5　Dynamics of soil organic carbon stocks in study area

3.2　土地利用变化、干旱与土壤有机碳的关系

土地利用变化是驱动“三北”工程区时空变化的重要因素,但其产生的固碳作用受到区域干旱程度的影响[22]。本研究发现,尽管1995—2020年全区土壤有机碳储量整体呈增加趋势,但各主要地类在空间分布与固碳潜力上表现出显著的非对称性。其中,草地转换虽表现活跃,但其分布重心呈现出明显的质量退化,新增草地向高干旱程度区聚集(半干旱区占56.06%,干旱区占26.06%),且高固碳潜力的湿润区(转出占比8.42%)及干燥亚湿润区(14.96%)草地持续流失。Ren等[10]指出,干旱化会通过限制生物量输入与加速有机质矿化,显著削弱干旱区生态系统的碳封存潜力。本研究中新增草地向高干旱程度区的转移,使得其碳累积潜力远低于流失的湿润区草地,从而放大了土地利用变化对区域草地土壤有机碳储量的负面影响。并且林地也表现出此特征,尽管土壤有机碳储量有所增长,但新增林地集中于半干旱区(34.81%)及干燥亚湿润区(34.51%),而原本具备更高储碳能力的湿润区是林地转出的集中分布区,占林地总转出面积的68.30%。这种林地内部向干旱区域扩张的趋势,直接解释了本研究中“耕地转林地”产生的土壤有机碳储量增量仅为0.138 Tg C。根据Wen等[11]的研究,林地碳库对干旱化的响应极为敏感,水分亏缺显著限制了人工林分的生物量积累与深层土壤碳输入。因此,“三北”工程在干旱区的扩张虽增加了植被面积,但受干旱程度环境约束,其产生的实际有机碳储量增益受空间异质性影响。

3.3　提升三北地区土壤有机碳的对策与建议

草地作为“三北”工程区面积仅次于裸地的用地类型,是构成土壤碳库的基石。本研究显示,草地面积虽受气候波动及生态工程驱动(如向林地转移)呈现小幅减少,但其作为优质储备耕地的战略价值日益凸显。在未来的土地利用规划中,应探索草地保护与合理转型的协同路径。通过统筹粮食安全保障与耕地动态平衡,推广保护性耕作等科学的农业管理手段,实现农牧交错带土壤环境的改善与土壤有机碳储量的协同提升[29];应聚焦区域内的沙漠、戈壁等用地,通过人工种植耐贫瘠、耐旱草种,在遏制土地荒漠化与沙化的同时,最大限度地挖掘未利用地的固碳潜力。

林地建设长期以来被视为提升陆地生态系统固碳能力的核心途径。然而,本研究及相关证据显示,受水分条件约束,在干旱程度高的区域,人造林的固碳效益低。这并非否定林地的生态价值,而是强调森林经营必须遵循“水分平衡”的规律。针对“三北”地区复杂的气候条件,林地管理应从“面积导向”转向“适宜性导向”:应优先在水分条件较好的区域开展造林,以保障碳汇的高效积累;针对干旱/半干旱的生态退化区,应摒弃传统的连片造林模式,转而采取更为灵活的经营策略,如发展林草复合系统、实施轮伐期造林等[30],以提升林分结构的生态韧性。这种差异化的管理策略不仅能优化区域碳封存效率,更有助于构建稳固的防风固沙生态屏障,保障生态系统的可持续性。

4　结　论

(1)“三北”工程区0—100 cm土层土壤有机碳总储量整体增加,储量规模表现为“草地>其他用地>耕地>林地>水体>湿地”。草地与林地是驱动碳储量增加的核心地类,分别增加270.41,181.20 Tg C,证实了生态工程在提升区域固碳潜力中的决定性作用。林地、草地及湿地等生态用地的逆向开垦造成52.2 Tg C的储量减少。

(2)土地利用变化产生的固碳效益受到区域干旱程度的调节。新增草地和林地表现出“向高干旱区偏移”趋势,新增草地高度聚集于半干旱区(56.06%)和干旱区(26.06%);新增林地集中于半干旱区(34.81%)及干燥亚湿润区(34.51%),林地减少集中于湿润区(68.30%),这种偏移抑制了土地利用变化的固碳效率。

（3）区域固碳潜力提升需坚持“以水定绿、空间适配”的原则。未来应持续深化防护林体系建设，强化土地利用变化与干旱程度的空间适配性，同时对农田实施休耕、集中经营及秸秆还田等保护性措施，在协同增强防风固沙效能的同时，夯实北方生态安全屏障。

“三北”工程区的土壤有机碳储量动态变化与土地利用变化密切相关，并受到干旱程度的影响，坚持土地合理利用与科学管理，是实现固碳增汇、夯实我国北方生态安全屏障的关键。

参考文献(References)：

[1] Li L L, Luo Z Z, Li Z L, et al. Long-term phosphorus fertilization reveals the phosphorus limitation shaping the soil micro-food web stability in the Loess Plateau[J]. Frontiers in Microbiology, 2024,14:1256269.

[2] Liang N S, Teramoto M, Takagi M, et al. High-resolution data on the impact of warming on soil CO_2 efflux from an Asian monsoon forest[J]. Scientific Data, 2017, 4:170026.

[3] Li X L, Yang L X, Tian W, et al. Land use and land cover change in agro-pastoral ecotone in northern China: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(10):3487-3495.

[4] Liu M, Han G L. Distribution of soil nutrients and erodibility factor under different soil types in an erosion region of Southeast China[J]. PeerJ, 2021,9:e11630.

[5] Gao H R, Gong J, Liu J K, et al. Effects of land use/cover changes on soil organic carbon stocks in Qinghai-Tibet plateau: a comparative analysis of different ecological functional areas based on machine learning methods and soil carbon pool data[J]. Journal of Cleaner Production, 2024,434:139854.

[6] Yang J, Han X, Huang J, et al. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003,14(8):1385.

[7] Arora V K, Melton J R. Reduction in global area burned and wildfire emissions since 1930s enhances carbon uptake by land[J]. Nature Communications, 2018,9:1326.

[8] Meng Y R, Yang M X, Liu S, et al. Quantitative assessment of the importance of bio-physical drivers of land cover change based on a random forest method[J]. Ecological Informatics, 2021,61:101204.

[9] Li X Y, Piao S L, Huntingford C, et al. Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation [J]. National Science Review, 2023,10(5):nwad049.

[10] Ren Z B, Li C J, Fu B J, et al. Effects of aridification on soil total carbon pools in China's drylands [J]. Global Change Biology, 2024,30:e17091.

[11] Wen H Y, Sun Z, Yang F, et al. Aridity regulates the vital drivers of soil organic carbon content in the Northeast China[J]. Catena, 2025,257:109192.

[12] Zhang S M, Landuyt D, Verheyen K, et al. Tree species mixing can amplify microclimate offsets in young forest plantations [J]. Journal of Applied Ecology, 2022,59(6):1428-1439.

[13] 国家林业和草原局三北局. 扎实推动三北工程科学绿化 [EB/OL]. (2021-12-25) [2026-05-26]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/lhgzdt/45718.jhtml.
Three-North Bureau of National Forestry and Grassland Administration. Solidly promote the scientific greening of the Three-North Shelterbelt Program [EB/OL]. (2021-12-25) [2026-05-26]. https://www. forestry.gov.cn/c/www/lhgzdt/45718.jhtml.

[14] 袁泽雨，许行，任怡，等.2001—2021年“三北”工程区植被韧性分布特征及其驱动因素[J].林业科学，2025,61(7):182-191.
Yuan Z Y, Xu X, Ren Y, et al. Distribution characteristics of vegetation resilience and its driving factors in the Three-North Shelterbelt Forest Program region from 2001 to 2021[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025,61(7): 182-191.

[15] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021,13(8):3907-3925.

[16] Dong Y, Wang X T, Su W. A 1 km soil organic carbon density dataset with depth of 20 and 100 cm from 1985 to 2020 in China[J]. Earth System Science Data, 2026, 18(2):759-777.

[17] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al.1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019,11(4):1931-1946.

[18] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021,145(1):79-94.

[19] Zomer R J, Xu J C, Trabucco A. Version 3 of the global aridity index and potential evapotranspiration database[J]. Scientific Data, 2022,9:409.

[20] 陈新邦，唐光木，张云舒，等.不同类型外源碳添加对灰漠土土壤碳储量的影响[J].水土保持学报，2023,37(3):330-335.
Chen X B, Tang G M, Zhang Y S, et al. Effects of different types of exogenous carbon addition on soil carbon storage in grey desert soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):330-335.

[21] Chen X, Yu L, Hou S, et al. Unraveling carbon stock dynamics and their determinants in China's Loess Pla-

teau over the past 40 years[J]. Ecological Indicators, 2024,159:111760.

[22] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018,115(16):4039-4044.

[23] 常鹏飞,李平,纳尔斯格,等.内蒙古温带草原不同草地类型土壤有机碳和无机碳储量对总碳储量的贡献及其驱动因素[J].植物生态学报,2025,49(9):1374-1387.
Chang P F, Li P, Naersi G, et al. Contributions of soil organic carbon and inorganic carbon stocks to total soil carbon stock and their driving factors across different types in Nei Mongol temperate grasslands[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2025,49(9):1374-1387.

[24] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. Ecological Applications, 2000,10(2):423-436.

[25] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter: a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. Plant and Soil, 2011,338(1):143-158.

[26] Wako D, Welemariam M, Kitila G. Land use change effect on soil carbon stock and selected soil properties in Gobu Sayyo District, Western Ethiopia[J]. The Scientific World Journal, 2025,2025:4726114.

[27] Xu S Z, Wang C L, Zhou J J, et al. Impacts of land use on soil carbon, nitrogen, and phosphorus in the eastern Qilian Mountains [J]. PloS One, 2025, 20(7): e0326316.

[28] Djemiel C, Dequiedt S, Bailly A, et al. Biogeographical patterns of the soil fungal: bacterial ratio across France[J]. mSphere, 2023,8(5):e00365-23.

[29] Zhou T Y, Liu Q H, Yang S S, et al. Optimized fertilization patterns increase foxtail millet biomass on the distribution and transformation in Loess Plateau of China [J]. Plos One, 2025,20(2):e0318199.

[30] Yang Y Y, Lü Y H, Fu B J, et al. The potential for carbon sequestration by afforestation can be limited in dryland river basins under the pressure of high human activity[J]. Science of the Total Environment, 2023, 858:159817.

(上接第159页)

[19] 罗艺,吴福忠,杨万勤,等.四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征[J].环境科学学报,2010,30(11):2221-2228.
Luo Y, Wu F Z, Yang W Q, et al. N losses from different cropping modes in the purple hilly region of the Sichuan Basin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010,30(11):2221-2228.

[20] 任秀文,李开明,刘爱萍,等.模拟降雨条件下红壤坡面硝态氮流失特征研究[J].中国环境科学,2013,33(S1):119-124.
Ren X W, Li K M, Liu A P, et al. Characteristics of nitrate nitrogen loss on red soil slope under simulated rainfall conditions[J]. China Environmental Science, 2013,33(S1):119-124.

[21] 熊子怡,王子芳,龙翼,等.紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应[J].环境科学,2020,41(4):1930-1940.
Xiong Z Y, Wang Z F, Long Y, et al. Response of nitrogen loss flux in purple soil sloping field to reduced fertilizer and combining straw[J]. Environmental Science, 2020,41(4):1930-1940.

[22] 梁亚宇,宋志辉,李丽君,等.太原周边农田雨季硫氮湿沉降特征[J].山西农业科学,2019,47(5):880-884.
Liang Y Y, Song Z H, Li L J, et al. Characteristics of sulfur-nitrogen wet deposition in farmland around Taiyuan during rainy season[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019,47(5):880-884.

[23] 刘平,刘学军,骆晓声,等.山西北部农村区域大气活性氮沉降特征[J].生态学报,2016,36(17):5353-5359.
Liu P, Liu X J, Luo X S, et al. The atmospheric deposition characteristics of reactive nitrogen (Nr) species in Shuozhou area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17):5353-5359.

[24] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013,46(16):3324-3333.

[25] 仇少君,彭佩钦,刘强,等.土壤微生物生物量氮及其在氮素循环中作用[J].生态学杂志,2006,25(4):443-448.
Qiu S J, Peng P Q, Liu Q, et al. Soil microbial biomass nitrogen and its role in nitrogen cycling[J]. Chinese Journal of Ecology 2006,25(4):443-448.