#### DOI: 10.5846/stxb202010132609

李妙宇,上官周平,邓蕾.黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素.生态学报,2021,41(17):6786-6799. Li M Y, Shangguan Z P, Deng L.Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(17):6786-6799.

# 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布及其影响因素

李妙宇<sup>1,2</sup>,上官周平<sup>1,2,3</sup>.邓 蕾<sup>1,2,3,\*</sup>

1 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,杨凌 712100

2 中国科学院大学,北京 100049

3 西北农林科技大学水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:准确估算生态系统碳储量,探明其空间分布及其影响因素对区域生态管理具有重要意义,但黄土高原地区碳储量现状、空间格局及其驱动因素尚不清楚。选择黄土高原地区森林(包括乔木林和灌木林),草地和农田生态系统为对象,基于大量实测样点通过克里金插值和地统计方法,评估了三种生态系统地上生物量碳密度、地下生物量碳密度和0—100 cm 土壤有机碳密度 空间分布,并通过路径分析探讨了各碳库的主要影响因素。结果表明:黄土高原地区约占全国总面积的 6.7%,其生态系统总碳储量约为 2.29 Pg,仅占我国生态系统碳储量的 2.3%。生态系统各碳库中,地上生物量碳储量、地下生物量碳储量、土壤有机碳储量分别为 0.44、0.32 和 1.52 Pg;森林、草地、农田(仅指土壤)生态系统碳储量分别为 0.98、1.09 和 0.21 Pg。气候(年均温度、年均降水)、海拔、坡度、土壤质地(砂粒、粉粒、粘粒含量)、植被覆盖状况(用 NDVI 表示)等因子可解释地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、地下生物量碳密度、和

关键词:黄土高原;碳密度;碳储量;空间格局;生态系统

# Spatial distribution of carbon storages in the terrestrial ecosystems and its influencing factors on the Loess Plateau

LI Miaoyu<sup>1, 2</sup>, SHANGGUAN Zhouping<sup>1, 2, 3</sup>, DENG Lei<sup>1, 2, 3, \*</sup>

1 State Key Laboratory for Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

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

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

**Abstract**: To accurately estimate ecosystem carbon storages and explore its spatial distribution and influencing factor have great significance for regional ecological managements. However, the status and spatial pattern of carbon storages on the Loess Plateau and the driving factors are still unclear. This study, based on a large number of measured sample points of forest, grassland and cropland ecosystems in the Loess Plateau, used the Kriging interpolation method and the geostatistics method to estimate the spatial distribution of above- and belowground biomass carbon storages and 0—100 cm soil organic carbon storages in each ecosystem. Meanwhile, the study used path analysis to explore the main influencing factors of spatial patterns of carbon storages in different carbon pools. The results showed that total carbon storages of the Loess Plateau is about 2.29 Pg which only accounting for 2.3% of the carbon storages (99.15 Pg) in the whole China, and the Loess Plateau covers 6.7% of China. Of the Loess Plateau, the above- and belowground biomass carbon storages, and the soil organic

收稿日期:2020-10-13; 网络出版日期:2021-06-11

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项 A 类(XDA23070201)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: leideng@ms.iswc.ac.cn

carbon storages are 0.44 Pg, 0.32 Pg and 1.52 Pg, respectively. The carbon storages of forest, grassland and cropland (excluding vegetation) ecosystems are about 0.98 Pg, 1.09 Pg and 0.21 Pg, respectively. Climate factors (mean annual temperature, mean annual precipitation), altitude, topography (slope), soil texture (sand, silt, clay content) and Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) can explain 12%, 8% and 32% of the spatial variations in above- and belowground biomass carbon storages and cropland soil organic carbon storages. Mean annual precipitation, altitude and clay content are main factors affecting the spatial patterns of carbon storages in the Loess Plateau. Overall, the study suggested that there had a large carbon pool in the Loess Plateau, but the values was lower than the average level of the whole China.

Key Words: Loess Plateau; carbon density; carbon storage; spatial patterns; ecosystems

全球气候变化背景下,陆地生态系统在全球碳循环中扮演着重要角色,日益受到国际社会的广泛关注。 据估算,全球每年自然与人为源 CO<sub>2</sub>的总排放量约为 250 Pg,而全球生态系统吸收为 230 Pg,全球碳循环平衡 受到挑战<sup>[1]</sup>。陆地生态系统是地表的重要组成部分,可通过地表植物的光合作用不断吸收大气中的 CO<sub>2</sub>,并 通过一系列的生物物理化学作用将其固定在植物和土壤内,以减缓全球气候变化<sup>[2]</sup>。碳排放不仅涉及全球 气候变化这一科学问题,也与各国政治、经济发展密切相关,近几十年来,各国政府均采取一系列措施来提高 陆地生态系统的碳储量以期抵消经济发展中的碳排放<sup>[3]</sup>。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,生态环境脆弱,易受极端气候干扰<sup>[4]</sup>。为减缓水土流 失,改善生态环境,我国政府实施了一系列的生态恢复工程,其中,于1999年正式启动的退耕还林(草)工程 将黄土高原地区作为其重点战略区域<sup>[3]</sup>,经过近20年的发展,退耕还林(草)工程取得了显著成效,植被覆盖 度明显提高<sup>[6-7]</sup>,必然会引起生态系统固碳效益发生显著提高<sup>[5]</sup>。已有研究表明,黄土高原地区植被恢复后 生态系统在碳平衡方面起着重要作用,固碳潜力巨大<sup>[8-11]</sup>。目前,关于黄土高原碳储量的研究,一方面多通过 样点调查、清查资料等进行样地、流域尺度的碳储量估算<sup>[12-13]</sup>,或通过多源数据建模<sup>[14-16]</sup>等方法进行大尺度 碳储量估算;另一方面多以单个生态系统如森林、草地、农田、或单一类型碳库如植被碳库,土壤碳库进行估 算<sup>[17-18]</sup>。估算方法多样,尺度不一,导致研究间存在很大差异,很难进行综合比较,亟需基于大量可靠样点数 据进行黄土高原碳储量分区估算以及碳密度空间分布研究。另外,碳密度的空间格局受各种因素的共同影 响,包括土地利用、气象、地形、植被覆盖、土壤质地等<sup>[5,19-20]</sup>。关于碳密度空间分异影响因素分析,在全国尺 度上已有较为详尽的相关研究<sup>[19-20]</sup>,但多侧重于气象因子的影响分析,而单一的气象与土壤粘粒含量并不能 充分地预测区域生态系统碳储量<sup>[21]</sup>。而对黄土高原地区来说,不同生态系统碳储量的主控因子以及不同因 子的相对影响大小和作用路径亦不明确。因此,准确估算黄土高原生态系统碳储量,探明其空间分布及其驱 动因素对于科学指导区域生态管理以及未来政策的制定具有重要意义。

本研究利用大量野外实测数据分别对黄土高原地区森林、草地、农田生态系统的植被地上、地下生物量和 土壤有机碳碳储量进行估算,评估整个黄土高原地区的生态系统碳储量与空间分布格局,并结合多源气候、地 形、土壤和植被覆盖数据,评估各因子对碳储量空间分布的影响,以期为黄土高原固碳能力评估以及区域未来 政策制定提供参考。

# 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

黄土高原地区位于 33°41′—41°16′N,100°52′—114°33′E 之间,地处我国黄河中游,跨青海省、甘肃省、宁 夏回族自治区、陕西省、内蒙古自治区、山西省及河南省 7 个省区,总面积约 64 万 km<sup>2</sup>,约占我国陆地总面积 的 6.7%,是世界上最大的黄土堆积区,区域平均黄土厚度 92.2 m<sup>[22]</sup>,受人类活动以及自然条件等多方面因素 影响,土壤侵蚀与水土流失现象严重,多年平均侵蚀输沙模数在 1921—3355 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>之间<sup>[23]</sup>,地形破碎且沟 壑纵横。黄土高原地区以大陆性季风气候为主,自东南向西北由暖温带半湿润区逐渐向暖温带半干旱区,中 温带半干旱区过渡,多年平均气温 7.3 ℃,多年平均降水量 447 mm,年际及年内变化较大,年内多集中在 7—9 月<sup>[24]</sup>。黄土高原地区林地(包括乔木和灌木)、草地和农田的面积分别为 14.2、34.3、9.7 万 km<sup>2</sup>,分别占整个 黄土高原面积的 22%、54%、15%。

根据降雨量与植被类型的不同,黄土高原地区自东南向西北分为5个生物气候区,分别是:半湿润森林区 (I),半湿润半干旱林草区(II),半干旱典型草地区(III),干旱半干旱荒漠草地区(Ⅳ),干旱荒漠区(V)(表1)<sup>[25]</sup>。

	Table 1 Bioclimatic	zones of the Loess Plateau
生物气候分区 Bioclimatic zones	降水/mm Precipitation	植被覆盖 Coverage
I半湿润森林区(森林草原) Semi-humid forest	550—650	主要有落叶阔叶林,如栓皮栎(Quercus variabilis)、油松(Pinu stabulaeformis)、侧柏(Platycladus orientals)等
Ⅱ半湿润半干旱林草区 Semi-humid to semi-arid forest-grassland	450—550	主要有灌木如白刺花(Sophora viccifolia)、乌柳(Salix cheilophila)以及 草本植物如长芒草(Stipa bungeana)、茭蒿(Aremisia giraldii.)等
Ⅲ半干旱典型草地区(典型草原) Semi-arid typical grassland	300—450	典型草原
Ⅳ干旱半干旱荒漠草地区 Arid and semi-arid desert-grassland	200—300	典型草原以及荒漠草原
V干旱荒漠区 Arid desert	<200 mm	干旱灌木小型灌木等沙漠植被如盐爪爪(Kalidium foliatum)、合头草 (Sympegma regeli)、沙冬青(Ammopiptanthus)等

表1 黄土高原地区生物气候分区







Ⅰ半湿润森林区(森林草原);Ⅱ半湿润半干旱林草区;Ⅲ半干旱典型草地区(典型草原);Ⅳ干旱半干旱荒漠草地区;V干旱荒漠区

# 1.2 数据来源及预处理

黄土高原地区土地利用数据采用朱源等<sup>[26]</sup>制作的"2015年黄土高原土地利用/覆被栅格数据",分辨率 250 m,该数据以 Landsat 8 卫星 OLI 遥感影像为数据源,将计算机自动分类和人工目视修改相结合,解译分类 精度较高;年均温度(MAT)年均降水(MAP)等气象数据采用中国科学院资源环境科学数据中心的数字化空 间产品:"中国气象背景数据集"(http://www.resdc.cn/data.aspx? DATAID=253),分辨率 500 m,该栅格数据 由气象站点建站到上世纪末站点数据使用反向距离加权法插值而来,其中 MAT 数据经过了 DEM 校正;土壤 质地栅格数据来自中国科学院资源环境科学数据中心"中国土壤质地空间分布数据"(http://www.resdc.cn/ data.aspx? DATAID=260),该数据集包括土壤砂粒、粉粒、粘粒含量,分辨率 1 km; DEM (Digital Elevation

Model 数字高程模型)数据来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),分辨率 500 m,由 DEM 数据计算 衍生坡度、坡向地形数据;NDVI(Normalized Difference Vegetation Index 归一化植被指数)采用中国科学院资源 环境科学数据中心产品"中国年度植被指数空间分布数据集"数据,分辨率 1 km,该数据集包含由年内多幅数 据使用最大值合成法分别合成的各年份 NDVI 数据(http://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx? DOIid = 49),将 2010—2018 年数据进行栅格计算,以多年均值代表植被覆盖状况。收集各类数据后,使用黄土高原地区的空 间范围矢量文件对各栅格数据进行掩膜提取,得到黄土高原地区的各类栅格数据。

碳密度数据引用徐丽等<sup>[27]</sup>发表的数据集,该数据集包括文献数据以及实测数据两部分,收集了森林(包括乔木林和灌木林)、草地、农田等多种生态系统类型的植被地上地下生物量碳密度以及0—100 cm 土壤有机碳密度数据,在整个数据集的构建的过程中实施了严格的质量控制。由于数据集中黄土高原地区灌木样点少且空间分布极不均匀,难以进行有效空间插值分析,故将乔木与灌木两种生态系统类型与样点合并处理。将碳密度数据根据样点经纬度导入 ArcGIS10.2 生成矢量点数据,为进一步保证数据点的准确性,根据黄土高原地区各生态系统类型矢量文件对数据库样点进行裁剪,裁剪出黄土高原地区与对应经纬度生态系统类型一致的样点,分别建立森林、草地、农田不同碳库的样点集,其中森林生态系统地上生物量、地下生物量、土壤有机碳样点数分别为 121、145、167;草地生态系统地上生物量、地下生物量、土壤有机碳样点数分别为 318、239、73;农田生态系统 0—100 cm 土壤有机碳样点数为 190。将 MAT、MAP、NDVI、DEM、坡度、坡向、土壤砂粒、粉粒、粘粒含量等各因子数据从各栅格文件提取到各样点。

#### 1.3 数据分析

#### 1.3.1 碳密度插值分析

克里金方法是地统计学中最常用的空间插值方法,以变异函数为基础,可在一定区域内对某一变量未知 位置进行线性最优无偏估计。该方法考虑了样本点的空间方位以及与未知样点的空间关系,且可在完成全局 预测之后在数据点上对插值结果进行交叉验证,对插值结果进行评估<sup>[28]</sup>。已有研究对比分析结果表明,克里 金法更适合于碳密度空间插值,插值精度更高<sup>[29-30]</sup>。

使用 AreGIS 的地统计分析模块对黄土高原地区不同生态系统不同碳库碳密度进行克里金空间插值,对 未知点进行估算,生成预测表面,绘制相应的黄土高原地区生态系统碳密度空间分布图。在插值之前通过 K-S 检验方法结合探索性数据分析模块的正态 QQ 图检验每类数据点碳密度是否符合正态分布或近正态分布, 若不服从正态且明显偏态,将数据进行对数转换之后再进行空间插值。比较各模型预测结果的平均预测误差 以及均方根误差,使其分别接近 0 和 1,且预测与真值的拟合线接近 1:1 线,选择最优模型进行空间插值。

基于插值结果栅格,使用区域分析工具对各生物气候区以及整个黄土高原地区的不同生态系统类型各碳 库碳密度进行统计分析,分别统计其在各区域内的最小值、最大值、平均值以及碳储量。

# 1.3.2 统计分析

基于样点数据对碳密度与各因子的关系进行统计分析。分别计算地上生物量碳密度、地下生物量碳密度、土壤有机碳碳密度与经纬度,气象(MAT,年均温度;MAP,年均降水),植被覆盖状况(NDVI),土壤质地(砂粒、粉粒、粘粒含量),地形(DEM、坡向、坡度)等因子的相关性,判断各碳库碳密度与各因子的相关性强度,使用路径分析方法构建影响路径,进一步判别各因子对碳密度的影响路径与强度。使用 Arcgis10.2 进行空间插值地统计与制图,使用 Origin 2018 进行样点数据的统计分析,使用 Amos17.0 进行路径分析。

#### 2 结果分析

#### 2.1 生态系统碳储量现状及其空间分布

黄土高原地区生态系统总碳储量约为 2.29 Pg,其中地上生物量碳储量、地下生物量碳储量、土壤有机碳储量 分别为 0.44、0.32 和 1.52 Pg,约占总生态系统碳储量的 19%、14%和 67%(表 2)。自东南向西北分布的各生物气 候区碳储量分别为 0.69、0.70、0.51、0.31 和 0.09 Pg,大小顺序为:I>II>II>II>IV>V,呈逐渐减小的趋势。

	the
	J.
	20102
	hioclimatic
和碳储量	different
闽	
<b>≲系统碳密</b>	ecosystems
₩	2
	nla
K	Cr0
[候]	pue
□	, pu
高原不	oracelai
玉玉	est
	for
表	j.
	torages
	o pu
	8
	aitia
	den
	-

			Tab	le 2 Carbon e	lensities and st	torages o	of forest,	grassland and	I cropland eco	systems ii	n differe	nt bioclimatic	zones of the L	oess Plat	teau		
			围	上生物量碳密度			市市	下生物量碳密度				土壤碳密度			心	生态系统碳储量	
	24	Above	ground bio	omass carbon dens	ity/(t/hm²)	$Below_{8}$	ground bion	ass carbon dens	ity/(t/hm²)	Š	il organic	carbon density/(	$(t/hm^2)$		Ecosystem	carbon storage/(	$t/hm^2$ )
	ガ IX Zones	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	碳储量 Carbon storage/Pg	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	碳储量 Carbon storage/Pg	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	碳储量 Carbon storage/Pg	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	碳储量 Carbon storage/Pg
森林	-	0.057	0.743	$0.349 \pm 0.088$	$0.175\pm0.044$	0.013	0.198	$0.106\pm0.022$	$0.053\pm0.011$	0.134	0.935	$0.399 \pm 0.077$	$0.200 \pm 0.038$	0.368	1.615	$0.854\pm0.134$	$0.428 \pm 0.067$
Forest	Π	0.042	0.502	$0.265\pm0.073$	$0.133\pm0.037$	0.013	0.194	$0.072\pm0.018$	$0.037\pm0.009$	0.072	1.259	$0.348 \pm 0.136$	$0.175\pm0.069$	0.216	1.654	$0.684 \pm 0.193$	$0.345\pm0.097$
	Ш	0.063	0.462	$0.252 \pm 0.076$	$0.046\pm0.014$	0.024	0.224	$0.068 \pm 0.014$	$0.012\pm0.003$	0.062	0.680	$0.274\pm0.074$	$0.050\pm0.013$	0.169	1.023	$0.595 \pm 0.118$	$0.108 \pm 0.021$
	Ν	0.059	0.371	$0.140 \pm 0.074$	$0.028\pm0.015$	0.020	0.105	$0.042\pm0.023$	$0.008\pm0.005$	0.022	0.794	$0.220\pm0.168$	$0.044 \pm 0.034$	0.136	1.203	$0.402 \pm 0.259$	$0.080 \pm 0.052$
	Λ	0.059	0.288	$0.178 \pm 0.074$	$0.006\pm0.003$	0.020	0.102	$0.050\pm0.020$	$0.002 \pm 0.001$	0.073	0.775	$0.361 \pm 0.181$	$0.013 \pm 0.006$	0.182	1.100	$0.589 \pm 0.252$	$0.021 \pm 0.009$
	全区	0.042	0.743	$0.272 \pm 0.106$	$0.387 \pm 0.150$	0.013	0.224	$0.078\pm0.030$	$0.111\pm0.043$	0.022	1.259	$0.338 \pm 0.134$	$0.479 \pm 0.191$	0.136	1.654	$0.688 \pm 0.235$	$0.978 \pm 0.334$
草地	Ι	0.007	0.023	$0.013\pm0.003$	$0.005\pm0.001$	0.017	0.166	$0.087 \pm 0.045$	$0.031 \pm 0.016$	0.152	0.620	$0.304{\pm}0.109$	$0.110 \pm 0.039$	0.217	0.768	$0.404\pm0.141$	$0.146 \pm 0.051$
Grassland	Π	0.006	0.024	$0.013\pm0.003$	$0.010 \pm 0.003$	0.006	0.180	$0.076\pm0.036$	$0.062 \pm 0.029$	0.072	0.614	$0.290 \pm 0.128$	$0.234 \pm 0.104$	0.165	0.744	$0.378 \pm 0.147$	$0.306 \pm 0.119$
	Ш	0.002	0.026	$0.009\pm0.004$	$0.011 \pm 0.005$	0.014	0.127	$0.065\pm0.023$	$0.075\pm0.026$	0.066	0.580	$0.246\pm0.093$	$0.282 \pm 0.106$	0.115	0.690	$0.320 \pm 0.147$	$0.368 \pm 0.168$
	Ν	0.001	0.017	$0.006\pm0.004$	$0.005\pm0.003$	0.002	0.258	$0.040\pm0.020$	$0.034 \pm 0.017$	0.061	0.509	$0.208 \pm 0.100$	$0.175\pm0.084$	0.088	0.739	$0.254\pm0.119$	$0.214\pm 0.100$
	Λ	0.002	0.011	$0.005\pm0.002$	$0.001 \pm 0.001$	0.008	0.055	$0.025\pm0.010$	$0.007\pm0.003$	0.062	0.456	$0.167 \pm 0.073$	$0.046 \pm 0.020$	0.091	0.500	$0.196\pm0.082$	$0.054 \pm 0.023$
	全区	0.001	0.026	$0.009\pm0.005$	$0.032 \pm 0.016$	0.002	0.258	$0.061 \pm 0.034$	$0.208\pm0.115$	0.061	0.620	$0.246\pm0.112$	$0.846 \pm 0.383$	0.088	0.768	$0.316\pm0.135$	$1.086 \pm 0.464$
农田	Ι	I	I	I	I	I	I	I	I	0.130	0.322	$0.224\pm0.048$	$0.094 \pm 0.020$	0.130	0.322	$0.224\pm0.048$	$0.094 \pm 0.020$
Cropland	Π	I	I	I	I	I	ı	I	I	0.049	0.302	$0.193 \pm 0.049$	$0.035\pm0.009$	0.049	0.302	$0.193 \pm 0.049$	$0.035\pm0.009$
	Ш	I	I	I	I	I	I	I	I	0.049	0.365	$0.204\pm0.049$	$0.040 \pm 0.010$	0.049	0.365	$0.204\pm0.049$	$0.040 \pm 0.010$
	Ν	I	I	I	I	I	ı	I	I	0.166	0.374	$0.223\pm0.049$	$0.023\pm0.005$	0.166	0.374	$0.223\pm0.049$	$0.023\pm0.005$
	Λ	ı	ı	I	I	ı	ı	I	I	0.171	0.308	$0.197\pm0.014$	$0.014\pm0.001$	0.171	0.308	$0.197 \pm 0.014$	$0.014 \pm 0.001$
	全区	I	I	I	I	I	I	I	I	0.049	0.374	$0.212\pm0.049$	$0.205\pm0.047$	0.049	0.374	$0.212\pm0.049$	$0.205\pm0.047$
黄土高原	Ι	0.007	0.743	$0.225\pm0.177$	$0.194\pm0.152$	0.013	0.198	$0.099\pm0.034$	$0.085\pm0.029$	0.130	0.935	$0.318\pm0.109$	$0.407 \pm 0.140$	0.130	1.615	$0.539\pm0.261$	$0.690 \pm 0.334$
Loess Plateau	Π	0.006	0.502	$0.117\pm0.133$	$0.154\pm0.174$	0.007	0.194	$0.074\pm0.030$	$0.097\pm0.039$	0.049	1.259	$0.296\pm0.133$	$0.442\pm0.198$	0.049	1.654	$0.467 \pm 0.237$	$0.698 \pm 0.354$
	Ш	0.002	0.462	$0.044\pm0.090$	$0.059\pm0.119$	0.014	0.224	$0.065\pm0.022$	$0.087\pm0.029$	0.049	0.680	$0.241 \pm 0.085$	$0.367 \pm 0.130$	0.049	1.023	$0.337\pm0.142$	$0.514 \pm 0.217$
	Ν	0.001	0.371	$0.033\pm0.063$	$0.034 \pm 0.066$	0.002	0.258	$0.040\pm0.020$	$0.042\pm0.021$	0.022	0.794	$0.208\pm0.111$	$0.237 \pm 0.126$	0.088	1.203	$0.275\pm0.161$	$0.313\pm0.184$
	Λ	0.002	0.288	$0.024\pm0.061$	$0.008\pm0.019$	0.008	0.102	$0.027\pm0.014$	$0.008\pm0.004$	0.062	0.775	$0.190 \pm 0.099$	$0.072 \pm 0.038$	0.091	1.100	$0.232 \pm 0.155$	$0.090 \pm 0.059$
	全区	0.001	0.743	$0.090 \pm 0.135$	$0.439\pm0.655$	0.002	0.258	$0.065 \pm 0.033$	$0.317\pm0.162$	0.022	1.259	$0.261 \pm 0.119$	$1.519\pm0.691$	0.049	1.654	$0.393 \pm 0.240$	$2.286 \pm 1.399$

http://www.ecologica.cn

6791

黄土高原地区不同碳库碳密度具有明显的空间异质性,且不同生态系统类型碳密度差异较大。地上生物 量碳密度、地下生物量碳密度、土壤有机碳密度以及黄土高原总生态系统碳密度空间分布格局均较破碎,整体 呈自东南向西北减小的趋势,各区域平均碳密度均为: I > Ⅱ > Ⅱ > Ⅳ > V。地上生物量碳密度的变化范围为 0.001—0.743 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度 0.09 t/hm<sup>2</sup>,在生物气候 I 区最高,平均值为 0.225 t/hm<sup>2</sup>,向西北逐渐降低;在 生物气候 V 区,仅为 0.024 t/hm<sup>2</sup>。地下生物量碳密度的变化范围为 0.001—0.743 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度 0.065 t/ hm<sup>2</sup>,与地上生物量碳密度空间格局相似,在东南部的生物气候 I 区最高,向西北逐渐降低。土壤有机碳密度 自东向西,自南向北逐渐降低,变化范围为 0.022—1.259 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度 0.261 t/hm<sup>2</sup>,在生物气候 I 区以 及 II 区的东部,土壤有机碳密度较高,可达 0.45 t/hm<sup>2</sup> 以上;在黄土高原地区西北部,土壤有机碳密度最低。 黄土高原总生态系统碳密度变化范围为 0.049—1.654 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度 0.393 t/hm<sup>2</sup>,空间格局与土壤有机 碳密度空间格局相似(图 2),自东南向西北各生物气候区平均碳密度分别为 0.539、0.467、0.337、0.275、0.232 t/hm<sup>2</sup>,也呈逐渐降低趋势。



图 2 黄土高原不同碳库碳储量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of carbon storages in different carbon pools of the Loess Plateau

# 2.2 森林生态系统碳储量现状及碳密度空间分布

森林生态系统总碳储量约为 0.98 Pg,占黄土高原地区总生态系统碳储量的 43 %,其中地上生物量碳、地下生物量碳、土壤有机碳储量分别为 0.39、0.11 和 0.48 Pg,分别占森林生态系统总碳储量的 40%、11% 和 49%。五个生物气候区碳储量分别为 0.43、0.35、0.11、0.08 和 0.02 Pg,呈自东南向西北逐渐减小的趋势,表现为 I > II > II > IV > V。

森林生态系统主要分布在黄土高原东南部的生物气候 I 区 II 区以及黄土高原西南部与青藏高原交界处的乌鞘岭地区,在其它地区零星分布,约占黄土高原面积的 32%。森林生态系统地上与地下生物量碳密度变 化范围分别为 0.042—0.743 和 0.013—0.224 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度分别为 0.272 和 0.078 t/hm<sup>2</sup>。处于黄土高原 东南部的生物气候 I 区平均碳密度最高,向西逐渐降低, IV 区平均碳密度最低,在各生物气候区之间 I > II >

Ⅲ>V>IV,空间格局相似。土壤有机碳密度的变化范围为0.022—1.259 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度0.338 t/hm<sup>2</sup>,在各 生物气候区之间 I>II>V>III>IV,整体呈自东向西先降低后略升高到西南部再降低的空间变化格局。森林 生态系统总碳密度变化范围为0.136—1.654 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度0.688 t/hm<sup>2</sup>,在各生物气候区之间 I>II>II>II> V>IV,空间格局与土壤有机碳密度相似(图3)。



图 3 森林生态系统碳储量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon storages in forest ecosystems of the Loess Plateau

# 2.3 草地生态系统碳储量现状及碳密度空间分布

草地生态系统总碳储量约为 1.07 Pg,占黄土高原地区总生态系统碳储量的 48%,其中地上生物量碳,地下生物量碳,土壤有机碳储量分别为 0.032、0.208、0.846 Pg,占草地生态系统总碳储量的 3%、19%、78%。从东南到西北各生物气候区草地生态系统碳储量分别为 0.146、0.306、0.368、0.214、0.054 Pg,处于黄土高原中部的Ⅲ区,Ⅱ区碳储量较大,西北部Ⅳ区与东南部 I 区次之,西北端Ⅴ区最小,大小顺序依次为:Ⅲ>Ⅱ>Ⅳ> I > V(图 4)。

除在生物气候 I 区分布相对较少之外,草地生态系统广泛分布于整个黄土高原地区,约占黄土高原面积的41%。草地生态系统地上生物量碳密度变化范围为0.001—0.026 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度为0.009 t/hm<sup>2</sup>,各生物气候区平均碳密度 I > II > III > IV > V,呈自东南向西北逐渐降低的空间格局,位于黄土高原东南部的 I 区、II 区碳密度较高,位于黄土高原西北部 IV 区、V 区北部区域碳密度较低。地下生物量碳密度变化范围为0.002—0.258 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度为0.061 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度在各区域之间 I > II > IV > V,与地上生物量碳密度相同,但在空间分布上略有不同,地下生物量碳密度在黄土高原低纬度地区自东向西呈先降低后升高的趋势,高纬度地区呈自东向西逐渐降低的趋势。土壤有机碳密度变化范围为0.06—0.62 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度为0.246 t/hm<sup>2</sup>,各生物气候区平均碳密度 I > II > III > IV > V,整体呈现自东北向西南先降低后升高的趋势,但东部地区略高于西南部与青藏高原交界的高海拔丘陵地区。草地生态系统总碳密度变化范围为0.088—0.768 t/hm<sup>2</sup>,平均碳密度 0.316 t/hm<sup>2</sup>,在各区域间 I > II > II > IV > V,与森林生态系统相同,草地生态系统总碳密度

#### 空间格局与其土壤有机碳密度空间格局相似(图4)。



图 4 草地生态系统碳储量空间分布 Fig.4 Spatial distribution of carbon storages in grassland ecosystems of the Loess Plateau

# 2.4 农田生态系统碳储量现状及碳密度空间分布

农田生态系统仅占黄土高原地区总面积的 15%,主要分布在黄土高原东南部的关中平原地区、东部的汾 河流域地区以及黄土高原北部阴山以南的河套地区,其他地区分布较少且不集中。农田生态系统总碳储量约 为 0.21 Pg,占黄土高原总生态系统碳储量的 9%,各生物气候区农田土壤有机碳储量分别为 0.094(Ⅱ)、0.035 (Ⅱ)、0.04(Ⅲ)、0.023(Ⅳ)和 0.014 Pg(Ⅴ)。位于黄土高原东南的生物气候 I 区最大,西北部的生物气候 V 区最小,整体自东南向西北逐渐减小,但Ⅲ区略高于Ⅱ区。

农田生态系统土壤有机碳密度的变化范围为 0.049—0.374 t/hm<sup>2</sup>,平均值为 0.212 t/hm<sup>2</sup>,最高值出现 在生物气候 II 区,最低值出现在生物气候 IV 区,各生物 气候区的农田生态系统碳密度平均值分别为 0.224、 0.193、0.204、0.223 和 0.197 t/hm<sup>2</sup>, I > IV > III > V > II 。 其空间分布如图 5 所示,黄土高原南部秦岭北部的关中 平原地区以及黄土高原西南青海东部的丘陵地区碳密 度较高向北逐渐降低。

2.5 黄土高原不同碳库碳密度空间分布影响因素分析 黄土高原地区地上生物量碳密度随经度增加而极 显著增加,随着纬度升高,海拔升高而极显著减小(图
6);与年均温度和年均降水呈极显著正相关,且与年均
降水相关系数更高为 0.417,即不同空间位置温度越高





降水越多,地上植被生物量越大,地上生物量碳密度越高,但相对温度,地上生物量碳密度对降水的变化更为 敏感(图 6);与坡度坡向等地形因子相关关系不显著;与 NDVI 呈极显著正相关,相关系数较高为 0.394,即 NDVI 在很大程度上可反映地上植被碳密度高低(图 6);与土壤粘粒含量与粉粒含量呈极显著正相关,与砂粒 含量呈极显著负相关,其中与粉粒含量的相关系数最高为 0.228(图 6)。

黄土高原地区地下生物量碳密度随经度增加而极显著增加,随着纬度与海拔升高有略增加的趋势但不显 著(图 6);与年均温度和年均降水相关关系不显著,但存在随着年均温度增加而略减小,随着年均降水增加而 略增加的趋势(图 6);与地形因子坡向相关关系不显著,与坡度呈极显著正相关关系;与 NDVI 呈极显著正相 关;与土壤粘粒含量呈极显著正相关,与砂粒含量呈极显著负相关,与粉粒含量相关关系不显著(图 6)。

黄土高原地区 0—100 cm 土壤有机碳密度与经度纬度无显著相关关系,与海拔呈极显著正相关,即随着海拔升高,0—100 cm 土壤有机碳密度显著升高(图 6);与年均温度呈极显著负相关,与年均降水无显著相关 关系,但随年降水的增加有略减小的趋势;与地形因子坡向无显著相关关系,与坡度呈极显著正相关(图 6); 与 NDVI 呈极显著正相关;与土壤粘粒含量呈极显著正相关,与粉粒与砂粒含量无显著相关关系(图 6)。



#### 图 6 碳密度与各因子相关性

#### Fig.6 Correlation between carbon density and various factors

AGBC:地上生物量碳密度 Aboveground biomass carbon density; BGBC:地下生物量碳密度 Belowground biomass carbon density;SOC:土壤有机 碳密度 Soil organic carbon density; \* \* \*: P<0.001; \* \*: P<0.01; \* : P<0.05

路径分析结果表明,气候、海拔、地形、植被覆盖、土壤质地等因素均对黄土高原生态系统碳密度空间分布 有不同方式、不同程度的影响。各因子解释了12%的地上生物量碳密度空间变异(图7a),总作用系数由大到 小分别为海拔(-0.26)、NDVI(0.18)、年均降水(0.13)、粘粒含量(0.12)、坡度(0.10)、年均气温(0.02)、砂土 含量(-0.01),海拔的直接作用路径系数最高(-0.23),粘粒含量次之(0.11),气象因素中,年均降水较年均气 温作用更强。各因子对地下生物量碳密度空间变异的解释率为8%(图7b),总作用路径系数不同:年均气温 (-0.24)、NDVI(0.19)、年均降水(0.16)、海拔(0.15)、砂粒含量(-0.08)、粘粒含量(0.02),其中,气象因子年 均气温的直接路径系数(-0.21)以及总路径系数(-0.24)均为最大,NDVI(0.19)次之。非农田生态系统土壤 有机碳密度路径模型解释了其44%的空间变异(图7c),各因子总作用系数由大到小分别为年均降水(0.79)、 NDVI(0.35)、海拔(0.19)、地上生物量碳密度(-0.15)、粘粒含量(0.11)、地下生物量碳密度(0.11)、坡度 (0.06)、年均气温(0.05)、砂粒含量(-0.03),其中,海拔因子直接作用系数最高(0.76),其次为年均降水 (0.52),NDVI(0.43),地上生物量碳密度(-0.15),地下生物量碳密度(0.11)。农田生态系统土壤有机碳路径 模型可解释其空间变异的32%(图7d),纳入模型各因子主要为气象因子、土壤质地因子、以及海拔和地形因 子,各因子总作用系数由大到小分别为粘粒含量(0.72)、粉粒含量(-0.31)、海拔(0.07)、年均气温(0.07)、年 均降水(0.06)、坡度(0.04)。



#### 图 7 黄土高原不同碳库碳密度影响因子路径分析

#### Fig.7 Pathway analysis of carbon densities in different carbon pools on the Loess Plateau

AGBC:地上生物量碳密度 Aboveground biomass carbon density; BGBC:地下生物量碳密度 Belowground biomass carbon density;SOC:土壤有机 碳密度 Soil organic carbon density;实线和虚线分别表示正路径系数和负路径系数,线粗度表示路径系数相对大小;R<sup>2</sup>表示变量方差被解释 比例;\*\*\*:P<0.001;\*\*:P<0.001;\*\*:P<0.005

# 3 讨论

# 3.1 黄土高原地区生态系统碳储量的空间分布

本研究估算出黄土高原生态系统总碳储量约为 2.29 Pg(表 2),该估计值低于 Liu 等<sup>[15]</sup>利用 Invest 模型 估算的结果(3.96 Pg),主要由不同的估算方法所导致。本研究估算黄土高原森林生态系统平均碳密度约为 0.67 t/hm<sup>2</sup>,碳储量约为 0.98 Pg。高阳<sup>[31]</sup>对黄土高原典型自然林与人工林基于大量的样点调查进行估算的 碳密度以及牛春梅<sup>[32]</sup>对黄土高原中西部刺槐人工林碳密度进行的估算结果均远高于本研究估算结果。这种 估算结果的差异,一方面由于已有研究多基于单一流域、单一树种或典型森林进行的碳密度估算,所选样点并 不能代表整个黄土高原森林碳密度的平均水平。基于遥感解译的森林生态系统以及数据集收集的森林样点 中包含较多疏林地,郁闭度较低,碳密度显著低于典型森林;另一方面,本研究在对森林碳密度进行插值估算 时,将数据点极少且空间分布不均的灌木样点纳入森林生态系统,而灌木生物量显著低于典型高大乔木林,会 对整体插值结果造成一定影响,使估算结果偏低。本研究中,黄土高原草地生态系统碳储量约为1.07 Pg,这 一结果低于 Wang 等<sup>[14]</sup>的研究结果(1.46 Pg),但高于程积民等<sup>[33]</sup>的研究结果(0.57 Pg),造成这一差异的原 因更多来源于采样时间的不同,随着一系列生态恢复措施在黄土高原的实施,黄土高原草地植被覆盖度固碳 能力显著提高,固碳量增加<sup>[8]</sup>。本研究中,黄土高原地区农田生态系统平均碳密度约为0.212 t/hm<sup>2</sup>,碳储量 约为0.21 Pg,该结果低于张圣民<sup>[18]</sup>的研究结果(0.227 t/hm<sup>2</sup>,0.45 Pg)以及 Tang 等<sup>[34]</sup>的研究结果(0.54 Pg), 评估结果的不一致主要来源于碳储量估算的源数据和估算方法的不同。

现有研究对于区域植被碳储量的大尺度估算多基于国家清查资料、多源遥感数据建模或生态系统模型, 如 InVest 模型<sup>[35]</sup>,部分研究基于区域大量实测样点通过算术平均对区域植被及土壤碳密度碳储量进行估算, 但碳密度在区域内的分布是一个连续变化的曲面,基于样点对区域碳密度的进行直接估算时,对其空间分布 要求较高,采样点分布的均匀程度决定着采样点对于区域整体的代表性。相比前人研究,本研究基于大量实 测样点数据进行克里金空间插值,将大量的一维点数据插值到整个区域,形成空间二维连续面数据,基于面栅 格数据对各区域碳密度碳储量进行了更准确的统计估算,避免了结合各因子模型模拟以及样点不均匀带来的 高不确定性。但克里金插值方法也存在一定的不确定性,该地统计插值方法为模拟出一个连续变化曲面存在 对空间不同位置碳密度低值预测偏高,高值预测偏低的现象,导致预测变化范围小于实际变化范围,但对整体 均值影响较小,此外,由于数据获取困难及大部分农田植被的人工定期收获,本研究对于生态系统碳储量的估 算不包括凋落物以及农田生物量部分,这会对生态系统碳储量估算造成不同程度的影响,使估算结果较其他 研究整体偏低。

3.2 黄土高原地区生态系统碳储量空间分布的影响因素

由于经纬度与地形的不同,直接或间接决定了黄土高原降水、温度等气象因子以及土壤质地的空间分异, 气候及地形因子很大程度上决定着陆地植被生产力以及生物群落组成,土壤质地的不同也会对土壤的水、热、 气、养分的分配与循环有不同程度的作用<sup>[36]</sup>,进而影响植被生长与土壤有机碳的矿化,从而对生态系统生物 量碳与土壤有机碳的空间格局进行调控。相关分析以及路径分析结果表明,气候(年均温度、年均降水)、海 拔、地形(坡度)、土壤质地、植被覆盖状况对黄土高原不同碳库碳密度空间格局均有不同程度影响,其中气候 以及土壤质地是最重要的影响因素。在黄土高原区域尺度上,温度和降水具有明显的空间分布特征,均呈自 东南向西北逐渐降低的趋势,这与黄土高原植被碳密度空间格局相似。温度和降水决定着不同地理位置水热 条件,通过对植被光合作用净初级生产力的影响,对黄土高原植被的空间分布进行调控<sup>[25]</sup>,本研究结果显示, 较温度而言,降水对地上生物量碳密度的影响更为显著,这与辛晓平<sup>[37]</sup>等的研究结果相同,在干旱半干旱的 黄土高原地区,降水作为土壤水分的唯一来源,是限制植被生产力的主要因素,较高的降水量会导致植被生产 力的增加,从而导致植物生长密度的增加,植被生物量碳密度的增加。土壤有机碳密度高低取决于有机质输 人与输出分解之间动态平衡关系,随着降雨量增加、温度升高,地上植被和地下根系生物量增加,土壤有机质 主要输入物质凋落物和根系沉积物增加,但土壤微生物活性也相应提高,有机质分解速率也相应加快<sup>[38,39]</sup>, 总体而言,黄土高原地区降水及温度对土壤有机碳密度具有正效应,即自西北向东南降雨量与温度增加,凋落 物以及根系对土壤有机质的输入量大于其矿化分解量,这一研究结果与 Nie<sup>[38]</sup>,Chen等<sup>[40]</sup>研究结果相同。

在较小的地理单元内,海拔,坡度等因子也显著影响着植被及土壤有机碳密度。海拔控制着局地温度与 降水的梯度变化,直接或间接影响着生态系统碳密度<sup>[41]</sup>。随着海拔升高,温度不断降低,一方面会限制植被 的生长,另一方面,也会限制土壤有机碳的分解,有利于其积累。路径分析结果显示,随着海拔的升高,地上生 物量碳密度显著降低,地下生物量碳密度升高,这一现象可用植被的垂直地带性分异解释,随着海拔升高,气 温下降,降雨量减少,植被类型多从乔木林向灌木林草地过渡,植被地下根系更为发达;随着海拔升高,非农田 土壤有机碳与农田土壤有机碳密度均增加,这一结论与唐朋辉<sup>[42]</sup>Tashi 等<sup>[43]</sup>的研究结果相同。坡度作为重 要的地形指标不仅代表着地表倾斜程度,也影响着植被分布、植被碳密度与土壤有机碳密度。本研究结果表 明,地上生物量碳密度与土壤有机碳密度均呈随坡度增大略增加的趋势,生物量较高的森林多分布在黄土高 原东南与东部高山丘陵区,自东南向西北地势逐渐平缓,植被逐渐从半湿润森林、半湿润半干旱林草区向荒漠 草地、干旱荒漠区过渡,植被生物量与土壤有机碳含量均降低。

除气候与地形因子外,不同碳库碳密度空间格局均可不同程度地被土壤质地颗粒组成解释,其中,粘粒含量对各碳库碳密度均具有正效应,对农田土壤有机碳的总作用系数最大,这一结果与已有研究结果相同<sup>[4445]</sup>。Ge 等<sup>[44]</sup>的研究显示农田以及森林生态系统中较好的土壤质地即较高的粘粒与粉粒含量,土壤有机碳含量更高;Liu 等<sup>[45]</sup>对黄土高原大量样点分析结果显示土壤有机碳含量随土壤粘粒粉粒含量的增加而增加。土壤颗粒组成以粒径较小的粘粒和粉粒为主时,土壤颗粒具有较大的表面积,使土壤中有机质更易与其结合,形成各粒径土壤团聚体,对有机质形成物理保护作用,减缓土壤有机质在微生物作用下的分解<sup>[36]</sup>。与地上生物量碳密度与土壤有机碳密度相比,地下生物量碳密度路径模型解释率较低。黄土高原分布最广泛的生态系统为草地生态系统,有研究表示,与地上植被相比,草地根系周转周期较长,可达数十年,因此,地下生物量碳库的空间格局动态机理更为复杂<sup>[37]</sup>。

3.3 黄土高原地区生态系统碳储量与全国平均水平的比较

黄土高原地区约占我国陆地总面积的 6.7%, 生态系统总碳储量约为 2.29 Pg, 仅占我国陆地生态系统碳 储量<sup>[20]</sup>(99.15 Pg)的 2.3%。黄土高原平均植被碳密度约为 0.155 t/hm<sup>2</sup>, 略低于全国平均植被碳密度(0.158 t/hm<sup>2</sup>), 平均土壤有机碳密度约为 0.261 t/hm<sup>2</sup>, 也低于全国平均水平 0.913 t/hm<sup>2</sup>。虽经过退耕还林(草)等一 系列的生态恢复措施的实施,黄土高原植被覆盖率显著上升,固碳量有所增加,但整个生态系统碳密度水平仍 远低于我国平均水平。未来研究应着力于结合多因子探明黄土高原地区不同碳库不同区域固碳潜力,对黄土 高原地区不同生物气候区制定不同生态管理措施,如对于温度降水条件较好,植被碳密度较高的生物气候 I 区,应着重保护或加大植树造林力度,对于植被碳密度较低但土壤有机碳密度较高,生物气候 I 区,应着重保护或加大植树造林力度,对于植被碳密度较低但土壤有机碳,并增强自然保护措施,增加植被碳 密度。本研究为黄土高原地区提供了可靠的碳储量现状评估数据,并揭示了黄土高原地区各碳库碳密度的空 间格局影响因素,对于黄土高原地区固碳效益的提高,在未来气候变化的背景下为全球碳平衡做出更大 贡献。

# 4 结论

黄土高原地区总碳储量约为 2.29 Pg, 植被与土壤有机碳密度均低于全国平均水平,森林、草地、农田生态 系统碳储量分别占总碳储量的 43%,48%,9%。地上生物量碳储量,地下生物量碳储量,土壤有机碳储量分别 占总生态系统碳储量的 19%、14%和 67%。各碳库组分碳密度均存在较强的空间变异性,大致呈自东南向西 北逐渐减小的趋势。气象、地形、土壤质地、植被覆盖状况等因子中,年均降水、海拔、粘粒含量是影响碳密度 空间格局的重要因素。未来应针对不同地区碳储量背景以及不同环境条件采取不同的区域管理措施,以提高 黄土高原地区生态系统碳储量。另外,本研究仅包含了黄土高原森林(含灌木)、草地和农田生态系统,且不 同尺度的数据提取存在一定的误差,未来应纳入更多的生态系统类型,如湿地等,结合更多环境因子,使用更 加精确的估算方法,如结合辅助变量的插值方法等,降低研究的不确定性,更准确地对黄土高原碳储量进行 评估。

#### 参考文献(References):

- [1] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. Global Change Biology, 2005, 11(6): 945-958.
- [2] Fang J Y, Kato T, Guo Z D, Yang Y H, Hu H F, Shen H H, Zhao X, Kishimoto-Mo A W, Tang Y H, Houghton R A. Evidence for environmentally enhanced forest growth. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(26): 9527-9532.
- [3] 王秋凤,郑涵,朱先进,于贵瑞. 2001-2010年中国陆地生态系统碳收支的初步评估. 科学通报, 2015, 60(10): 962-962.

- [4] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 尹礼唱, 于丹丹. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值. 地理学报, 2020, 75(5): 949-960.
- [5] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land use conversion and changing soil carbon stocks in China's 'Grain for Green' Program: a synthesis. Global Change Biology, 2014, 20(11): 3544-3556.
- [6] 刘国彬,上官周平,姚文艺,杨勤科,赵敏娟,党小虎,郭明航,王国梁,王兵.黄土高原生态工程的生态成效.中国科学院院刊,2017, 32(1):11-19.
- [7] Lü Y H, Fu B J, Feng X M, Zeng Y, Liu Y, Chang R Y, Sun G, Wu B F. A Policy-Driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. PLoS One, 2012, 7(2): e31782.
- [8] Wang K B, Deng L, Ren Z P, Shi W Y, Chen Y P, Guan Z S. Dynamics of ecosystem carbon stocks during vegetation restoration on the Loess Plateau of China. Journal of Arid Land, 2016, 8(2); 207-220.
- [9] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau, China. Scientific Reports, 2014, 4: 7039.
- [10] Li J W, Li M Y, Dong L B, Wang K B, Liu Y L, Hai X Y, Pan Y J, Lü W W, Wang X Z, Shangguan Z P, Deng L. Plant productivity and microbial composition drive soil carbon and nitrogen sequestrations following cropland abandonment. Science of the Total Environment, 2020, 744: 140802.
- [11] Wang Y F, Fu B J, Lü Y H, Chen L D. Effects of vegetation restoration on soil organic carbon sequestration at multiple scales in semi-arid Loess Plateau, China. Catena, 2011, 85(1): 58-66.
- [12] 薛志婧,马露莎,安韶山,王万忠.黄土丘陵区小流域尺度土壤有机碳密度及储量.生态学报,2015,35(9):2917-2925.
- [13] 杨晓梅, 程积民, 孟蕾, 韩娟娟. 黄土高原子午岭森林碳储量与碳密度研究. 水土保持学报, 2010, 24(6): 123-126, 131-131.
- [14] Wang Y Y, Deng L, Wu G L, Wang K B, Shangguan Z P. Estimates of carbon storage in grassland ecosystems on the Loess Plateau. Catena, 2018, 164: 23-31.
- [15] Liu G H, Zhao Z H. Analysis of carbon storage and its contributing factors—a case study in the Loess Plateau (China). Energies, 2018, 11 (6): 1596.
- [16] Wang Y Y, Deng L, Wu G L, Wang K B, Shangguan Z P. Large-scale soil organic carbon mapping based on multivariate modelling: the case of grasslands on the Loess Plateau. Land Degradation & Development, 2018, 29(1): 26-37.
- [17] 程积民,程杰,杨晓梅,刘伟,陈芙蓉.黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征.生态学报,2012,32(1):226-237.
- [18] 张圣民. 黄土高原农田土壤有机碳储量及固碳能力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [19] Tang X L, Zhao X, Bai Y F, Tang Z Y, Wang W T, Zhao Y C, Wan H W, Xie Z Q, Shi X Z, Wu B F, Wang G X, Yan J H, Ma K P, Du S, Li S G, Han S J, Ma Y X, Hu H F, He N P, Yang Y H, Han W X, He H L, Yu G R, Fang J Y, Zhou G Y. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [20] Xu L, Yu G R, He N P, Wang Q F, Gao Y, Wen D, Li S G, Niu S L, Ge J P. Carbon storage in China's terrestrial ecosystems: a synthesis. Scientific Reports, 2018, 8: 2806.
- [21] Vaughan E, Matos M, Ríos S, Santiago C, Marín-Spiotta E. Clay and climate are poor predictors of regional-scale soil carbon storage in the US Caribbean. Geoderma, 2019, 354: 113841.
- [22] Zhu Y J, Jia X X, Shao M A. Loess thickness variations across the Loess Plateau of China. Surveys in Geophysics, 2018, 39(4): 715-727.
- [23] 高海东,李占斌,李鹏,贾莲莲,徐国策,任宗萍,庞国伟,赵宾华.基于土壤侵蚀控制度的黄土高原水土流失治理潜力研究.地理学报, 2015,70(9):1503-1515.
- [24] 杨艳芬, 王兵, 王国梁, 李宗善. 黄土高原生态分区及概况. 生态学报, 2019, 39(20): 7389-7397.
- [25] Feng X M, Fu B J, Lu N, Zeng Y, Wu B F. How ecological restoration alters ecosystem services: an analysis of carbon sequestration in China's Loess Plateau. Scientific Reports, 2013, 3: 2846.
- [26] 朱源, 刘宇, 赵亮. 2015 年黄土高原地区土地利用/覆被栅格数据. (2017-05-07). http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/404.
- [27] 徐丽,何念鹏,于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集. (2018-05-20). http://www.sciencedb.cn/dataSet/handle/603.
- [28] Zhang Z M, Zhou Y C, Huang X F. Applicability of GIS-based spatial interpolation and simulation for estimating the soil organic carbon storage in karst regions. Global Ecology and Conservation, 2020, 21: e00849.
- [29] Wen W, Wang Y F, Yang L, Liang D, Chen L D, Liu J, Zhu A X. Mapping soil organic carbon using auxiliary environmental covariates in a typical watershed in the Loess Plateau of China: a comparative study based on three kriging methods and a soil land inference model (SoLIM). Environmental Earth Sciences, 2015, 73(1): 239-251.
- [30] Long J, Liu Y L, Xing S H, Zhang L M, Qu M K, Qiu L X, Huang Q, Zhou B Q, Shen J Q. Optimal interpolation methods for farmland soil organic matter in various landforms of a complex topography. Ecological Indicators, 2020, 110: 105926.

- [31] 高阳. 黄土高原地区林草生态系统碳密度和碳储量研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [32] 牛春梅,关晋宏,程然然,李国庆,吴春荣,程积民,杜盛.黄土高原中西部刺槐人工林生态系统碳密度及其影响因子.生态学报,2017, 37(15):5049-5058.
- [33] 程积民,程杰,杨晓梅.黄土高原草地植被与土壤固碳量研究.自然资源学报,2011,26(3):401-411.
- [34] Tang Z, Nan Z B. The potential of cropland soil carbon sequestration in the Loess Plateau, China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2013, 18(7): 889-902.
- [35] Sun Y R, Zhu J J, Yan Q L, Hu Z B, Zheng X. Changes in vegetation carbon stocks between 1978 and 2007 in central Loess Plateau, China. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(4): 312.
- [36] 王春燕,何念鹏,吕瑜良.中国东部森林土壤有机碳组分的纬度格局及其影响因子.生态学报,2016,36(11):3176-3188.
- [37] 辛晓平,丁蕾,程伟,朱晓昱,陈宝瑞,刘钟龄,何广礼,青格勒,杨桂霞,唐华俊.北方草地及农牧交错区草地植被碳储量及其影响因素.中国农业科学,2020,53(13):2757-2768.
- [38] Nie X Q, Yang L C, Li F, Xiong F, Li C B, Zhou G Y. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the alpine shrubland in the Three Rivers Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau. Catena, 2019, 178: 154-162.
- [39] Ou Y, Rousseau A N, Wang L X, Yan B X. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors-a case study of the Black Soil Region of Northeastern China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 245: 22-31.
- [40] Chen L F, He Z B, Du J, Yang J J, Zhu X. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. Catena, 2016, 137: 37-43.
- [41] Yuan Z Q, Fang C, Zhang R, Li F M, Javaid M M, Janssens I A. Topographic influences on soil properties and aboveground biomass in lucernerich vegetation in a semi-arid environment. Geoderma, 2019, 344: 137-143.
- [42] 唐朋辉, 党坤良, 王连贺, 马俊. 秦岭南坡红桦林土壤有机碳密度影响因素. 生态学报, 2016, 36(4): 1030-1039.
- [43] Tashi S, Singh B, Keitel C, Adams M. Soil carbon and nitrogen stocks in forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas and a meta
   analysis of global data. Global Change Biology, 2016, 22(6): 2255-2268.
- [44] Ge N N, Wei X R, Wang X, Liu X T, Shao M A, Jia X X, Li X Z, Zhang Q Y. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorous under two contrasting land use types in the Loess Plateau. Catena, 2019, 172; 148-157.
- [45] Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 142(3-4): 184-194.