



中国北方旱作农田 土壤有机碳

刘恩科 张燕卿 严昌荣 梅旭荣 等◎著

 科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

中国北方旱作农田土壤有机碳

刘恩科 张燕卿 严昌荣 梅旭荣 等◎著

出版者 中国科学技术文献出版社
地址 北京市西城区德胜大街13号 邮编 100028
电话 (010) 28823828, 28823827 (传真)
发行部 (010) 28823828, 28823870 (传真)
编辑部 (010) 28823873
网址 www.stdp.com.cn
类别 农业科技文献出版社
印数 北京或各分社
开本 2012年4月第1版
开本 710×1000 1/16
字数 200千字
定价 12.2元
书号 ISBN 978-7-302-58120-2
定价 68.00元



科学技术文献出版社
SCIENTIFIC AND TECHNICAL DOCUMENTATION PRESS

北京·中国

图书在版编目 (CIP) 数据

中国北方旱作农田土壤有机碳 / 刘恩科等著. —北京: 科学技术文献出版社, 2019. 4

ISBN 978-7-5023-9632-9

I. ①中… II. ①刘… III. ①旱作土壤—土壤有机质—有机碳—研究—中国
IV. ①S153.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 290350 号

中国北方旱作农田土壤有机碳

策划编辑: 丁坤善 责任编辑: 刘 亭 责任校对: 张叫咪 责任出版: 张志平

出 版 者 科学技术文献出版社
地 址 北京市复兴路15号 邮编 100038
编 务 部 (010) 58882938, 58882087 (传真)
发 行 部 (010) 58882868, 58882870 (传真)
邮 购 部 (010) 58882873
官 方 网 址 www.stdp.com.cn
发 行 者 科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销
印 刷 者 北京虎彩文化传播有限公司
版 次 2019年4月第1版 2019年4月第1次印刷
开 本 710×1000 1/16
字 数 200千
印 张 15.5
书 号 ISBN 978-7-5023-9632-9
定 价 68.00元

版权所有 违法必究

购买本社图书, 凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

《中国北方旱作农田土壤有机碳》

著者名单

(按姓氏笔画排序)

王健波	冯良山	宁平	朱新梦
刘爽	刘勤	刘恩科	严昌荣
何文清	张恒恒	张燕卿	陈保清
郝卫平	高翔丁	梅旭荣	樊廷录

前 言

本书是依托国家科技支撑计划、国家自然科学基金等项目，在北方旱作农田土壤有机碳多年研究工作的基础上，对研究工作进行的系统性和阶段性总结，内容主要反映了旱作节水团队近年来旱作农业研究中独具特色的部分，包括：北方旱作农田土壤有机碳储量变化趋势、不同管理措施对土壤有机碳的影响、旱作农田土壤有机碳影响机制、干湿交替土壤有机碳的变化及影响机制、北方旱作农田碳足迹评价、旱作农田有机碳提升技术。

中国是一个旱区农业比重很大的国家，其土地面积约占国土陆地面积的56%，在北方旱区，旱作耕地约占全国耕地面积的38%。水资源短缺和土壤退化是影响北方旱区农业可持续发展与生态环境安全的关键因素，提升该区域土壤有机碳水平是提高土壤生产力和减缓全球变暖“双赢”的关键，同时有机碳的提升还可提高土壤蓄水和保水能力。研究北方旱作农田土壤有机碳对保障国家粮食安全、保护生态环境具有重要意义，该研究成果可为北方旱区农田土壤碳管理提供理论和技术支持。

本书是国内首部关于北方旱作农田有机碳提升和管理研究的系统性学术著作。本书是一部科学认识我国北方典型旱作农田有机碳收支现状与潜力的、科学性强的现代技术明显的、能够用于指导北方旱作农田土壤有机碳提升研究的参考书。本书主要创新之处：①系统分析北方旱区

耕层土壤有机碳及其储量的变化趋势；②利用长期定位试验分析施肥、耕作等措施对有机碳及其组分变化的影响；③利用稳定同位素技术、分子生物学技术等分析了外源有机碳的去向、分配规律和有机碳的微生物学影响机制。

本书主要包括6方面的内容：①通过第二次土壤普查资料、实地监测数据和已发表的文献，系统分析我国北方旱作农田自第二次土壤普查后30年，耕层土壤有机碳及其储量的分布和变化特征；②利用30年的长期肥料定位试验和20年的保护性耕作试验，系统分析了不同施肥、耕作等措施对土壤有机碳及其组分变化的影响；③从团聚体物理保护机制、微生物学机制分析有机碳变化的影响机制，并从水温等外部条件分析对有机碳的影响机制；④重点分析北方旱区干湿交替对有机碳的影响机制，利用稳定同位素技术分析干湿交替条件下外源有机碳对本底有机碳的激发和转化的影响；⑤从碳足迹的角度，分析不同耕作措施碳的流向；⑥对北方旱作农田有机碳的提升提出建议和意见。

本书的研究成果得到了国家自然科学基金项目(No.31170490, No.31470556, No.31000253)、“十二五”国家科技支撑计划项目(No.2012BAD09B01)等科研项目的资助，特此致谢！

本书可供旱作农业、土壤学、环境学、生物学和全球变化等专业的科研、教学人员及大学生、研究生参考。

本书内容涉及微观和宏观两方面，以及多年的研究工作，遗漏及不足之处在所难免，在共同分享这一成果的同时，敬请读者提出宝贵意见与建议，让我们共同为旱区农业研究做出更大贡献。

目 录

第 1 章 中国北方旱作农田土壤有机碳变化	1
1.1 材料与方法	3
1.2 结果与分析	5
1.3 讨论	12
1.4 结论	14
参考文献	15
第 2 章 农业管理措施对土壤有机碳的影响	21
2.1 长期施肥对土壤有机碳的影响	24
2.2 耕作方式对土壤有机碳的影响 (春玉米)	36
2.3 免耕对土壤有机碳的影响 (冬小麦)	51
2.4 地膜对土壤有机碳的影响	65
参考文献	72
第 3 章 旱作农田有机碳影响机制	82
3.1 团聚体保护机制	88
3.2 生物学机制	117
3.3 水分和温度对有机碳的影响	135
参考文献	142

第4章 干湿交替条件下秸秆还田对土壤有机碳的激发效应	149
4.1 材料与amp;方法	152
4.2 结果与分析	157
4.3 讨论	163
4.4 结论	168
参考文献	168
第5章 北方旱作农田碳足迹评价	177
5.1 碳足迹国际度量评价标准与碳中和	179
5.2 碳足迹的分析方法与评价过程	187
5.3 旱作农田不同耕作系统的碳足迹评价实例	203
参考文献	216
第6章 提升有机碳水平的技术选择	226
6.1 施肥技术与秸秆还田	227
6.2 耕作措施	231
6.3 未来旱作土壤可能的固碳模式——农业废弃物多级利用与复种 作物相结合	233
参考文献	235
附录	237

第1章 中国北方旱作农田土壤有机碳变化

内容提要：旱作农田是我国北方地区的重要农业生态系统之一，其分布面积达6.683亿亩^①（2010年统计年鉴），占到北方耕地总面积的64.06%，然而关于我国北方旱作农田土壤有机碳密度和碳储量的空间分布及其随时间的变化尚未得到相关研究。本章利用我国第二次土壤普查和我国旱作农田的分布数据对我国北方旱区农田20世纪80年代的表层土壤有机碳密度和储量进行计算，并结合近年来相关文献对自20世纪80年代以来到21世纪10年代我国北方旱区农田的表层土壤有机碳变化进行估算。研究表明，20世纪80年代我国北方旱作农田土壤碳密度以东北地区最高，达到4.25 kg/m²，以西北地区最低，为2.04 kg/m²，华北地区居中，为2.29 kg/m²，我国北方旱作农田平均值为3.06 kg/m²，高于我国水稻土和南方旱田的估计值。20世纪80年代，我国北方旱作农田的碳储量总和为1.36 Pg，其中东北地区的旱作农田表层土壤碳储量最高，占北方地区的57.65%，华北地区占30.59%，而西北地区最低，占11.76%。经过30年，我国北方旱作农田土壤碳储量升高至1.443 Pg，比20世纪80年代升高0.083 Pg，升高幅度为6.1%，东北地区、华北地区和西北地区的碳储量的变化幅度依次为-12.96%、10.96%、2.00%，这表明，在过去30年东北地区旱作农田在碳循环中发挥碳源作用，西北和华北地区发挥碳汇作用，而北方旱作农田整体上发挥碳汇作用。

^① 1亩≈666.67 m²。

土壤储存着高达 1500 Pg 的有机碳 (SOC), 是大气碳库的 3 倍、陆地生物量碳的约 2.5 倍, 土壤碳通过呼吸的 CO_2 排放是决定陆地生态系统碳平衡的主要因子 (Valentini, 2000; Jenkinson, 1991), 与大气 CO_2 的交换速度 (Trumbore, 1996) 有关。因此, 土壤碳库的稳定、增长或释放都与大气库的变化有重要的关系, 土壤能否增加碳储存是关系陆地生态系统继续发挥对大气 CO_2 的吸收与固定的汇效应的重要理论基础, 因而这一问题已成为 20 世纪 90 年代末以来土壤与全球变化研究的重点和热点科学问题。

在全球陆地生态系统中, 农田生态系统土壤碳库受到强烈的人为干扰, 同时又可以在较短的时间尺度上进行人为调节。开垦荒地和土壤翻耕加剧营养元素的流失、土壤结构的破坏, 同时消耗土壤有机碳。目前土壤开垦已使土壤有机碳减少了 30% ~ 50% (Somebroek et al., 1993; Burke et al., 1995), 全球每年因耕作损失的碳为 0.8 Gt, 大部分以 CO_2 的形式释放到大气中, 农业土壤对大气中温室气体 (Greenhouse Gas, GHG) 累积贡献则占人类活动释放到大气中 CO_2 的 1/4 (Aguila et al., 1988; IPCC, 1996)。农业土壤已被认同是大气中 CO_2 的一个重要碳源。

耕地表层土壤则是人为因素作用的直接对象, 也是直接与陆地生态系统碳循环相动态耦合的, 它活跃地响应环境变化。目前已有国家发表了表层土壤有机碳库的估计, 作为国家制定温室气体排放清单和推行固碳生产技术的依据 (Arrouays, 2002)。我国北方地区 (东北、西北、华北, 按《中国土种志》划分) 有机碳储量占全国土壤有机碳总储量的 71.6%, 占全国土壤表层有机碳储量的 73.8% (潘根兴, 1999)。与南方地区不同, 旱地在我国北方地区分布较广, 而且在我国北方 10.43 亿亩耕地中, 旱地耕地面积达 6.683 亿亩, 占北方耕地总面积的 64.06%。相比于降水较多和人工灌溉耕地, 旱地土壤通常表现为降水较少, 土壤水分不足, 不利于有机碳的矿化分解, 但同时也因为具有相对较低的生物产量, 而限制了作物通过根系分泌物和残茬对土壤有机碳输入。关于我

国北方旱区农田表层土壤有机碳的储量, 以及在近 30 年以来的变化尚未得到相关研究与验证。

基于此, 本章利用我国第二次土壤普查的相关数据对我国北方旱区农田 20 世纪 80 年代的表层土壤有机碳密度和储量进行计算, 并结合近年来相关文献对自 20 世纪 80 年代以来到 21 世纪 10 年代我国北方旱区农田的表层土壤有机碳变化进行估算。

1.1 材料与方 法

1.1.1 20 世纪 80 年代北方旱地表层土壤有机碳估算

本书所指的北方地区包括 3 个区域: 东北地区 (黑龙江、吉林、辽宁), 华北地区 (山东、山西、河南、河北、内蒙古、北京、天津) 和西北地区 (新疆、宁夏、青海、甘肃、陕西)。用于计算 SOC 密度的数据来源于在 20 世纪 80 年代早期完成的第二次土壤普查, 相关的数据来源于《中国土种志》第二卷 (东北地区)、第四卷 (华北地区) 和第五卷 (西北地区)。在每卷中, 各土种的土壤类型、分布面积、耕地面积、剖面划分、理化性质等信息被提供。

本章首先对各地区的土种进行筛选, 以《中国土种志》的土种信息和我国旱地的分布区域为参考, 对林地、草地、荒地和水稻土进行剔除, 得到北方旱作农田的各土种信息。在各旱地耕地各土种中, SOC 含量通过 SOM (土壤有机质) 含量乘以转化系数 0.58 得到。计算各土种的碳密度时采用的公式如下:

$$D_{oc1} = SOC_i \times \gamma_i \times H_i \times (1 - \delta_{2\text{mm}}/100) \times 10^{-1} \quad (1-1)$$

其中, D_{oc1} 和 SOC_i 分别是有机碳密度 ($\text{Mg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 与含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), γ_i 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H_i 是土壤厚度 (cm), $\delta_{2\text{mm}}$ 为土壤中粒径 > 2 mm 的沙砾。由于部分土壤缺乏容重数据, 所以这部分土壤的容重用北方旱作农田表层土壤的土壤有机质和容重之间的关系 (图 1-1) 进行估算。

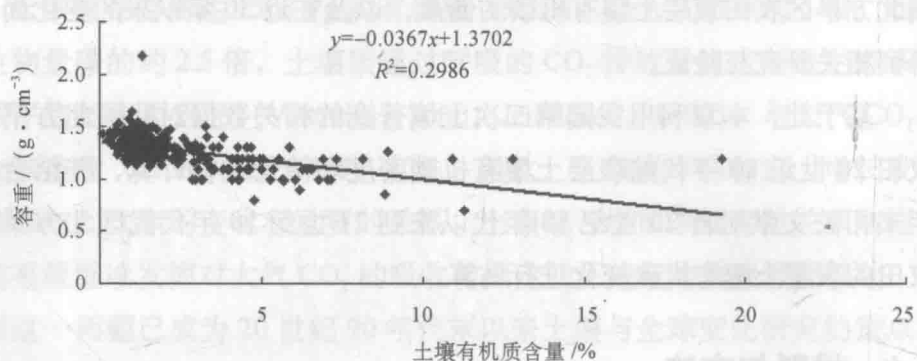


图 1-1 我国北方旱作农田土壤有机质含量与容重关系

在计算得到各土种的有机碳密度后，分别以该土种的耕地面积为权重，计算出土种所属亚类的表层土壤平均碳密度，同理，对各土类和区域的表层土壤平均碳密度进行计算。

1.1.2 近 30 年来北方旱作农田表层土壤有机碳变化

为计算我国近 30 年来北方旱作农田表层土壤有机碳变化，本文对 2005—2013 年发表的有关土壤质量和土壤肥力的文献进行筛选，筛选的原则为：①文献所研究的区域至少以县为单位；②文献所采取的研究方法与第二次土壤普查具有可比性；③同一研究区域选择研究年份较晚的文献。经过筛选，共筛选出符合条件的 53 篇文献（见附录）。

由于各文献对土壤有机碳测定的时间不同，为使得不同研究区域具有可比性，首先通过有机碳变化量和取样年份距 20 世纪 80 年代取样时间的年份之间的比值，计算出该地区有机碳的年均变化率，然后乘以 30 年得到该地区 30 年的变化率。以 30 年变化率分别乘以有机碳密度和有机碳储量分别得到其变化量。在计算区域碳密度和碳储量变化时，区域内不同地区以其旱地面积为权重加权得到区域的碳密度和碳储量变化量。

1.2 结果与分析

1.2.1 我国北方地区旱作农田分布

如表 1-1 所示, 20 世纪 80 年代, 我国华北地区、西北地区和东北地区的旱作农田所占农田的比例分别为 54.17%、54.43% 和 86.04%, 3 个地区旱地面积占北方旱作农田总面积的比例分别为 40.88%、17.68% 和 41.45%。其中, 华北地区以山西、内蒙古和河南的旱地所占比例较高, 其他省份都在 50% 以下; 西北地区新疆旱地所占比例较低, 仅为 4.94%, 而其他省份均在 60% 以上; 东北三省的旱地所占比例则均在 80% 以上。综合来看, 我国北方地区旱作农田面积达到 6.683 亿亩, 所占农田的比例达到 64.06%。

表 1-1 我国北方各地区旱作农田分布面积

地区	省(自治区、直辖市)	农田面积 / 亿亩	旱作农田面积 / 亿亩	旱地占农田比例
华北地区	山东	1.126	0.428	37.97%
	河南	1.189	0.609	51.25%
	北京	0.035	0.007	20.35%
	天津	0.067	0.026	38.88%
	河北	0.947	0.399	42.07%
	山西	0.608	0.474	77.92%
	内蒙古	1.072	0.790	73.68%
	总计	5.044	2.732	54.17%
西北地区	陕西	0.607	0.447	73.60%
	甘肃	0.699	0.545	77.97%
	青海	0.081	0.054	65.93%
	宁夏	0.166	0.105	63.51%
	新疆	0.617	0.030	4.94%
	总计	2.171	1.181	54.43%
东北地区	辽宁	0.613	0.493	80.38%
	吉林	0.830	0.714	86.05%
	黑龙江	1.776	1.563	87.99%
	总计	3.219	2.770	86.04%
总计		10.433	6.683	64.06%

1.2.2 我国北方旱作农田碳密度及碳储量分布

如表 1-2 所示, 20 世纪 80 年代, 我国北方旱作农田表层土壤碳密度以东北地区最高, 达到 $4.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 以西北地区最低, 为 $2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 华北地区居中, 为 $2.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 东北地区分别比华北和西北地区高 85.59% 和 108.33%, 北方旱作农田的平均值为 $3.06 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。我国北方旱作农田的碳储量总和为 1.36 Pg, 其中东北地区的旱作农田表层土壤碳储量最高, 占到北方地区的 57.65%, 华北地区占 30.59%, 而西北地区最低, 占 11.76%。

表 1-2 我国北方旱作农田表层土壤碳密度和碳储量分布

地区	省 (自治区、直辖市)	旱作农田 土壤面积 / 亿亩	碳密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)	碳储量 /Pg
东北地区	黑龙江、吉林、辽宁	2.770	4.25	0.784
华北地区	山东、山西、河南、河北、 北京、天津、内蒙古	2.732	2.29	0.416
西北地区	新疆、青海、宁夏、甘肃、 陕西	1.181	2.04	0.160

1.2.3 各区域不同旱作农田土壤类型碳分布差异

1.2.3.1 东北地区

图 1-2 为东北地区各土壤类型的平均碳密度, 从图中可以看出, 东北地区旱作农田土壤中碳密度最高的为泥炭土, 达 $8.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 碳密度最低的为棕壤, 为 $1.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其他各土壤类型的平均碳密度大小分别为沼泽土 ($7.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 白浆土 ($6.23 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑土 ($5.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑钙土 ($4.59 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暗棕壤 ($4.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 新积土 ($3.66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 草甸土 ($3.56 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 栗钙土 ($2.97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 风沙土 ($2.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 潮土 ($1.95 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕壤 ($1.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。就各土壤类型表层碳储量来看, 占总碳储量较高比例的土壤为黑土

(36.59%)、草甸土 (15.05%)、黑钙土 (14.37%)、白浆土 (11.43%)，4 种土壤占区域总碳储量的 77.44%，其他土壤类型碳储量占东北地区碳储量的比例均小于 10% (图 1-3)。

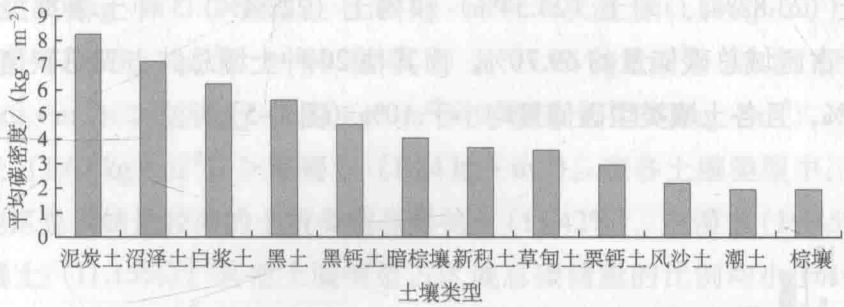


图 1-2 东北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳密度

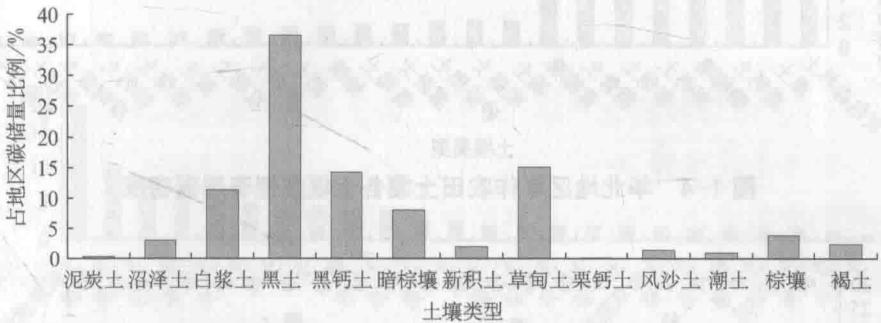


图 1-3 东北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳储量占总碳储量的比例

1.2.3.2 华北地区

如图 1-4 所示，华北地区旱作农田表层土壤碳密度最高的土壤类型为灰色森林土 ($10.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)，最低的为滨海盐土 ($0.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)，其他土壤类型的表层土壤碳密度大小依次为黑土 ($7.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑钙土 ($7.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 暗棕壤 ($5.93 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 栗钙土 ($5.37 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 草甸土 ($4.76 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 粗骨土 ($4.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黄棕壤 ($3.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 褐土 ($1.96 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 栗褐土 ($1.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 砂姜黑土 ($1.82 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灌淤土 ($1.71 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黄褐土 ($1.58 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕壤 ($1.46 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 潮土 ($1.45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 新积土 ($1.33 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 红黏土 ($1.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) >

碱土 ($1.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黄绵土 ($0.98 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕钙土 ($0.94 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 草甸盐土 ($0.92 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 风沙土 ($0.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。就各土壤类型的碳储量占华北地区总碳储量的比例来看, 华北地区的碳密度主要集中于栗钙土 (23.82%)、潮土 (23.54%) 和褐土 (22.34%) 3 种土壤类型中, 三者占区域总碳储量的 69.70%, 而其他 20 种土壤总共占到总碳储量的 20.3%, 且各土壤类型碳储量均小于 10% (图 1-5)。

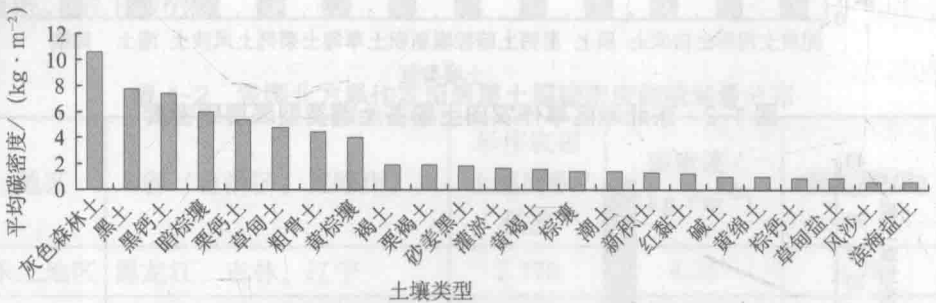


图 1-4 华北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳密度

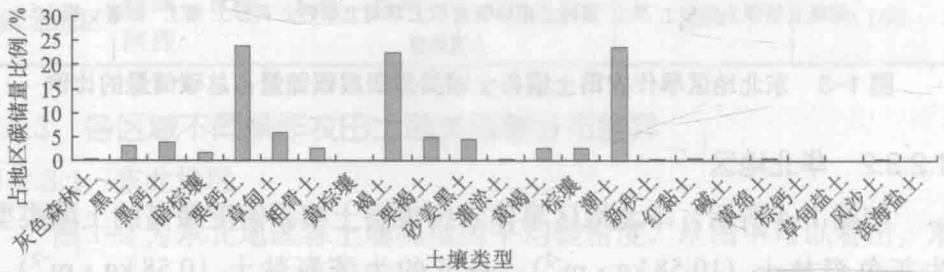


图 1-5 华北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳储量占总碳储量的比例

1.2.3.3 西北地区

如图 1-6 所示, 西北地区旱作农田土壤各土壤类型中, 碳密度最高的土壤类型为山地草甸土, 达到 $17.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低的为风沙土, 为 $0.74 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其他土壤类型的碳密度大小依次为黑钙土 ($9.66 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑毡土 ($8.19 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 沼泽土 ($5.54 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) >

草甸土 ($5.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灰褐土 ($4.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑土 ($4.89 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 褐土 ($4.49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕壤 ($4.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 栗钙土 ($4.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黑垆土 ($2.75 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灌漠土 ($2.51 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 潮土 ($2.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灌淤土 ($2.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕漠土 ($1.99 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灰漠土 ($1.88 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 棕钙土 ($1.87 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 林灌草甸土 ($1.86 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 新积土 ($1.65 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灰钙土 ($1.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 粗骨土 ($1.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 灰棕漠土 ($1.62 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) > 黄褐土 ($1.24 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。在各土壤类型中, 占西北地区总碳储量较多的土壤类型有黑毡土 (15.42%)、灰漠土 (19.35%) 和黄褐土 (11.15%), 其他土壤类型占区域总碳储量的比例均小于 10% (图 1-7)。

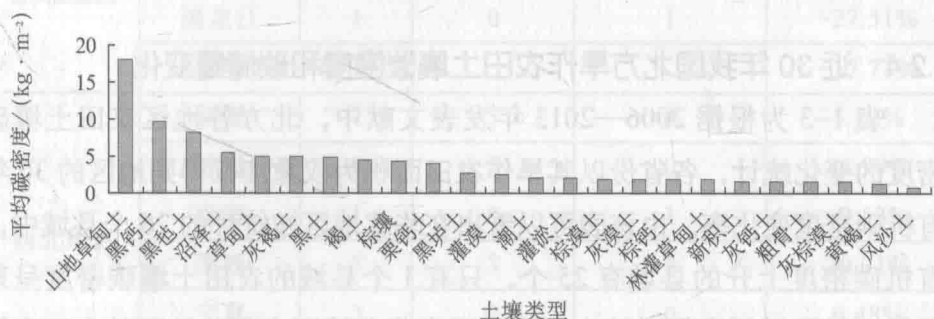


图 1-6 西北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳密度

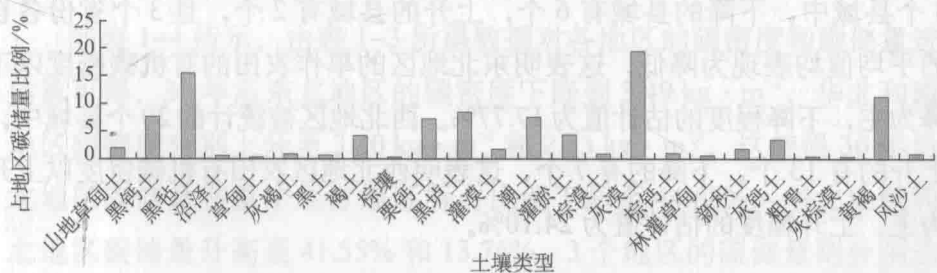


图 1-7 西北地区旱作农田土壤各土壤类型表层碳储量占总碳储量的比例