

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.039.

麻虹宇, 李保国, 蔡斌, 等. 干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 29-35.

MA Hongyu, LI Baoguo, CAI Bin, et al. Effect of Soil Cover on Soil Wind Erosion in Arid and Semi-arid Regions[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 29-35.

干旱半干旱区地表覆盖对土壤风蚀的影响

麻虹宇^{1,2}, 李保国³, 蔡斌⁴, 李颖¹, 葛乐¹, 张丹^{1,5}

(1. 大自然保护协会, 北京 100600; 2. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100089; 3. 中国农业大学 土地科学与技术学院/农业农村部华北耕地保育重点实验室/自然资源部农用地质量与监控重点实验室, 北京 100193; 4. 中化现代农业有限公司, 北京 100032; 5. 南京农业大学, 南京 210095)

摘要:为了探究地表覆盖对干旱半干旱地区土壤侵蚀及表层特性的影响, 探寻农业发展的新机遇, 使用 Meta 分析的方法, 通过搜集国内外干旱半干旱地区土壤覆盖已发表的研究数据, 分析了 3 种地表覆盖方式: 覆盖植物、秸秆覆盖和高留茬对土壤风蚀模数及表层干容重、含水量和有机碳含量的影响。结果表明: (1) 地表覆盖使土壤年风蚀量降低 77.96%, 地表风蚀量与覆盖度密切相关, 秸秆覆盖度最高, 减轻风蚀效果最佳。(2) 地表覆盖平均降低 2.94% 表层 (0—20 cm) 土壤干容重, 从而提高孔隙度保水保肥, 抑制土壤侵蚀; 其中覆盖植物效果最好, 能够降低 5.26%。(3) 地表覆盖能够增加 6.26% 年均表层土壤含水量, 从而有效增大土壤颗粒间的黏聚力; 在降水量 ≤ 450 mm 的半干旱地区该值能达到 10.62%。(4) 地表覆盖能够提高 23.54% 表层土壤有机碳含量, 增加土壤颗粒间的黏结性, 从而提高土体的抗风蚀能力; 高留茬的提升效果最好, 为 34.42%; 覆盖植物中豆科作物的效果最好, 平均提高 30.76%。总之, 3 种地表覆盖措施均能不同程度地减轻风蚀, 能够实现保土、保水和固碳的多重收益, 是未来双碳背景下实现农业可持续发展的有效解决方案。

关键词: 风蚀; 土壤覆盖; META; 干旱半干旱地区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0029-07

Effect of Soil Cover on Soil Wind Erosion in Arid and Semi-arid Regions

MA Hongyu^{1,2}, LI Baoguo³, CAI Bin⁴, LI Ying¹, GE Le¹, ZHANG Dan^{1,5}

(1. Nature Conservancy, Beijing 100600, China; 2. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100089, China; 3. Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Agricultural Land Quality, Ministry of Natural Resources, College of Land Science and Technology, China Agriculture University, Beijing 100193, China; 4. Sinochem Modern Agriculture Limited Company, Beijing 100032, China; 5. Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: In order to investigate the effects of soil cover on soil erosion and topsoil characteristics in arid and semi-arid regions, and to explore new opportunities for agricultural development, published data on soil cover in arid and semi-arid regions at home and abroad were collected and meta-analysis was used to analyze the effects of different mulching practices, like cover crops, straw mulching and stubble remaining, on wind erosion module, soil volume weight, soil water content and soil organic carbon. The results show that: (1) soil mulching can reduce annual wind erosion by about 77.96%; the wind erosion module is closely related to coverage and straw mulching has the highest coverage so it has the best effect on reducing wind erosion; (2) soil mulching can reduce surface (0—20 cm) soil volume weight by around 2.94% to ensure enough pore in soil to keep water and fertilizer, and inhibit soil erosion, among which cover crops work best

收稿日期: 2021-12-17

修回日期: 2022-01-14

资助项目: 大自然保护协会 TNC-先正达“中国干旱与半干旱区可持续农业示范项目”(P118870); 大自然保护协会 TNC-先正达农业可持续发展基金会(SFSA)“中国土壤健康和资源利用效率政策研究”(P120101)

第一作者: 麻虹宇(2000—), 女(满族), 内蒙古赤峰人, 在读本科生, 研究方向为自然地理与资源环境。E-mail: ma_hongyu@bjfu.edu.cn

通信作者: 张丹(1987—), 女, 山东青岛人, 博士, 主要从事农业可持续发展研究。E-mail: zhangdan8720@163.com

<http://stbcj.paperonce.org>

by 5.26%; (3) soil mulching can increase topsoil water content by around 6.26%, thereby effectively increasing the cohesion between soil particles; in the area with low annual rainfall (≤ 450 mm). Soil mulching can effectively increase topsoil water content by 10.62%; (4) soil mulching can increase topsoil organic carbon content by 23.54%, thereby cementing soil particles together and improving the soil's resistance to wind erosion; stubble remaining has the best effect, increases organic carbon content by 34.42%; and in cover crops, legume crops have the best effect, increase organic carbon content by 30.76% on average. Overall, the three mulching methods can reduce wind erosion to varying degrees, protect soil and water, and fix carbon, which will be the effective solution to achieve sustainable agricultural development under the background of double-carbon in the future.

Keywords: wind erosion; soil cover; META; arid and semi-arid regions

世界的干旱半干旱区,主要分布于美国西南部、巴塔哥尼亚、北非、萨赫勒、非洲之角、南非、西南亚、中亚、澳大利亚。在中国,北方地区大多为干旱半干旱区^[1],主要分布于新疆、内蒙古以及黄土高原和青藏高原大部分地区,在东北平原和河北省、北京市境内也有零星分布。由于较大的耕作强度和干旱缺水、风沙严重等自然因素限制,风蚀和地力下降是这些区域面临的主要问题。然而,在干旱向湿润过渡的半干旱气候区,由于降水集中于雨季,在高原向平原过渡的地形,如丘陵、山地等以及部分流域河流沿岸,水力侵蚀也较为多发^[2-3]。因此,在探讨干旱半干旱区的土壤侵蚀问题时,需要同时考虑地表覆盖对风蚀和水蚀的影响。

为了减轻土壤侵蚀,保护人类生存环境的可持续发展,我们寄希望于通过基于自然的解决方案,积极地利用自然和人工生态系统服务来实现可持续发展目标,如覆盖植物、秸秆覆盖和高留茬均是目前应用较为广泛成熟的方法。它们能够取之于自然,用之于自然,用来自于大自然的材料辅以一定的人工覆盖地表,便可以在对自然环境干扰最小的前提下实现保持水土的目的^[4]。研究表明,在合适的时机和适宜的地点覆盖土壤建立风障可以保护土壤,显著抑制风蚀,甚至可以减少风蚀量超过 90%^[5]。中国曾广泛使用的绿肥、秸秆覆盖等就是采用这一原理。近些年,随着人们对耕地资源认识的上升,耕地保护又逐渐得到重视。以美国为首,采用覆盖植物、留茬、秸秆还田等覆盖措施保持农田水土、修复土壤肥力的研究和应用发展迅速,中国也重新引进并重视起了农田覆盖这一概念。

Meta 分析是一种对同类单个研究结果进行统计分析的方法^[6]。本文重点搜集干旱半干旱地区地表覆盖试验结果数据,通过 Meta 分析的方法对干旱半干旱条件下有无地表覆盖及不同地表覆盖方式的土壤侵蚀状况进行探讨,探究不同的基于自然的地表覆盖措施对土壤的保护和改良作用,并期望从中探索出

一条控制和减轻干旱半干旱地区土壤侵蚀,减少沙尘暴,从而实现农田的可持续发展的绿色道路。

1 研究区概况

依据联合国环境规划署(UNEP)^[7]的划分标准,以多年平均降水量与年潜在蒸发量的比值为干燥指数(Aridity Index, AI), $0.05 \leq AI < 0.2$ 为干旱区, $0.2 \leq AI < 0.5$ 为半干旱区。这一地区土地利用的主要类型为草地和荒漠,农业类型主要为旱作农业。本文涉及的国外干旱半干旱区主要包括地中海周边地区和北美洲西部,国内区域主要包括新疆、内蒙古以及黄土高原和青藏高原大部分地区,在东北平原和河北省、北京市境内也有零星分布。这些地区的主要气候类型为温带大陆性气候或地中海气候,年平均降水量为 100~550 mm,气温的日较差、年较差都较大,年日照总量为 2 500~3 000 h^[8]。研究所涉及区域的主要土壤类型是风沙土、灌漠土、栗钙土、黄绵土、褐土等;土壤干容重为 1.06~1.73 g/cm³,平均值约为 1.41 g/cm³;土壤偏碱性,pH 值约为 8;有机碳含量空间差异较大,为 1~25 g/kg,平均含量为 9.62 g/kg。这一地区由于自然条件恶劣,植被稀疏,旱季土壤风蚀严重,雨季又兼以水蚀,且由于耕地以秋翻地为主,冬季农田土壤松散且大部分裸露,使得这一区域的风蚀强度进一步加剧,土壤质量下降严重。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究从中国知网和 web of science 等平台,以“干旱”“覆盖植物”“保护性耕作”“土壤侵蚀”和“土壤理化性质”等为关键词检索 1985—2021 年发表的有关半干旱区覆盖植物、秸秆覆盖、高留茬等措施对土壤侵蚀影响的文献,由于中国较晚引进“覆盖植物”这一概念,早期论文多以“绿肥”“植被覆盖”等词替代,因此在搜索时也包括了“绿肥”“植被覆盖”等关键词。

本文使用的土壤侵蚀指标包括:土壤风蚀模数

$[\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})]$ 、表层(0—20 cm)土壤干容重(g/cm^3)、表层(0—20 cm)土壤含水量(%)和表层(0—20 cm)土壤有机碳含量(g/kg)。风蚀模数为单位时间单位面积的土壤风蚀量,风蚀造成土壤表层细颗粒和营养物质流失,从而导致土壤结构变差、肥力下降,因此风蚀模数越高说明土壤风蚀和肥力下降越严重^[9]。表层土壤干容重越小,说明土壤中孔隙多,结构好,能够减轻水蚀和养分流失,土壤干容重越低,总的土壤侵蚀量越低^[10-11]。表层土壤含水量为 0—20 cm 的土壤平均含水量,较高的土壤含水量可以稳定土壤团聚体,促进降水下渗,减轻土壤侵蚀^[12-13]。表层土壤有机碳含量为每千克土壤中的有机碳含量,土壤有机碳有助于土壤团聚体的形成,较高水平的土壤有机碳含量可以改善土壤结构,从而降低土壤侵蚀^[14]。

筛选可用文献的标准为:必须为大田试验;试验组和对照组仅有有/无覆盖物的差别;试验组有覆盖物,包括覆盖植物、秸秆覆盖、留茬等,但不包括地膜覆盖等无机物覆盖。经过以上标准筛选,共获得 60 篇文献,包含 298 组数据对。对符合标准的文献提取土壤风蚀模数、表层(0—20 cm)土壤干容重、表层(0—20 cm)土壤含水量和表层(0—20 cm)土壤有机碳含量等数据。

覆盖植物是指所有目标作物(如各种粮食作物、果树和其他经济作物)以外、人为种植的其他植物,具有覆盖土壤起到土壤保护等的作用,在干旱半干旱地区能够增加地表覆盖率从而减轻半干旱地区农田的风蚀,其根系起到疏松土壤、减小土壤容中的作用,从而增加下渗和透气,并减轻雨季的水蚀和养分流失。与此同时,种植覆盖植物还有利于增加土壤含水量和提高土壤有机碳含量等,是耕地水土保持和土壤改良的重要途径。秸秆覆盖是在农作物收获后不翻耕土地,将秸秆残茬收割并直接铺盖于地表,起到保墒、防风蚀等的作用。高留茬是指收获后留一定高度(通常为 20—30 cm)的秸秆直立于地表,在收获后到播种前这一时期内不翻动土壤,并利用作物残茬减轻风蚀,保持土壤结构。

2.2 数据分类和数据库构建

选取表征土壤侵蚀的 4 个指标为:土壤风蚀模数、土壤干容重、土壤含水量和土壤有机碳含量。将收集的数据分别归类,划分为有覆盖组和无覆盖组,有覆盖组依据所采用的覆盖措施细分为覆盖植物组、留茬组、秸秆覆盖组和(退耕或免耕后的)天然草地组,覆盖植物组又细分为豆科覆盖植物、禾本科覆盖植物、豆科禾本科混播覆盖植物、十字花科覆盖植物

等不同分组。依据不同组别的划分,分析覆盖对上述土壤理化性质的影响。

2.3 数据分析

使用 Excel 整理所收集文献的覆盖组与无覆盖组的样本量、4 个指标的对应数据以及进行细分组。使用 SPSS 进行相关分析和计算回归模型,使用 Metawin 进行 META 分析,分析结果通过 Excel 整理后使用 Origin 制图。

3 结果与分析

3.1 地表覆盖对半干旱区农田土壤风蚀量的影响

土壤风蚀量是量化风蚀程度最直接的指标。覆盖物对于土壤风蚀的影响见图 1A,有地表覆盖的土壤风蚀模数低于无覆盖的对照组。由于不同试验区域的环境和气象条件差异较大,因此风蚀量的降低值有较大差异。与对照组相比,不同地区的有地表覆盖组的风蚀模数降低 0.50~3 827.50 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,平均降低 76.52%〔约 356.60 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕,最高一组下降超 99%,最低一组仅下降 4%。

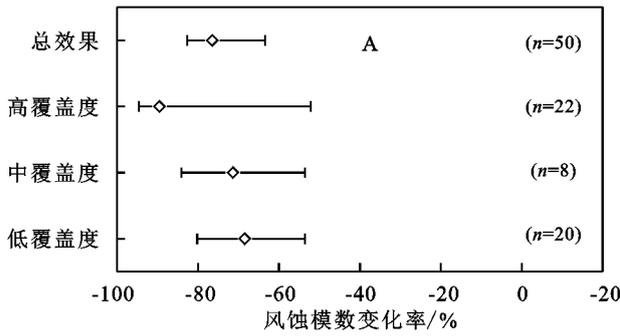
将覆盖度划分为高($>60\%$)、中($30\% \sim 60\%$)、低($<30\%$)3 个等级,META 分析的结果显示随着覆盖度等级的提高,风蚀模数随之降低($p < 0.05$)。在高覆盖时对风蚀的降低效果最显著,降幅为 89.53%〔约 417.23 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕。随覆盖度降低,风蚀模数逐渐增加,低覆盖度降幅仅为 68.46%〔约 319.04 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 〕。

相关分析表明,风蚀量降低比例与覆盖度呈一元线性相关($p < 0.01$) (图 1B)^[15]。随覆盖度增高,土壤抗风蚀的能力增强。

不同覆盖方式对土壤风蚀的作用效果有所差异($p < 0.05$) (图 2)。覆盖植物和高留茬分别使风蚀模数降低 56.22%, 79.88%。秸秆覆盖的效果最为明显,平均使年风蚀量降低了 89.95%。但干旱半干旱地区多大风天气,当风速达到 18 m/s(约 8 级风)及以上时,秸秆几乎全部被吹蚀,完全失去对土壤的保护效果^[16],而留茬和覆盖植物则无此顾虑。而在干旱半干旱地区每年大风天气(8 级风以上)日数基本在 50 d 以上。

3.2 地表覆盖对半干旱区农田土壤干容重的影响

疏松多孔的土壤结构能够保水保肥,促进雨水下渗,减轻水蚀,因此降低土壤干容重有助于减小土壤侵蚀的强度。总体上来看,地表覆盖能够降低土壤干容重约 2.94% (图 3),不同处理下的干容重降幅在 0.80%~5.97%,也有部分处理使土壤干容重增大,最大可增加 13.01%。



注: A 为不同等级覆盖度(高: $>60\%$;中: $30\% \sim 60\%$;低: $<30\%$)对风蚀模数的影响, B 为覆盖度与风蚀模数的拟合曲线。

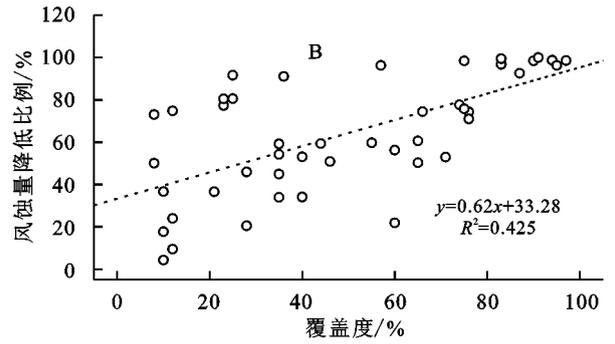


图1 覆盖度对土壤风蚀量的影响

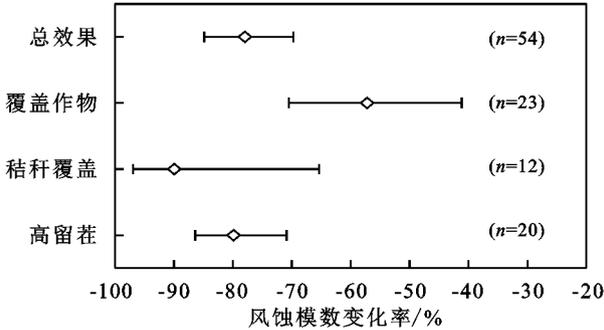
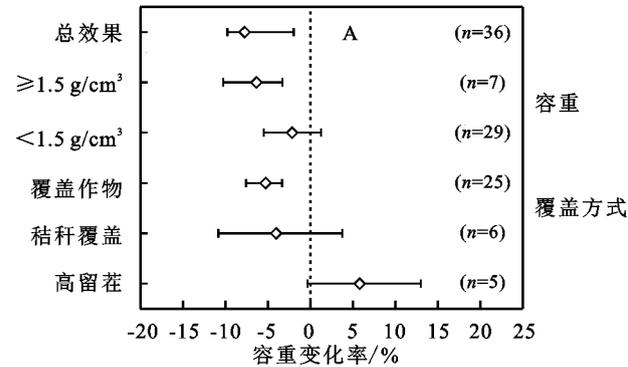


图2 地表覆盖对干旱半干旱区土壤风蚀模数的影响

对于原本干容重高($\geq 1.50 \text{ g/cm}^3$, 主要为砂质土壤, 如风沙土、棕钙土、灰棕漠土等)的农田土壤, 覆



注: A 为不同原始干容重和覆盖方式对土壤干容重的影响; B 为覆盖方式中覆盖植物的不同品种作物对土壤干容重的影响。

盖植物降低干容重约 6.35% , 而原本干容重较小($< 1.50 \text{ g/cm}^3$, 主要为壤土, 如褐土、灰褐土、潮土、栗钙土、黑垆土等)的土壤干容重仅降低了 2.15% 。

不同的覆盖方式对土壤干容重有不同的影响($p < 0.1$), 秸秆覆盖和覆盖植物可以显著降低土壤干容重 $4.02\% \sim 5.26\%$, 其中覆盖植物的效果强于秸秆覆盖, 留茬增大土壤干容重约 5.80% 。

覆盖植物均可以降低土壤干容重, 但不同种的作物降低的程度有所不同($p < 0.05$)。豆科作物的作用较小, 平均降低了 4.56% , 禾本科效果较强, 平均降低 7.50% 的土壤干容重。

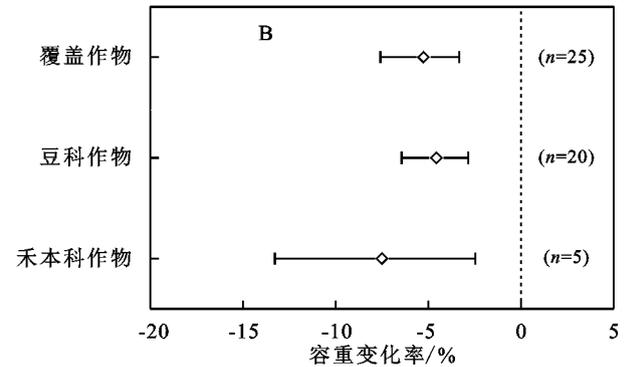


图3 地表覆盖对干旱半干旱区土壤干容重的影响

3.3 地表覆盖对半干旱区农田土壤含水量的影响

土壤含水量升高能够增大土壤颗粒间的黏聚力, 从而减轻土壤风蚀。总体来看(图4), 土壤覆盖增加土壤含水量约 6.26% , 不同覆盖方式、不同覆盖物 and 不同地区都会对覆盖效果产生一定影响。

不同覆盖方式对土壤含水量产生不同影响。秸秆覆盖和高留茬均能增加全年表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤含水量, 增幅分别为 22.47% , 19.51% , 覆盖植物则几乎不能提高土壤含水量, 仅提高表层土壤水 0.33% 。

在不同降雨量的地区, 土壤覆盖对土壤水的影响差异显著。在年降水量 $> 450 \text{ mm}$ 的地区, 覆盖会使土壤含水量降低 4.27% , 在年降水量 $\leq 450 \text{ mm}$ 的地区, 覆盖则提高土壤含水量 10.62% 。这一点在图4

中也有所体现, 当地区年降水量 $\leq 450 \text{ mm}$ 时, 3种土壤覆盖方式都能够提高土壤含水量 $5.14\% \sim 26.68\%$; 而当地区年降水量 $> 450 \text{ mm}$ 后, 3种覆盖方式的提高能力都变弱, 种植覆盖植物甚至会降低 9.33% 的土壤含水量, 秸秆覆盖和高留茬分别能提高土壤含水量 18.77% , 11.02% 。

3.4 地表覆盖对半干旱区土壤有机碳含量的影响

有机碳作为土壤颗粒间的黏结物质, 大大提高了土体的稳定性, 增强了土壤的抗风蚀和水蚀能力, 另外土壤有机碳还是土壤肥力的重要指标。土壤覆盖对于土壤有机碳有着积极的影响(图5)。总体上来看, 土壤覆盖可以提高 23.54% 的表层($0 \sim 20 \text{ cm}$)土壤有机碳。

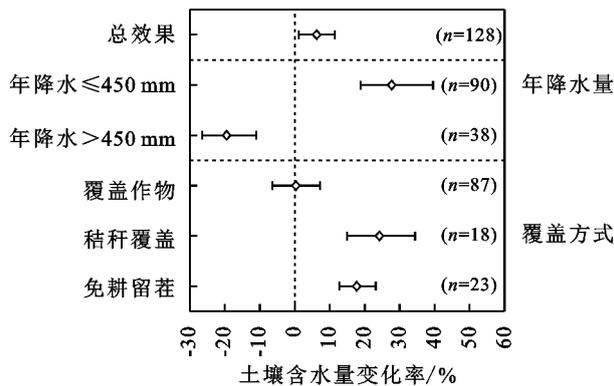
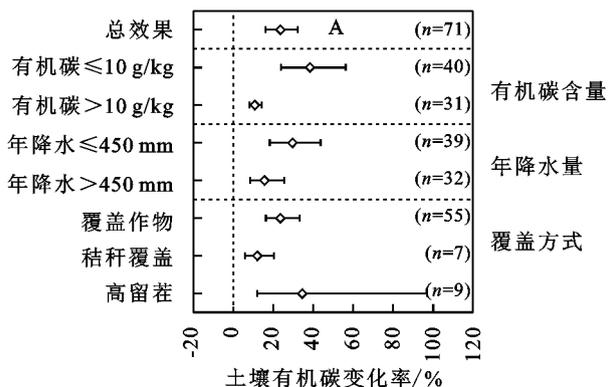


图 4 地表覆盖对干旱半干旱区土壤含水量的影响

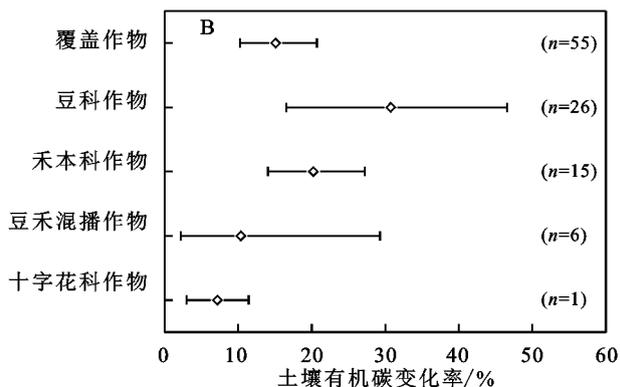
土壤有机碳的本底值高低对土壤覆盖是否能有效提高土壤有机碳有一定的影响。原本有机碳含量



较低 (≤ 10 g/kg) 的地区较高碳地区 (> 10 g/kg) 有机碳含量的提高更明显, 分别为 38.32%, 10.66%。

在不同的覆盖措施当中, 高留茬和覆盖植物都有着良好的效果, 分别可以提高 34.42%, 23.44% 的土壤有机碳, 秸秆覆盖效果稍逊, 但也能提高土壤有机碳含量达 11.91%。如果将覆盖植物与留茬、少免耕等保护性耕作措施结合使用, 提高土壤有机碳的效果将 2~5 倍优于单独使用覆盖植物、秸秆覆盖或高留茬^[17]。

在不同的覆盖植物种类中, 豆科作物对土壤有机碳的提高最多, 为 30.76%, 其次为禾本科 20.24%, 种植豆科禾本科混播和十字花科覆盖植物分别能提高有机碳含量 10.36%, 7.18%。



注: A 为不同原始有机碳含量和覆盖方式对风蚀模数土壤有机碳含量的影响; B 为覆盖方式中覆盖植物的不同品种作物对土壤有机碳含量的影响。

图 5 地表覆盖对干旱半干旱区土壤有机碳含量的影响

4 讨论

已有的研究结果表明: 覆盖物主要通过覆盖地表、增加下垫面粗糙度和拦截沙粒运动 3 种生态过程来缓解气流对地表的风蚀作用, 其影响程度主要取决于覆盖物的基本特性, 如盖度、高度、粗糙度和分布形式等, 以及土壤的有机质含量和土壤物理稳定性指数 (St), 其中覆盖度为主要因子^[13, 18-19]。如图 6 所示, 秸秆覆盖具有更高的覆盖度, 平均覆盖度可以达到 93.20%, 因此防止风蚀的效果最佳, 而留茬和覆盖植物只能达到 50% 左右的覆盖度。但干旱半干旱地区多大风天气, 当风速达到 2 m/s 时, 秸秆就会开始被吹走, 当风速达到 9 m/s (5 级风) 及以上时, 较轻的秸秆就无法稳定地覆盖土壤了^[20], 而当风速达到 18 m/s 时, 秸秆覆盖就几乎完全失去对土壤的保护效果, 同时也会造成额外的扬尘和空气污染, 而留茬和覆盖植物则无此顾虑。此外, 3 种土壤覆盖方式减轻风蚀的效果也源于它们对于土壤物理稳定性指数的提高, 除了保持和增加土壤团聚体的胶结物质土壤黏粒 (粒径 < 0.01 mm) 外, 还减少了易被吹蚀的微团聚体 (粒径 < 0.25 mm) 形成, 更有利于大团聚体 (粒径

> 0.25 mm) 的形成, 以及减少土壤扰动, 保持了良好的土壤结构, 使得土壤颗粒不易被吹蚀^[21-22]。

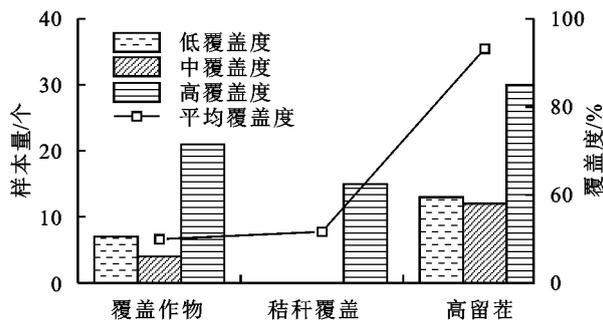


图 6 3 种覆盖方式的覆盖度

赵串串等^[11]的研究表明, 干容重与土壤侵蚀量呈正比, 覆盖通过降低土壤干容重有效减少土壤侵蚀量。降低土壤干容重, 最好的方法是种植覆盖植物。根据尚润阳^[18]、郑纪勇^[23]、王辉^[10]和李卓^[24]等的研究, 覆盖植物的根系生长可以疏松土壤, 根系的代谢产物为土壤增加有机物, 从而降低土壤干容重。虽然降低干容重使土壤在春、秋和冬季更易受到风力侵蚀, 但土壤干容重小时结构比较疏松, 孔隙多, 利于土壤水分下渗和储存, 因此在雨季可以减小地表径流, 减轻水蚀以及养分流失。因此, 覆盖对于减轻土壤侵蚀、提高土壤质量具有积极作

用。在种植覆盖植物时,不同的覆盖植物降低干容重的效果也有所不同,可能原因是不同种作物的根系形态差异:豆科直根系,禾本科为须根系,疏松土壤的能力更强,疏松效果更好。

对于免耕提高土壤干容重的结果,原因是本研究涉及的资料中,留茬多与秋季翻耕地对比,因此在缺少翻动疏松的条件下干容重升高。在赵秋等^[19]的研究中也提到:在全国各地开展的试验中,免耕减小土壤干容重的比例仅为1/3,土壤干容重增大的比例接近2/3。

覆盖对于土壤水的影响机理和结果很复杂。在研究中,秸秆覆盖和留茬增加土壤含水量的效果更好,因为这两种覆盖方式的覆盖物为枯死的植物,在增加覆盖度减少蒸发的同时不需要吸收土壤水。虽然覆盖植物的提高土壤水含量综合效果不如秸秆覆盖和留茬,但不同种类的覆盖植物在保持水土、提高土壤肥力等领域依然有它们不可替代的功能,如禾本科利于土壤保水、豆科能够提高土壤氮等^[25]。如果想尽量减小覆盖对土壤水含量的影响,可以选择在更干旱的地区进行并种植一些耗水量较小的覆盖植物品种^[26-27]。

同时,土壤覆盖持续的时间、当年的降水情况也影响土壤覆盖对土壤含水量的作用效果^[25]。研究所囊括的试验中,覆盖措施的实施年限越久,增加土壤含水量的效果就越明显。不同的降水条件使土壤覆盖呈现出不同的效果。年降水量高的地区土壤覆盖往往倾向于降低土壤含水量,原因是在这些地区,土壤本身含水量较高,覆盖土壤会减少降雨发生时水分的入渗,且种植覆盖植物时植物的蒸腾作用会带走大量土壤水^[28];在降水量低的地区,蒸发量大,土壤发育弱,结构差,覆盖可以减少蒸发,覆盖植物根系产生的机械压力和秸秆分解产生的有机质能够疏松、改良土壤结构,增大土壤持水能力^[29]。

进行秸秆覆盖、留茬作业和种植覆盖植物时,农作物秸秆、根系和覆盖植物植株进入土壤后可以提高土壤有机质的含量,促进有机质分解,从而有利于增加土壤有机碳的含量。同时,秸秆和覆盖植物残体可作为胶结物质参与到土壤团聚体的形成,提高土壤稳定性并减少土壤有机碳的矿化,并提高土壤微生物的活性^[30-31]。覆盖植物对土壤有机碳的提高效果相较于高留茬差一些,可能原因是覆盖植物能够促进土壤有机碳的矿化过程^[32],将有机质转换生物活性更高的轻质有机碳氮,轻质有机碳周转时间更短,不容易在土壤中累积,从而导致有机碳提高效果不明显。但覆盖植物能够提高土壤中微生物的活性,从而提高土壤有机碳稳定性^[33]。在国外的研究和生产实践中,覆盖植物往往与免耕、留茬、秸秆覆盖等结合使用,提高

土壤有机碳的效果远优于仅使用覆盖植物或免耕,可以达到“1+1>2”的效果。同时,不同的覆盖植物种类的效果也有强弱,豆科作物提高有机碳的效果最好,原因是豆科绿肥作物的碳氮比一般为15:1~20:1,较低的碳氮有利于植物残体的分解;同时,土壤有机碳与氮之间存在正相关关系^[34],因此豆科作物能够通过土壤固氮提高土壤有机碳含量;据前人研究发现,豆科与禾本科覆盖植物混播提高土壤有机碳的效果并不明显^[35],效果低于仅种植豆科或禾本科的覆盖植物,这一结论与本文的分析结果是相一致的,如果想要在充分提高土壤有机碳含量的基础上提高覆盖植物的多样性,可以使用两种或两种以上的豆科作物混播。

5 结论和建议

(1) 在中国干旱半干旱地区,土壤覆盖能够降低土壤年风蚀量约316.19 t/(hm²·a),且覆盖度增加与风蚀量降低比例呈显著正相关关系。在所有覆盖方式中,秸秆覆盖的平均覆盖度最高,防治风蚀的效果最好。但在多风的地区和季节,覆盖在地表的秸秆容易被强风吹蚀,当风力达到9 m/s时秸秆覆盖就几乎全部吹走,失去保护表层土壤的能力,因此在这种情况下,覆盖植物或高留茬处理会是更好的选择。

(2) 大部分情况下,土壤覆盖能够降低土壤干容重约0.04 g/cm³,对于土壤干容重高(≥1.50 g/cm³)的区域覆盖对于减小干容重的作用较干容重低的区域更明显。在各种覆盖方式中,覆盖植物降低干容重的效果最好,平均能降低5.26%,约0.07 g/cm³。在不同种类的覆盖植物中,又以须根系的禾本科植物效果最好。

(3) 土壤覆盖增加土壤含水量约6.26%,其中在降水量≤450 mm的地区,覆盖能够增加土壤含水量10.62%。因此在降水量≤450 mm的地区推广土壤覆盖非常重要。连续多年覆盖土壤能够有效提高土壤含水量。

(4) 土壤覆盖可以提升23.54%(1.08 g/kg)的土壤有机碳。其中高留茬和覆盖植物可以提高34.42%,23.44%的土壤有机碳,覆盖植物中的豆科作物对土壤有机碳的提高最多,为30.76%。在生产实践中可以采用覆盖植物与少免耕等措施相结合,以充分发挥土壤覆盖对有机碳的提升作用。

参考文献:

- [1] 黄建平,季明霞,刘玉芝,等.干旱半干旱区气候变化研究综述[J].气候变化研究进展,2013,9(1):9-14.
- [2] Li C, Fu B, Wang S, et al. Drivers and impacts of changes in China's drylands[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2021,2(12):858-873.

- [3] 杨会民,王静爱,邹学勇,等.风水复合侵蚀研究进展与展望[J].中国沙漠,2016,36(4):962-971.
- [4] 张小全,谢茜,曾楠.基于自然的气候变化解决方案[J].气候变化研究进展,2020,16(3):336-344.
- [5] Fryrear D W, Sutherland P L, Davis G, et al. Wind erosion estimates with RWEQ and WEQ [C]// Proceedings of Conference Sustaining the Global Farm, 10th International Soil Conservation Organization Meeting. West Lafayette, USA: Purdue University, 1999.
- [6] 郑侃,何进,李洪文,等.中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J].农业工程学报,2015,31(22):7-15.
- [7] Barrow C J. World Atlas of Desertification (United Nations Environment Programme)[M]. London: Land Degradation & Development, 1992.
- [8] 瞿宁淑.中国干旱区半干旱区土地利用问题[J].中国沙漠,1986,6(1):5-9,17.
- [9] Yan Y, Wang X, Guo Z, et al. Influence of wind erosion on dry aggregate size distribution and nutrients in three steppe soils in northern China[J]. Catena, 2018, 170: 159-168.
- [10] 王辉,王全九,邵明安.表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J].水土保持学报,2007,21(3):10-13,18.
- [11] 赵申申,杨晶晶,刘龙,等.青海省黄土丘陵区沟壑侵蚀影响因子与侵蚀量的相关性分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):22-27.
- [12] Singer M J, Shainberg I. mineral soil surface crusts and wind and water erosion[J]. Earth Surface Processes and Landforms; the Journal of the British Geomorphological Research Group, 2004,29(9):1065-1075.
- [13] 林艺,李和平,肖波.东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J].水土保持学报,2017,31(4):44-50.
- [14] 张治国,马福武.土壤有机质对坡耕地土壤侵蚀及作物产量的影响[J].中国水土保持,1997(8):11-13.
- [15] 董治宝,陈渭南,李振山,等.植被对土壤风蚀影响作用的试验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):1-8.
- [16] Robichaud P R, Jennewein J, Sharratt B S, et al. Evaluating the effectiveness of agricultural mulches for reducing post-wildfire wind erosion[J]. Aeolian Research, 2017,27:13-21.
- [17] Aguilera E, Lassaletta L, Gattinger A, et al. Managing soil carbon for climate change mitigation and adaptation in Mediterranean cropping systems: A meta-analysis[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2013,168:25-36.
- [18] 尚润阳,祁有祥,赵廷宁,等.植被对风及土壤风蚀影响的野外观测研究[J].水土保持研究,2006,13(4):37-39.
- [19] 赵秋,张新建,宁晓光,等.华北农田冬绿肥覆盖的抗风蚀研究[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):120-124.
- [20] Qu B, Li S, Sun X, et al. Effects of different mulching materials on reducing soil dust from bare soil [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2019,28(1): 303-310.
- [21] 李银科,李菁菁,周兰萍,等.民勤绿洲灌区保护性耕作对土壤风蚀与土壤物理性质的影响[J].土壤,2020,52(6):1306-1311.
- [22] 沈晓琳,王丽丽,汪洋,等.保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J].农业资源与环境学报,2020,37(3):361-370.
- [23] 郑纪勇,邵明安,张兴昌,黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J].水土保持学报,2004,18(3):53-56.
- [24] 李卓,吴普特,冯浩,等.干容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J].土壤学报,2010,47(4):611-620.
- [25] 贾倩民,陈彦云,刘秉儒,等.干旱区盐碱地不同栽培草地土壤理化性质及微生物数量[J].草业科学,2014,31(7):1218-1225.
- [26] 包兴国,舒秋萍,李全福,等.小麦/玉米免耕处理对产量及土壤水分和风蚀的影响[J].中国水土保持科学,2012,10(2):78-82.
- [27] 司梦可,曹建生,阳辉,等.太行山区不同植被条件下土壤水分动态变化特征研究[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(11):1766-1777.
- [28] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11): 3127-3136.
- [29] 吕渡,杨亚辉,赵文慧,等.不同恢复类型植被细根分布及与土壤理化性质的耦合关系[J].生态学报,2018,38(11):3979-3987.
- [30] 王碧胜,于维水,武雪萍,等.不同耕作措施下添加秸秆对土壤有机碳及其相关因素的影响[J].中国农业科学,2021,54(6):1176-1187.
- [31] 程会丹,聂军,鲁艳红,等.绿肥对土壤有机碳含量、质量及稳定性影响的研究进展[J].湖南农业科学,2018(8):119-122.
- [32] 谢驾阳,王朝辉,李生秀.地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响[J].生态学报,2010,30(24):6781-6786.
- [33] Eldon J, Gershenson A. Effects of cultivation and alternative vineyard management practices on soil carbon storage in diverse Mediterranean landscapes: a review of the literature[J]. Agroecology and Sustainable Food Systems, 2015,39(5):516-550.
- [34] 赵维俊,刘贤德,张学龙,等.祁连山青海云杉(*Picea crassifolia*)林土壤有机碳与化学性质的相互关系[J].冰川冻土,2014,36(6):1565-1571.
- [35] Jian J, Du X, Reiter M S, et al. A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020,143:107735.