

DOI: 10.20103/j.stxb.202209252730

王稳,高晓东,赵西宁,杨孟豪.黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响.生态学报,2023,43(23):9770-9783.

Wang W, Gao X D, Zhao X N, Yang M H. Effects of returning years of *Robinia pseudoacacia* forest on water, carbon and plant diversity in different climatic regions of the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23): 9770-9783.

黄土高原不同气候区刺槐林恢复年限对水、碳及植物多样性的影响

王 稳¹, 高晓东^{2,3,*}, 赵西宁^{2,3}, 杨孟豪³

1 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:分析植被恢复对黄土高原人工林生态系统服务的影响,对黄土高原新一轮植被恢复和可持续发展有重要意义。通过文献搜索对已发表的 92 篇文献中的 241 组对照试验结果运用整合分析方法,以黄土高原不同气候区内不同恢复年限的刺槐林为代表,选取土壤水分、碳和植物多样性三个指标评价黄土高原刺槐林的生态系统服务变化。结果表明:与对照相比,种植刺槐林后整体上显著提高了土壤碳储量和植物多样性,相对增长率分别为 81.30% 和 32.60% ($P<0.05$),而土壤储水量显著下降,相对变化率为-35.58% ($P<0.05$);半湿润地区土壤储水量相对变化率(-22.98%) ($P<0.05$) 和植物多样性相对增长率(149.1%) ($P<0.05$) 显著高于半干旱地区,土壤碳储量相对增长率(57.21%) ($P<0.05$) 低于半干旱地区;刺槐林土壤储水量、碳储量和植物多样性的相对变化率随恢复年限增加依次为-27.57%、-41.80%、35.92%、16.84%、78.58%、156.27% 和 51.38%、26.37%、27.56%。

关键词:植被恢复;整合分析;刺槐人工林;生态系统服务;黄土高原

Effects of returning years of *Robinia pseudoacacia* forest on water, carbon and plant diversity in different climatic regions of the Loess Plateau

WANG Wen¹, GAO Xiaodong^{2,3,*}, ZHAO Xining^{2,3}, YANG Menghao³

1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: It is of great significance for a new round of vegetation restoration and sustainable development on the Loess Plateau (LP) to analyze the impact of vegetation restoration on artificial forest ecosystem. Through literature search, 241 groups of control test results in 92 published literatures were used to evaluate the changes of ecosystem services of different restoration years of *Robinia pseudoacacia* (RP) in different climatic regions of the LP by meta-analysis. Three indexes of soil moisture, carbon, and plant diversity were selected. The results showed that compared with the control, the soil carbon storage and plant diversity were significantly increased after planting RP, and the relative growth rates were 81.30% and 32.60%, respectively ($P<0.05$), while the soil water storage decreased significantly, and the relative change rate was -35.58% ($P<0.05$). The relative change rate of soil water storage (-22.98%) ($P<0.05$) and the relative growth rate of plant diversity (149.1%) ($P<0.05$) in semi-humid area were significantly higher than those in semi-arid area, and the relative growth rate of soil carbon storage (57.21%) ($P<0.05$) was lower than that in semi-arid area. The relative change

基金项目:陕西省青年科技新星项目(2019KJXX-069);陕西省杰出青年科学基金项目(2021JC-19)

收稿日期:2022-09-25; 网络出版日期:2023-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gao_xiaodong@nwfau.edu.cn

rates of soil water storage, carbon storage, and plant diversity were -27.57% , -41.80% , 35.92% , 16.84% , 78.58% , 156.27% and 51.38% , 26.37% , 27.56% , respectively.

Key Words: vegetation restoration; meta-analysis; *Robinia pseudoacacia*; ecosystem services; Loess Plateau

黄土高原水资源短缺、生态环境脆弱,为了控制严重的水土流失、改善生态环境,国家实施了植被恢复工程^[1-2]。刺槐作为植被恢复的一种主要造林树种,在黄土高原大面积种植。刺槐根系生长迅速^[3],具有耐干旱特性^[4],对于改善黄土高原自然环境和土壤肥力、固碳、水文调节、生物多样性等方面有重要意义^[5-8]。土壤水分作为供水指标,是影响干旱至半干旱地区植被动态和生态过程的首要限制因素^[9]。植被恢复使得碳储存发生了明显的变化^[10],增加了碳储存进而缓解了气候变化^[11]。林下植物多样性为森林组成、结构和演替提供了有意义的衡量标准^[12]。因此,维持和改善人工林土壤水分、固碳以及植物多样性等生态系统服务,已是黄土高原植被恢复的生态学过程研究和人工林经营管理的重点之一。

生态系统服务指的是人类从生态系统中直接或间接获得的各种惠益,包括供给服务、调节服务、文化服务,以及维持其他类型服务所必须的支持服务等 4 种类型^[13-14]。由于各生态系统服务间权衡关系的存在,改善一种或几种生态系统服务时,可能会对其他生态系统服务产生不利影响^[15]。例如,黄土高原通过实施退耕还林(草)项目,有效改善土壤保持、固碳以及植物多样性等生态系统服务^[5],但大面积的植树造林消耗了更多的土壤水分,使得林分衰败从而影响了植被恢复的可持续发展^[16-17]。学者们对植被恢复产生的优缺点存在分歧^[18],且多数研究往往单方面考虑植被恢复带来的利益或造成的损害,将植被恢复带来的优势和劣势割裂开来,研究表明植被恢复对黄土高原固碳、多样性的提高有改善^[19-21],然而植被恢复引起土壤水分的亏缺也引发了学者的广泛讨论^[22-24]。将植被恢复对固碳、多样性的提升和引起土壤水分亏缺进行综合考虑的研究,仍有待丰富。在植被恢复背景下,综合考虑造林成果的优缺点,权衡利弊,才能确保生态系统服务的可持续发展。刺槐林的土壤水分、林分结构、固碳等生态系统服务随造林年限不断变化^[25],而土壤水分供需平衡对黄土高原刺槐林生态系统服务的可持续性至关重要^[26-28]。随着刺槐林生长,冠幅和叶生物量增加,蒸腾耗水与水分供给间出现矛盾^[29],导致了不同程度的土壤干燥化^[30],也影响刺槐林其他生态系统服务的供给。因此,对黄土高原不同恢复年限刺槐林的生态系统服务进行整体评价十分必要。黄土高原面积辽阔,降水、温度和辐射等气候变量随气候区变化差异显著,已有大量研究显示气候因素导致刺槐林土壤水分、固碳以及植物多样性等生态系统服务的差异^[12, 31-32],然而这些研究的尺度较小,多集中在某个流域或县、市^[3, 22, 29]等,在整个黄土高原不同气候区对刺槐林生态系统服务长期影响方面的研究仍有待补充。

为此,本文以整个黄土高原为研究区,运用整合分析方法,综合刺槐林土壤水分、碳和植物多样性等生态系统服务指标,在不同气候区内分析不同恢复年限的刺槐林生态系统服务变化,量化植被恢复对刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性的影响,为黄土高原新一轮植被恢复和可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 文献来源及筛选原则

分别在中国知网(<https://www.cnki.net>)和 Web of Science 文献库(<http://isiknowledge.com>),搜索“黄土高原(Loess Plateau)”,“刺槐(*R. pseudoacacia* or *Robinia pseudoacacia* or black locust)”,“土壤水分或土壤含水量(soil water or soil moisture or soil water content)”或“固碳(carbon sequestration or carbon accumulation)”或“多样性(biodiversity)”等关键词,检索自黄土高原实施植被恢复以来关于刺槐林的文献。筛选标准如下:(1)试验地点为黄土高原地区;(2)试验处理为刺槐林,且每项处理均有耕地或裸地等无植被恢复作为对照;(3)试验重复次数不少于两次;(4)刺槐林土壤水分、固碳和多样性指标以数字或图表形式报道;(5)对不同文献报道的同一试验数据只纳入其中一次。经筛选,共有 92 篇文献 241 组配对试验(附录)。同时对于每篇文章,

记录以下数据:采样时间、采样地点(经纬度、海拔)、采样方法、气候数据(年均降雨量 MAP、年均温度 MAT)、地形数据(坡度、坡向和位置)、刺槐林种植特性(恢复年限、种植密度、株高、胸径和覆盖度)等,最终建立关于数据的记录表。刺槐林各试验地点分布如图 1 所示。

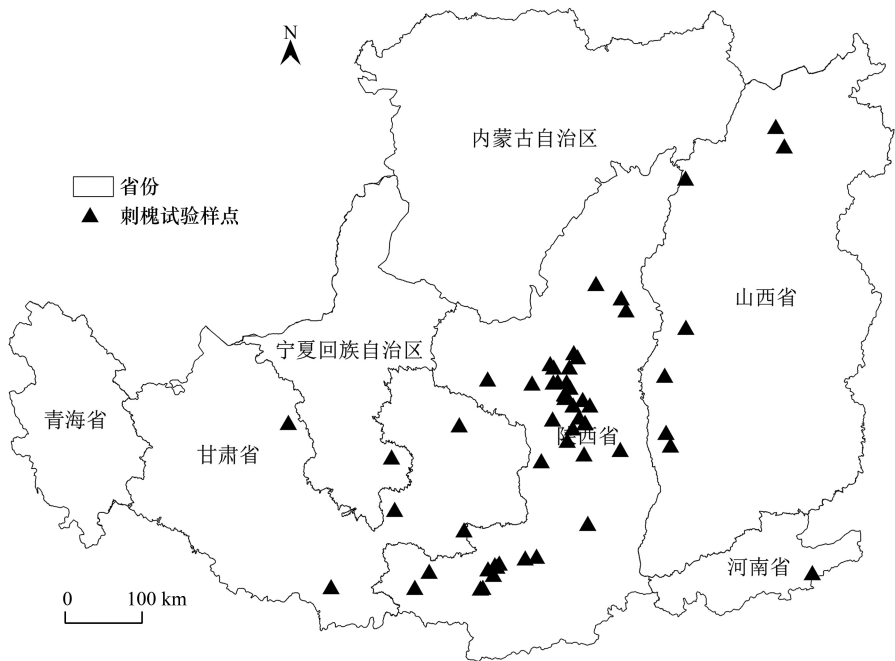


图 1 刺槐林试验地点分布图

Fig.1 Distribution map of *Robinia pseudoacacia* experimental sites on the Loess Plateau

1.2 数据分类

按气候区和刺槐林种植年限对数据进行分类,各分组的样本量如表 1 所示。根据筛选的 92 篇文献中记录的试验点气候特征将研究区域划分为半干旱地区和半湿润地区;根据各试验点刺槐林的恢复年限,将刺槐林划分为小于等于 15 年(≤ 15 a)、15 至 30 年(15—30 a)和大于等于 30 年(≥ 30 a),其中恢复年限最小和最大分别是 3 a、58 a。同时,土壤水分、固碳、植物多样性三个指标分别以平均每厘米土壤储水量、土壤碳储量、Shannon-Wiener 指数来表示。

表 1 植被恢复对刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性效应数据库文章数/配对试验组数

Table 1 Articles number/ Paired experimental group number distribution of effects of converting farmland to forest on soil moisture, carbon sequestration and plant diversity of *Robinia pseudoacacia*

指标 Indexes	气候区 Climatic zones		恢复年限 Restoration years/a		
	半湿润	半干旱	≤ 15 a	15—30 a	≥ 30 a
土壤水分 Soil moisture	17/25	24/71	18/31	22/42	13/23
固碳 Carbon sequestration	6/14	30/80	19/28	27/35	22/31
植物多样性 Plant diversity	6/10	19/41	14/14	17/26	9/11

1.3 数据处理

采用反应比(R)作为效应量来刻画植被恢复对刺槐林土壤水分、固碳以及植物多样性的影响^[9, 33],计算公式如下:

$$\ln R = \ln(X_e/X_c) = \ln(X_e) - \ln(X_c)$$
 (1)

式中, X_e 和 X_c 分别为独立研究中试验组和对照组的平均值。将反应比再转化为百分比变化率^[9],计算公式

如下:

$$Y = (e^{\ln R} - 1) \times 100\% \quad (2)$$

式中,正的 Y 值表示植被恢复对刺槐林生态系统服务产生了正效应,负的 Y 值则表示产生了负效应。如果 Y 值的 95% 置信区间与 0 重叠,则认为植被恢复的效应不显著,反之则效应显著^[33]。在各亚组分析中,如果不同分组内各 Y 值的 95% 置信区间没有重叠,则认为组间差异显著,反之则认为组间差异不显著^[9]。为进一步探究气候区和恢复年限对刺槐林水、碳及植物多样性的影响,将三个指标与试验地点年均降水量、恢复年限进行了拟合分析。相关分析及绘图在 MetaWin 2.1、Spss 24.0、Excel 2016 和 Origin 2023 等软件中进行。

2 结果与分析

2.1 不同气候区对植被恢复中刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性的影响

由图 2 可知,在黄土高原地区,刺槐林与对照组土壤水分存在显著差异,平均每厘米土壤储水量下降了 35.58% ($n=96$) ($P<0.05$)。对照组和刺槐林平均每厘米土壤储水量分别为 2.29 mm 和 1.51 mm。不同气候区刺槐林对土壤水分均有明显负效应,且不同气候区的效应差异显著 ($P<0.05$)。随着黄土高原不同地区 MAP 的减少,刺槐林的储水量呈降低趋势。在半湿润地区,实施植被恢复措施后平均每厘米土壤储水量的相对变化率为 -22.98% ($n=25$),在半干旱地区平均每厘米土壤储水量的相对变化率为 -33.98% ($n=71$),半湿润地区比半干旱地区刺槐林平均每厘米土壤储水量多 0.66 mm。

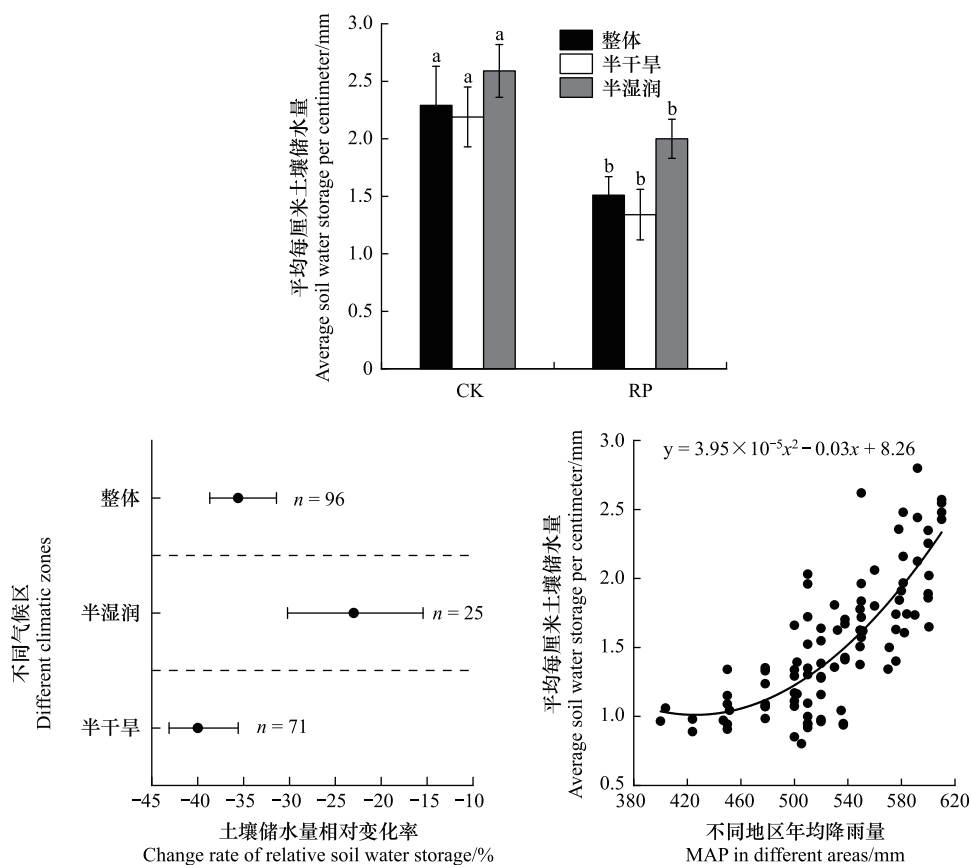


图 2 植被恢复对黄土高原不同气候区刺槐林土壤储水量、土壤储水量相对变化率的影响,及地区 MAP 与土壤储水量的关系

Fig.2 Effects of vegetation restoration to RP on soil water storage, and change rate of relative soil water storage, and relationship between MAP and soil water storage in different climatic zones on the LP

CK:对照组 Control check; RP:刺槐 *Robinia pseudoacacia*; MAP:年均降水量 Mean annual precipitation; LP:黄土高原 Loess Plateau

由图 3 可知,黄土高原对照组土壤碳储量为 1.62 kg/m^2 ($P<0.05$),刺槐林的土壤碳储量可达 2.85 kg/m^2 ($P<0.05$)。与对照相比,土地经过植被恢复种植刺槐林后碳储量显著提高,整体上相对变化率为 81.3% ($n=94$) ($P<0.05$),其中半湿润地区为 57.21% ,半干旱地区为 85.46% ,半湿润地区相对变化率低于半干旱地区。而半湿润地区刺槐林土壤碳储量为 3.85 kg/m^2 ,半干旱地区为 2.68 kg/m^2 ($P<0.05$),半湿润地区高于半干旱地区。同时,随着黄土高原不同地区 MAP 的增加,刺槐林土壤碳储量呈增加趋势。

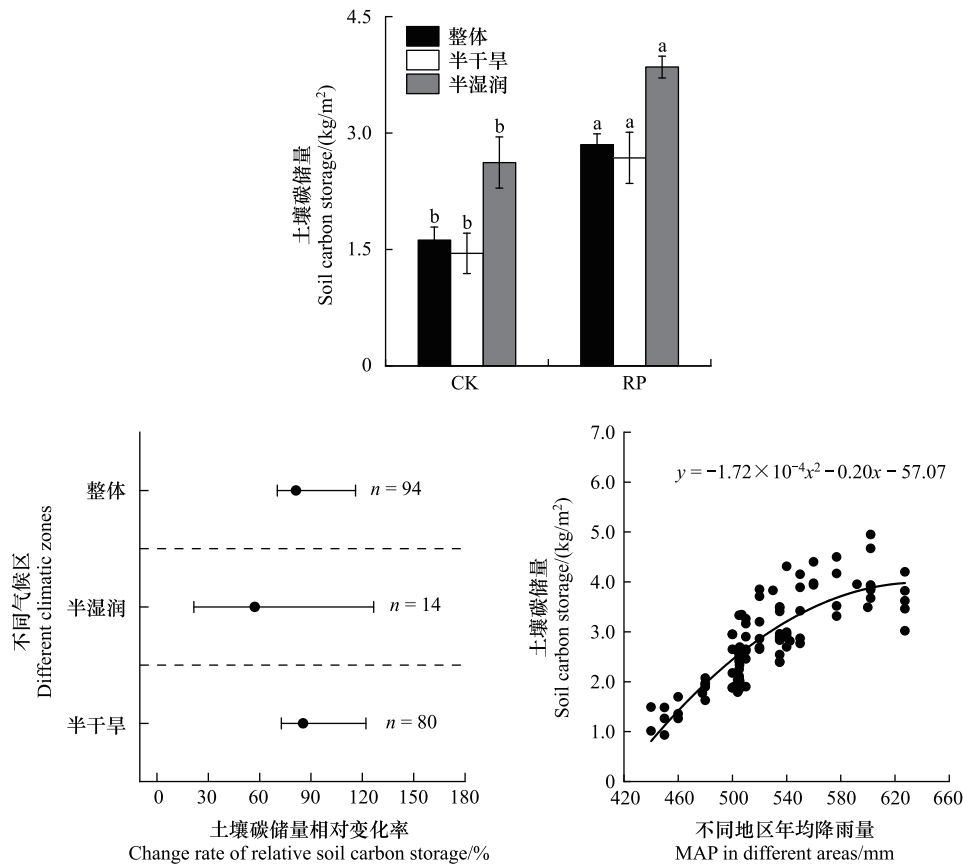


图 3 植被恢复对黄土高原不同气候区刺槐林土壤碳储量、土壤碳储量相对变化率的影响,及地区 MAP 与土壤碳储量的关系

Fig.3 Effect of vegetation restoration to RP on soil carbon storage, change rate of relative soil carbon storage, and relationship between MAP and soil carbon storage in different climatic zones on the LP

由图 4 可知,刺槐林与对照组相比,Shannon-Wiener 指数增加了 32.6% ($n=51$) ($P<0.05$)。对照组的 Shannon-Wiener 指数为 2.18,刺槐林 Shannon-Wiener 指数为 2.57。半湿润地区和半干旱地区刺槐林 Shannon-Wiener 指数也存在显著差异 ($P<0.05$),半湿润地区刺槐林 Shannon-Wiener 指数为 2.94,与对照相比增长了 149.1% ($n=10$);半干旱地区刺槐林 Shannon-Wiener 指数为 2.48,相对增长率为 11.88% ($n=41$),半湿润地区刺槐林 Shannon-Wiener 指数及其相对变化率均高于半干旱地区。此外,随 MAP 的增加,刺槐林 Shannon-Wiener 指数呈增加趋势。

2.2 不同恢复年限对刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性的影响

不同恢复年限对刺槐林土壤储水量的影响不同(图 5),在年限 ≤ 15 a 地区的土壤平均每厘米储水量相对变化率为 -27.57% ($n=31$),与其他年限间存在显著差异 ($P<0.05$)。15—30 a 地区的土壤平均每厘米储水量相对变化率为 -41.80% ($n=42$), ≥ 30 a 地区的土壤平均每厘米储水量相对变化率为 -35.92% ($n=23$),随着恢复年限的增加对土壤水分的影响先增强后减弱。 ≤ 15 a、15—30 a、 ≥ 30 a 三个恢复年限平均每厘米土壤储水量依次为 1.70 mm、1.43 mm、1.41 mm,随着恢复年限的增加土壤平均每厘米储水量出现先明显降低后保持

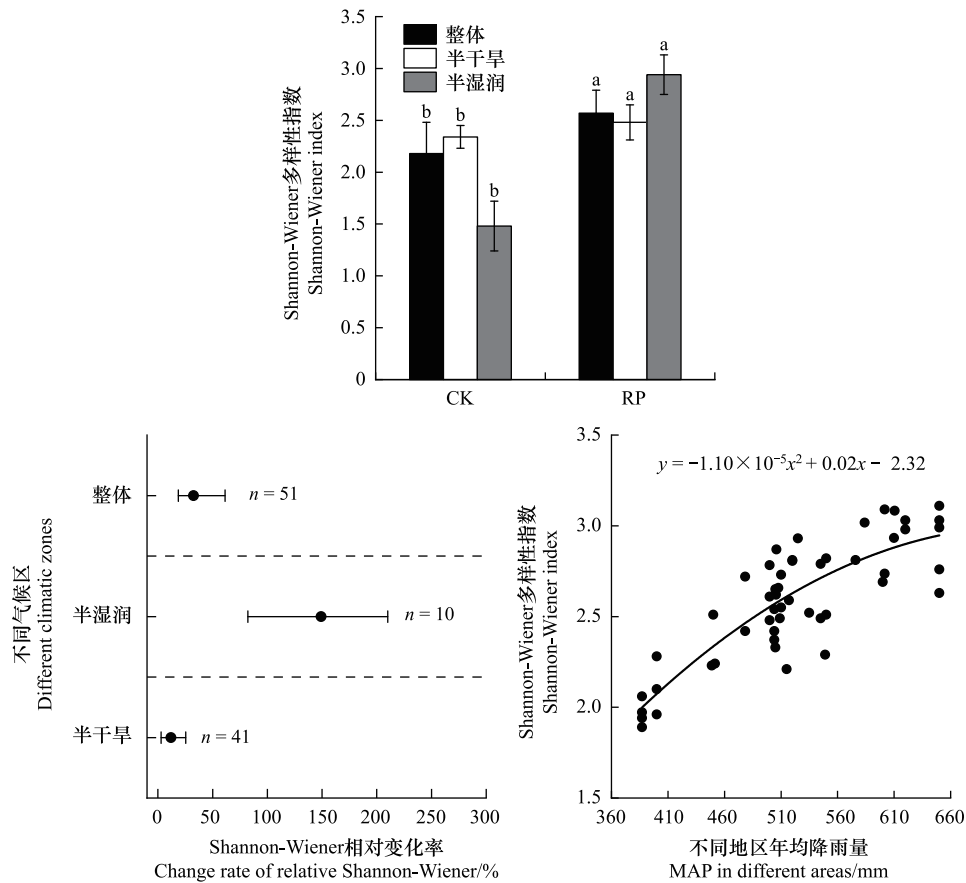


图4 植被恢复对黄土高原不同气候区刺槐林 Shannon-Wiener 指数、Shannon-Wiener 指数相对变化率的影响,及地区 MAP 与 Shannon-Wiener 指数的关系

Fig.4 Effect of vegetation restoration to RP on Shannon-Wiener, and change rate of relative Shannon-Wiener, and relationship between MAP and Shannon-Wiener in different climatic zones on the LP

稳定的变化趋势。

不同恢复年限对刺槐林土壤碳储量的影响不同(图6),随着恢复年限的增加土壤碳储量的相对变化率及含量均呈增加趋势,三个恢复年限土壤碳储量分别为 1.85 mm、3.03 mm、3.57 mm。不同恢复年限的刺槐林土壤碳储量相对变化率显著增加,≤15 a 地区的土壤碳储量增加了 16.84% ($n=28$), 15—30 a 地区的土壤碳储量增加了 78.58% ($n=35$), ≥30 a 地区的土壤碳储量增加了 156.27% ($n=31$) ($P<0.05$),随着恢复年限的增加土壤碳储量呈先增加后减小的趋势。

不同恢复年限对刺槐林下植物多样性的影响不同(图7),≤15 a 地区的刺槐林下 Shannon-Wiener 指数增加了 51.38% ($n=14$) ($P<0.05$), 15—30 a 地区的 Shannon-Wiener 指数增加了 26.37% ($n=26$) ($P<0.05$), ≥30 a 地区的 Shannon-Wiener 指数增加了 27.56% ($n=11$), ≤15 a 地区的 Shannon-Wiener 指数相对变化率最高。三个恢复年限的 Shannon-Wiener 指数依次为 2.41、2.67、2.57,随着恢复年限的增加植物多样性指数呈先增大后减小的趋势。

3 讨论

3.1 植被恢复对土壤水分、固碳和植物多样性的整合影响分析

通过比较黄土高原不同气候区、不同恢复年限种植刺槐林对土壤水分、碳储量和植物多样性的影响,发现种植刺槐林后土壤水分显著降低,土壤固碳能力和林下植物多样性得到有效提升。同时,一些研究表明,在黄

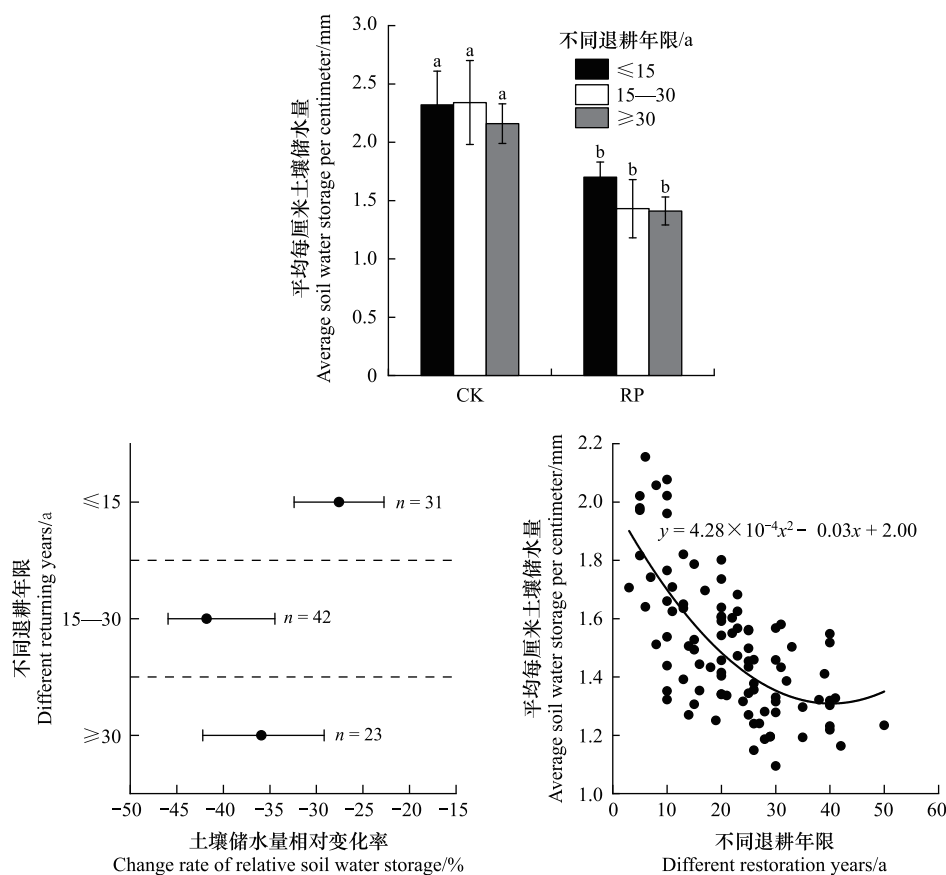


图5 不同恢复年限对黄土高原刺槐林土壤储水量、土壤储水量相对变化率的影响,及恢复年限与土壤储水量的关系

Fig.5 Effect of different restoration years on soil water storage, and the relative rate of soil water storage, and the relationship between the different restoration years and soil water storage of RP on the LP

土高原开展植被恢复工程,可以有效提高森林覆盖度,改善土壤结构和孔隙度,减少地表径流和土壤侵蚀^[17,34]。刺槐林生长迅速耐旱性强,根系发达且有固氮的根瘤^[35],有助于改善土壤质量,调节林间小气候,使土壤碳储量和植物多样性逐渐增加^[18]。但由于人工林消耗的深层土壤水分比普通农作物多,形成了土壤干燥化^[34],使得部分刺槐林生长衰退,出现刺槐林个体发育不良的现象,形成“低质、低产、低效”林^[35],导致黄土高原的生态系统服务得不到有效保障。

3.2 气候条件对刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性的影响分析

结果表明,不同气候区种植刺槐林对生态系统服务的影响存在差异。黄土高原气候环境空间差异较大,从东南到西北依次经过半湿润、半干旱以及干旱地区,降水量和温度呈降低趋势,年均降水量和温度等均会影响区域尺度上的土壤水分变化^[22,31],进而导致刺槐林的生长状况也明显受到土壤水分条件的影响^[31]。在降水不足的半干旱和干旱地区,由于刺槐林种植密度高且蒸散量大,土壤水分和降水补给有限,造成刺槐林大面积退化和死亡^[36]。例如在降水充沛的宜君县 20 a 生刺槐林生长良好,平均胸径为 11.2 cm,而在干旱区的米脂县 19 a 生刺槐林胸径仅为 6.1 cm,远低于宜君县^[35];在半湿润地区,刺槐林的土壤水分在恢复初期普遍呈下降趋势,而在降水量小于 550 mm 的地区,人工林的土壤水分在不同林龄中一直处于较低水平^[31]。在半湿润地区刺槐林和林下物种生长良好,群落结构和功能不断向正演替方向改善,植物多样性高于半干旱地区,并且降水更有利于凋落物分解增加土壤碳储量^[32],发挥了良好的固碳效应和水土保持作用^[33],使得湿润区的碳储量高于干旱区^[12, 32]。越来越多研究表明重新造林对土壤碳储量的影响可能取决于当地降水量^[37],降水是影响碳储存的主导因素^[38]。研究结果显示,与对照相比整个黄土高原种植刺槐林后土壤水分均下降,且半

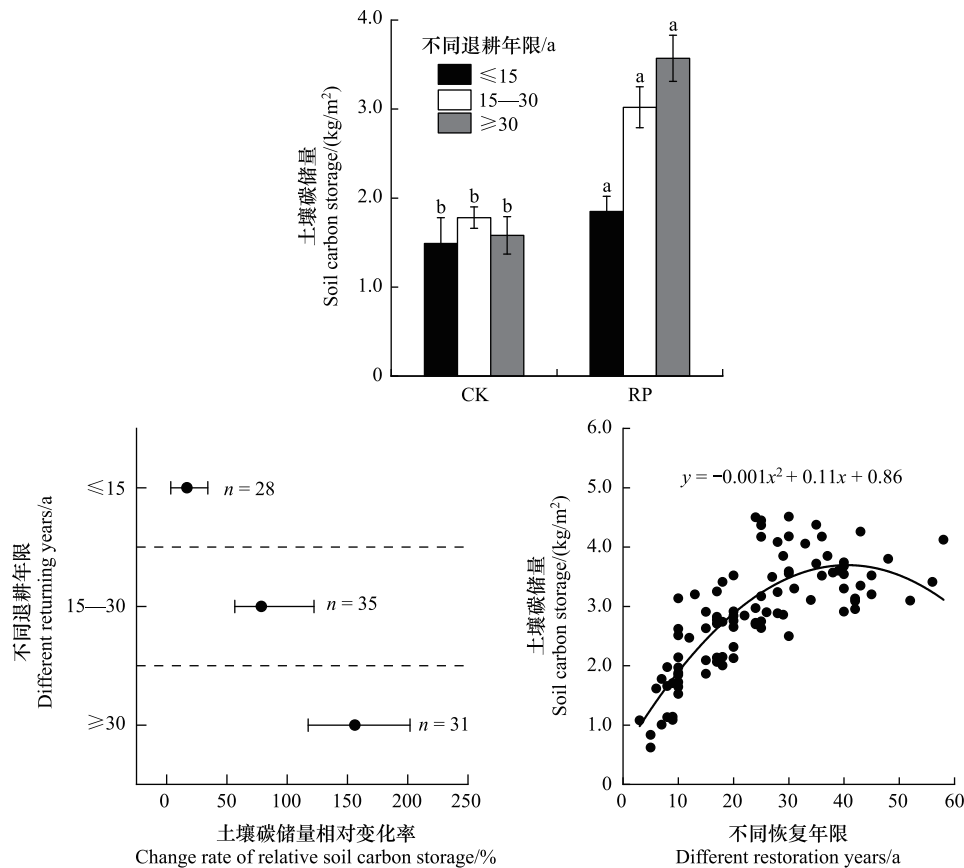


图6 不同恢复年限对黄土高原刺槐林土壤碳储量、土壤碳储量相对变化率的影响,及恢复年限与土壤碳储量的关系

Fig.6 Effect of different restoration years on soil carbon storage, and the relative rate of soil carbon storage, and the relationship between the different restoration years and soil carbon storage of RP on the LP

干旱地区土壤水分下降的尤为强烈;半湿润地区刺槐林的固碳和植物多样性效应均高于半干旱地区。

3.3 恢复年限对刺槐林土壤水分、固碳和植物多样性的影响分析

结果表明,不同恢复年限的刺槐林对生态系统服务的影响存在差异^[39–40]。随着刺槐林龄的增加,对土壤水分和植物多样性的影响先增加后减小,对土壤碳储量的影响作用随林龄增加而增强。大多研究认为,生态系统服务的变化及权衡与林龄有关^[12,22],与对照组相比不同恢复年限的刺槐林土壤水分均有降低的趋势^[9, 22, 30,34],林龄是刺槐林土壤水分变化的重要决定因素^[31]。幼龄刺槐林生长初期覆盖度较低,林下植被光照充足长势良好^[18],林内植被可以通过减少土壤蒸发、改良土壤特性、改善小气候等影响林地土壤水分特征。随着刺槐林龄的增加植被固碳效益和林下植物多样性效果显著,但植被蒸散发逐渐增强,刺槐林和灌草层发生激烈竞争^[18],再加上降雨补给的不足使得土壤水分随着刺槐林龄的增加而减少,导致了剖面土壤储水量明显下降的结果^[22, 30–31, 41]。而土壤水分是植被生长的重要因素,严重的土壤干燥化反过来又抑制了刺槐的生长,刺槐冠层盖度减少以降低蒸腾作用,使部分刺槐林生长缓慢甚至出现退化^[31],因此植被的固碳能力减弱,林下植被类型减少。有部分研究表明退化或者死亡的刺槐林耗水量减少,疏伐也对刺槐林水分利用特征产生影响^[42],使得土壤水分略有增加^[31,42],刺槐林下植物生长特征受郁闭度影响较大,且在年降水量低时更敏感^[43]。

4 结论

(1) 黄土高原地区种植刺槐林后,平均每厘米土壤储水量为 1.51 mm,相对变化率为–35.58%;土壤碳储

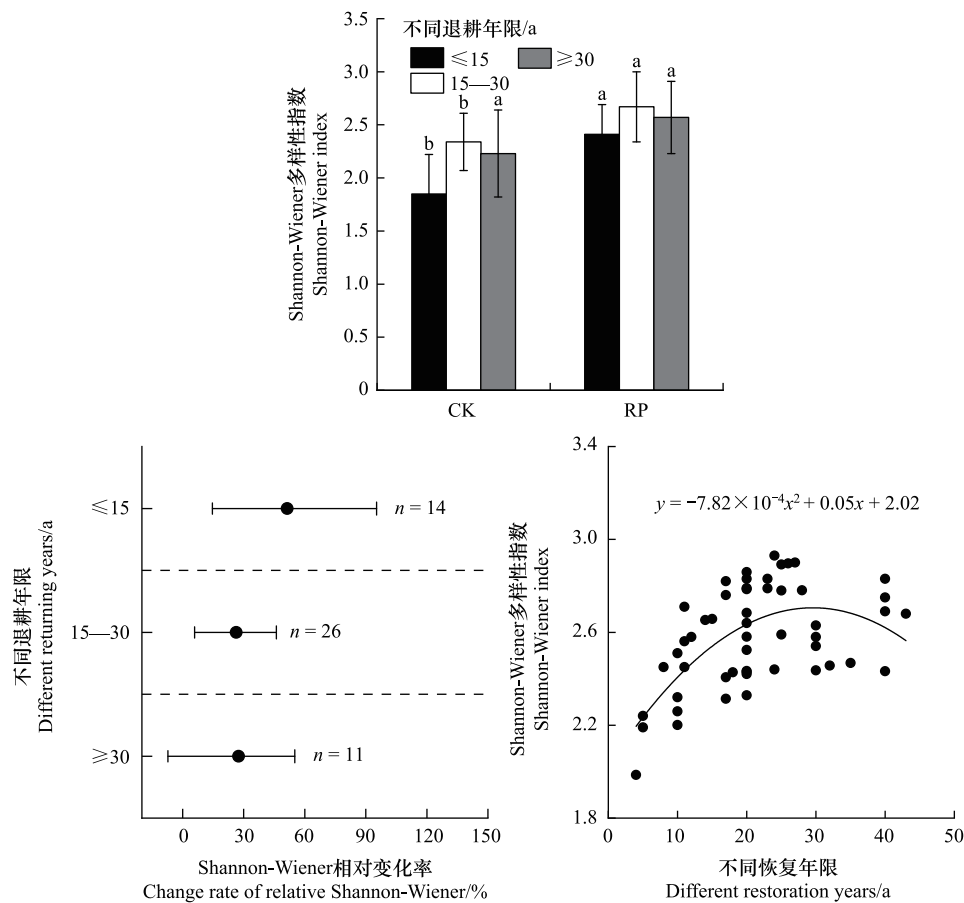


图7 不同恢复年限对黄土高原刺槐林 Shannon-Wiener 指数、Shannon-Wiener 指数相对变化率的影响,及恢复年限与 Shannon-Wiener 指数的关系

Fig.7 Effect of different restoration years on Shannon-Wiener, and the relative rate of Shannon-Wiener, and the relationship between the different restoration years and Shannon-Wiener of RP on the LP

量为 2.85 kg/m^2 , 相对增长率为 81.30%; 植物多样性指数为 2.57, 相对增长率为 32.60%; 表明土壤水分出现明显亏缺, 而土壤碳储量和植物多样性得到较明显改善; 其中, 半干旱地区土壤水分和碳储量变化更为明显, 半湿润地区植物多样性增加更为显著。

(2) $\leq 15 \text{ a}$ 的刺槐林土壤水分与其它恢复年限刺槐林间有显著差别, $15-30 \text{ a}$ 刺槐林土壤水分变化最明显, $\geq 30 \text{ a}$ 刺槐林平均每厘米土壤储水量最低; 与 $< 30 \text{ a}$ 刺槐林相比, $\geq 30 \text{ a}$ 刺槐林土壤碳储量及相对变化率更为明显; $15-30 \text{ a}$ 刺槐林下植物多样性指数最高, 而 $\leq 15 \text{ a}$ 刺槐林下植物多样性增加更为明显。

(3) 在黄土高原进行植被恢复时应综合考虑气候区、恢复年限及植物生长状况等, 刺槐林更适宜种植在半湿润地区且恢复年限不超过 $30-40 \text{ a}$ 最佳。随着恢复年限增加会加大对土壤水分的消耗, 同时林分衰败也会影响植被固碳和植物多样性的提升, 适当进行疏伐或改种消耗水分更少的植物, 如草地、灌木等, 更有利于黄土高原的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Zhang Y W, Shangguan Z P. The change of soil water storage in three land use types after 10 years on the Loess Plateau. CATENA, 2016, 147: 87-95.
- [2] Chen L, Wei W, Fu B, Lu Y. Soil and Water Conservation on the Loess Plateau in China: Review and Perspective. Progress in Physical Geography, 2007, 31(4): 389-403.

- [3] 张咪, 刘永峰, 贾艳梅, 王迪海. 黄土高原刺槐细根形态特征和生物量研究. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 22-27.
- [4] 王林, 冯锦霞, 万贤崇. 土层厚度对刺槐旱季水分状况和生长的影响. 植物生态学报, 2013, 37(3): 248-255.
- [5] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 黄土高原典型区植被恢复及其对生态系统服务的影响. 生态与农村环境学报, 2017, 33(1): 23-31.
- [6] Nicolescu V N, Hernea C, Bakti B, Keserti Z, Antal B, Rédei K. Black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) as a multi-purpose tree species in Hungary and Romania: a review. Journal of Forestry Research, 2018, 29(6): 1449-1463.
- [7] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. 生态学报, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [8] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 安韶山. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [9] Deng L, Yan W M, Zhang Y W, Shangguan Z. Severe depletion of soil moisture following land-use changes for ecological restoration: evidence from Northern China. Forest Ecology and Management, 2016, 366: 1-10.
- [10] 焦秋燕, 黄林嘉, 张娟娟, 张旭, 黄宁, 郭珍, 曹扬. 黄土丘陵沟壑区刺槐混交林生态化学计量特征与碳储量. 水土保持学报, 2022, 36(2): 238-246.
- [11] Maskell L C, Crowe A, Dunbar M J, Emmett B, Henrys P, Keith A M, Norton L R, Scholefield P, Clark D B, Simpson I C, Smart S M. Exploring the ecological constraints to multiple ecosystem service delivery and biodiversity. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(3): 561-571.
- [12] Lu N, Fu B J, Jin T T, Chang R Y. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [14] Assesment M E. Ecosystems and human well-being: synthesis. Physics Teacher, 2005, 34(9): 534-534.
- [15] Rodríguez J P, Beard T D Jr, Bennett E M, Cumming G S, Cork S J, Agard J, Dobson A P, Peterson G D. Trade-offs across space, time, and ecosystem services. Ecology and Society, 2006, 11(1): art28.
- [16] 穆兴民, 徐学选, 王文龙, 温仲明, 杜峰. 黄土高原人工林对区域深层土壤水环境的影响. 土壤学报, 2003, 40(2): 210-217.
- [17] 杨敏, 赵西宁, 高晓东, 杨世伟. 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究. 水土保持研究, 2019, 26(6): 100-106.
- [18] Wang J, Zhao W W, Zhang X, Liu Y, Wang S, Liu Y X. Effects of reforestation on plant species diversity on the Loess Plateau of China: a case study in Danangou Catchment. Science of the Total Environment, 2019, 651: 979-989.
- [19] 孙美美, 宋变兰, 时伟宇, 山中典和, 李国庆, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林生态系统碳汇功能特征. 水土保持研究, 2020, 27(2): 55-61.
- [20] 刘俊廷. 晋西黄土区恢复年限对林下植被多样性及土壤理化性质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [21] 王楠. 宁南山区柠条人工林生物多样性和生态系统多功能性的关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [22] Wang J, Zhao W W, Jia L Z, Hu X P, Cherubini F. Soil desiccation trends after afforestation in the loess plateau of China. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(2): 1165-1176.
- [23] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-10.
- [24] 丁文斌, 王飞. 植被建设对黄土高原土壤水分的影响. 生态学报, 2022, 42(13): 5531-5542.
- [25] Cao Y, Chen Y M. Coupling of plant and soil C: N: P stoichiometry in black locust (*Robinia pseudoacacia*) plantations on the Loess Plateau, China. Trees, 2017, 31(5): 1559-1570.
- [26] Malam Issa O, Valentin C, Rajot J L, Cerdan O, Desprats J F, Bouchet T. Runoff generation fostered by physical and biological crusts in semi-arid sandy soils. Geoderma, 2011, 167/168: 22-29.
- [27] 杨树焯, 赵西宁, 高晓东, 于流洋. 基于 $\delta^{13}C$ 值的黄土高原生态林和经济林水分利用效率差异及对环境响应分析. 水土保持学报, 2022, 36(4): 247-252, 264.
- [28] 王俊, 郭金龙, 张永旺, 魏瑶瑶, 郑恩. 黄土高原自然植被恢复过程中土壤温度和水分的相关性. 水土保持学报, 2022, 36(2): 130-137.
- [29] 袁坤宇. 永寿县典型人工林生态系统服务功能评估[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [30] Nan G W, Wang N, Jiao L, Zhu Y M, Sun H. A new exploration for accurately quantifying the effect of afforestation on soil moisture: a case study of artificial *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau (China). Forest Ecology and Management, 2019, 433: 459-466.
- [31] Liang H B, Xue Y Y, Li Z S, Wang S, Wu X, Gao G Y, Liu G H, Fu B J. Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: evidence from the Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2018, 412: 62-69.
- [32] Li T J, Ren B W, Wang D H, Liu G B. Spatial variation in the storages and age-related dynamics of forest carbon sequestration in different climate zones-evidence from black locust plantations on the Loess Plateau of China. PLOS One, 2015, 10(3): e0121862.
- [33] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.

- [34] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [35] 韦景树, 李宗善, 冯晓珂, 张园, 陈维梁, 伍星, 焦磊, 王晓春. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [36] Ma Y. On the growth dynamics of locust in the loess plateau. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1990(02): 26-32.
- [37] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345-360.
- [38] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Leffler A J, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [39] Bradford J, Kastendick D. Age-related patterns of forest complexity and carbon storage in pine and aspen-birch ecosystems of northern Minnesota, USA. *Canadian Journal of Forest Research*, 2010, 40(3): 401-409.
- [40] Becknell J M, Powers J S. Stand age and soils as drivers of plant functional traits and aboveground biomass in secondary tropical dry forest. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(6): 604-613.
- [41] 王舒, 马岚, 张栋, 梅雪梅, 李倩, 潘成忠. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 253-258.
- [42] 刘雨, 高光耀, 王棣, 焦磊, 李宗善, 田立德, 傅伯杰. 不同疏伐强度下黄土丘陵区刺槐林的水分利用特征. *生态学报*, 2023, 43(07): 1-11.
- [43] 王依瑞, 王彦辉, 段文标, 李平平, 于澎涛, 甄理, 李志鑫, 尚会军. 黄土高原刺槐人工林郁闭度对林下植物多样性特征的影响. *应用生态学报*, 2023, 34(2): 305-314.

附录:数据来源

- [1] 孙占薇, 马岚, 梅雪梅, 刘京晶, 王福星, 张金阁, 燕琳. 晋西黄土区不同水文年土壤水分特征及其主要影响因子分析. *浙江农林大学学报*, 2021, 38(1): 10-20.
- [2] Wang J, Zhao W W, Jia L Z, Hu X P, Cherubini F. Soil desiccation trends after afforestation in the loess plateau of China. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(2): 1165-1176.
- [3] 包维斌, 白一茹, 王幼奇, 夏子书, 高小龙, 阮晓晗. 宁南山区不同乔木林地土壤干层分布及干燥化特征. *西北植物学报*, 2020, 40(1): 150-159.
- [4] Yang M, Wang S F, Zhao X N, Gao X D, Liu S. Soil properties of apple orchards on China's Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 723: 138041.
- [5] 杨敏, 赵西宁, 高晓东, 杨世伟. 黄土高原人工林深层土壤水分利用研究. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 100-106.
- [6] 刘新春, 赵勇钢, 刘小芳, 朱兴菲, 高冉, 栗文玉. 晋西黄土区典型人工植被生长季深层土壤储水量与细根生物量分布特征. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 95-101.
- [7] 苟清平, 朱清科, 李依璇, 申明爽, 刘昱言, 梅雪梅, 王瑜. 陕北黄土区不同林地土壤干燥化效应. *生态学报*, 2019, 39(19): 7161-7168.
- [8] Zhang Q D, Wei W, Chen L D, Yang L. The joint effects of precipitation gradient and afforestation on soil moisture across the loess plateau of China. *Forests*, 2019, 10(3): 285.
- [9] Yu B W, Liu G H, Liu Q S, Huang C, Li H, Zhao Z H. Seasonal variation of deep soil moisture under different land uses on the semi-arid Loess Plateau of China. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(3): 1179-1189.
- [10] 马婧怡, 贾宁凤, 程曼. 黄土丘陵区不同土地利用方式下土壤水分变化特征. *生态学报*, 2018, 38(10): 3471-3481.
- [11] 梁海斌, 薛亚永, 安文明, 王帅, 李宗善, 吕一河. 黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 77-85.
- [12] 白永红, 高志永, 陆静, 汪有科, 董建国. 模拟干化土壤中的植被生长及土壤水分变化. *西北林学院学报*, 2018, 33(5): 1-8, 74.
- [13] Nan G W, Wang N, Jiao L, Zhu Y M, Sun H. A new exploration for accurately quantifying the effect of afforestation on soil moisture: a case study of artificial *Robinia pseudoacacia* in the Loess Plateau (China). *Forest Ecology and Management*, 2019, 433: 459-466.
- [14] Gao X D, Li H C, Zhao X N, Ma W, Wu P T. Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land: considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, 2018, 319: 61-69.
- [15] Jia X X, Shao M A, Zhu Y J, Luo Y. Soil moisture decline due to afforestation across the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 113-122.
- [16] 肖列, 刘国彬, 薛莲, 张超. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤水分及地上生物量的影响. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 204-209, 215.
- [17] 王舒, 马岚, 张栋, 梅雪梅, 李倩, 潘成忠. 晋西黄土区不同林龄人工刺槐林下植被及土壤水分特征. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 253-258.

- [18] 赵传普, 徐学选, 高朝侠, 张少妮. 黄土丘陵区不同植被类型下土壤水分动态. 水土保持通报, 2015, 35(1): 68-72.
- [19] 尹秋龙, 焦菊英, 寇萌. 极端强降雨条件下黄土丘陵沟壑区不同植被类型土壤水分特征. 自然资源学报, 2015, 30(3): 459-469.
- [20] Xiao L, Xue S, Liu G B, Zhang C. Soil moisture variability under different land uses in the Zhifanggou Catchment of the loess plateau, China. Arid Land Research and Management, 2014, 28(3): 274-290.
- [21] 俱战省, 郑粉莉, 刘文兆. 黄土高原南部小流域土壤水分时程变化的分层特征及其驱动机制. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 28-33.
- [22] 王力, 卫三平, 吴发启. 黄土丘陵沟壑区土壤水分环境及植被生长响应——以燕沟流域为例. 生态学报, 2009, 29(3): 1543-1553.
- [23] 孟秦倩, 王健, 吴发启. 黄土高原坡面刺槐林土壤水分环境的研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 28-32.
- [24] 刘江华, 刘国彬, 侯禧禄, 李登武. 刺槐林地土壤水分与林下植物群落生物量的关系. 水土保持学报, 2008, 22(3): 43-46.
- [25] 李军, 陈兵, 李小芳, 赵玉娟, 次仁央金, 蒋斌, 胡伟, 程积民, 邵明安. 黄土高原不同植被类型区人工林地深层土壤干燥化效应. 生态学报, 2008, 28(4): 1429-1445.
- [26] 陈杰, 刘文兆, 张勋昌, 张北赢, 王兵, 杨玉玲. 黄土高原沟壑区不同树种的水土保持效益及其适应性评价. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 97-104, 112.
- [27] 杨光, 荣丽媛. 黄土高原沟壑区人工植被类型对土壤水分和碳氮的影响. 水土保持通报, 2007, 27(6): 30-33.
- [28] 赵忠, 曹扬, 成向荣, 王迪海. 刺槐根系对深层土壤水分的影响//中国农学会. 全国学术年会农业分会论文集. 新疆: 2005.
- [29] 吴照柏, 杨新民. 黄土丘陵区刺槐生长及林地土壤水分动态规律研究. 水土保持研究, 2004, 11(4): 117-120.
- [30] 王进鑫, 罗伟祥, 刘广全, 王迪海. 黄土高原人工林根区土壤水分亏缺状况与空间分布. 西北林学院学报, 2004, 19(4): 1-4, 8.
- [31] 樊军, 郝明德, 邵明安. 黄土旱塬农业生态系统土壤深层水分消耗与水分生态环境效应. 农业工程学报, 2004, 20(1): 61-64.
- [32] 陈海滨, 孙长忠, 安锋, 党坤良. 黄土高原沟壑区林地土壤水分特征的研究(I)——土壤水分的垂直变化和季节变化特征. 西北林学院学报, 2003, 18(4): 13-16.
- [33] 张立俞, 邸利, 吴贤忠, 张军, 王安民, 汝海丽, 倪帆, 赵子龙, 张瑞锋, 吴雷, 李浩强, 苏兴龙, 刘俊俊, 赵宝转, 杨婷. 陇东黄土高原中沟、纸纺沟小流域不同土地覆盖土壤含水量实测数据集(2017—2019). 全球变化数据学报: 中英文, 2020, 4(4): 380-386, 380.
- [34] Gou Q P, Zhu Q K. Response of deep soil moisture to different vegetation types in the Loess Plateau of northern Shannxi, China. Scientific Reports, 2021, 11(1): 1-10.
- [35] Cheng R R, Chen Q W, Zhang J G, Shi W Y, Li G Q, Du S. Soil moisture variations in response to precipitation in different vegetation types: a multi-year study in the loess hilly region in China. Ecohydrology, 2020, 13(3): 15.
- [36] Fang X N, Zhao W W, Wang L X, Feng Q, Ding J Y, Liu Y X, Zhang X. Variations of deep soil moisture under different vegetation types and influencing factors in a watershed of the Loess Plateau, China. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20(8): 3309-3323.
- [37] Zhang Y, Liao X L, Wang Z, Wei X R, Jia X X, Shao M G. Synchronous sequestration of organic carbon and nitrogen in mineral soils after conversion agricultural land to forest. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 295: 106866.
- [38] Zhang Q Y, Jia X X, Wei X R, Shao M G, Li T C, Yu Q. Total soil organic carbon increases but becomes more labile after afforestation in China's Loess Plateau. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117911.
- [39] Wang X, Zhong Z K, Li W J, Liu W C, Zhang X Y, Wu S J, Ren Z X, Wu Q M, Shen Z Y, Ren C J, Yang G H, Han X H. Effects of *Robinia pseudoacacia* afforestation on aggregate size distribution and organic C dynamics in the central Loess Plateau of China: a chronosequence approach. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110558.
- [40] Song Y, Yao Y F, Qin X, Wei X R, Jia X X, Shao M G. Response of carbon and nitrogen to afforestation from 0 to 5 m depth on two semiarid cropland soils with contrasting inorganic carbon concentrations. Geoderma, 2020, 357: 113940.
- [41] Rong G H, Li W R, Zhu H S, Zhou J Y, Qiu L P, Ge N N, Wei X R, Shao M G. Dynamics of new- and old- organic carbon and nitrogen in bulk soils and aggregates following afforestation on farmland. CATENA, 2020, 195: 104838.
- [42] 张伟. 黄土丘陵区人工林草植被生态服务功能演变及其互作机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
- [43] Zhong Z K, Han X H, Xu Y D, Zhang W, Fu S Y, Liu W C, Ren C J, Yang G H, Ren G X. Effects of land use change on organic carbon dynamics associated with soil aggregate fractions on the Loess Plateau, China. Land Degradation & Development, 2019, 30(9): 1070-1082.
- [44] Yang Y, Dou Y X, Cheng H, An S S. Plant functional diversity drives carbon storage following vegetation restoration in Loess Plateau, China. Journal of Environmental Management, 2019, 246: 668-678.
- [45] Wang Y F, Liu L, Yue F X, Li D. Dynamics of carbon and nitrogen storage in two typical plantation ecosystems of different stand ages on the Loess Plateau of China. PeerJ, 2019, 7: e7708.
- [46] Li B Q, Li G L, Fu Y, Wang K. Distribution of soil organic carbon within aggregate size fractions following the conversion of cropland to black locust forest on the southern Loess Plateau, China. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 74(1): 59-66.
- [47] Zhao F Z, Fan X D, Ren C J, Zhang L, Han X H, Yang G H, Wang J, Doughty R. Changes of the organic carbon content and stability of soil aggregates affected by soil bacterial community after afforestation. CATENA, 2018, 171: 622-631.

- [48] Zhang G Q, Zhang P, Cao Y. Ecosystem carbon and nitrogen storage following farmland afforestation with black locust (*Robinia pseudoacacia*) on the Loess Plateau, China. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(3): 761-771.
- [49] 邓健, 张丹, 张伟, 任成杰, 郝雯晖, 刘冲, 韩新辉, 杨改河. 黄土丘陵区刺槐叶片-土壤-微生物氮磷化学计量学及其稳定性特征. *生态学报*, 2019, 39(15): 5527-5535.
- [50] Yuan Y, Zhao Z Q, Zhang P F, Chen L M, Hu T, Niu S Y, Bai Z K. Soil organic carbon and nitrogen pools in reclaimed mine soils under forest and cropland ecosystems in the Loess Plateau, China. *Ecological Engineering*, 2017, 102: 137-144.
- [51] Li Z W, Liu C, Dong Y T, Chang X F, Nie X D, Liu L, Xiao H B, Lu Y M, Zeng G M. Response of soil organic carbon and nitrogen stocks to soil erosion and land use types in the Loess hilly-gully region of China. *Soil and Tillage Research*, 2017, 166: 1-9.
- [52] Han X H, Zhao F Z, Tong X G, Deng J, Yang G H, Chen L M, Kang D. Understanding soil carbon sequestration following the afforestation of former arable land by physical fractionation. *CATENA*, 2017, 150: 317-327.
- [53] Gao Y, Dang P, Zhao Z. Effects of afforestation on soil carbon and its fractions: a case study from the Loess Plateau, China. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(5): 1291-1297.
- [54] Zhao F Z, Zhang L, Ren C J, Sun J, Han X H, Yang G H, Wang J. Effect of microbial carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry on soil carbon fractions under a black locust forest within the central loess plateau of China. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(6): 1520-1530.
- [55] Deng J, Sun P S, Zhao F Z, Han X H, Yang G H, Feng Y Z, Ren G X. Soil C, N, P and its stratification ratio affected by artificial vegetation in subsoil, loess Plateau China. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0151446.
- [56] 李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利. 黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素. *环境科学*, 2015, 36(7): 2662-2668.
- [57] 党珍珍. 黄土高原人工与天然植被恢复下土壤固碳特征及其影响机理[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [58] 孙彩丽. 陕北退耕还林(草)的土壤固碳效应及对碳组分的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [59] Zhao F Z, Yang G H, Han X H, Feng Y Z, Ren G X. Stratification of carbon fractions and carbon management index in deep soil affected by the Grain-to-Green Program in China. *PLoS One*, 2014, 9(6): e99657.
- [60] Shi W Y, Yan M J, Zhang J G, Guan J H, Du S. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atmospheric Environment*, 2014, 88: 74-82.
- [61] Hu C J, Liu G H, Fu B J, Chen L D, Lyu Y H, Guo L. Soil Carbon Stock and Flux in Plantation Forest and Grassland Ecosystems in Loess Plateau, China. *中国地理科学: 英文版*, 2014, 24(4): 423-435.
- [62] 刘艳. 千阳黄土高原人工刺槐林有机碳研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [63] Li H, Li J, He Y L, Li S J, Liang Z S, Peng C H, Polle A, Luo Z B. Changes in carbon, nutrients and stoichiometric relations under different soil depths, plant tissues and ages in black locust plantations. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(10): 2951-2964.
- [64] 赵发珠, 韩新辉, 杨改河, 佟小刚, 康乐, 杜约翰. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳、氮密度变化特征. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 43-47, 52.
- [65] 张金, 许明祥, 王征, 马昕昕, 邱宇洁. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳储量的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2721-2727.
- [66] 王征. 黄土丘陵区植被恢复对土壤有机碳库的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [67] 王晓芳. 黄土高原不同类型人工林的碳汇研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [68] Zhong Z K, Wu S J, Lu X Q, Ren Z X, Wu Q M, Xu M P, Ren C J, Yang G H, Han X H. Organic carbon, nitrogen accumulation, and soil aggregate dynamics as affected by vegetation restoration patterns in the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2021, 196: 104867.
- [69] Zhang Y, Ge N N, Liao X L, Wang Z, Wei X R, Jia X X. Long-term afforestation accelerated soil organic carbon accumulation but decreased its mineralization loss and temperature sensitivity in the bulk soils and aggregates. *CATENA*, 2021, 204: 105405.
- [70] Han X H, Ren C J, Li B Y, Yan S J, Fu S Y, Gao D X, Zhao F Z, Deng J, Yang G H. Growing seasonal characteristics of soil and plants control the temporal patterns of bacterial communities following afforestation. *CATENA*, 2019, 178: 288-297.
- [71] 朱朵菊. 刺槐对黄土丘陵区植物群落结构与功能的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [72] 吕渡, 杨亚辉, 赵文慧, 雷斯越, 张晓萍. 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. *生态学报*, 2018, 38(11): 3979-3987.
- [73] Wang J, Zhao W W, Zhang X, Liu Y, Wang S, Liu Y X. Effects of reforestation on plant species diversity on the Loess Plateau of China: a case study in Danangou Catchment. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 979-989.
- [74] 邓健. 陕北黄土丘陵区典型退耕流域农林景观配置模式综合评价及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [75] 张伟. 陕北黄土丘陵区退耕地植物群落特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [76] 徐明. 黄土丘陵区沟谷地植被恢复的环境影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

- [77] 张笑培, 杨改河, 王和洲, 宗洁, 杨慎骄. 黄土沟壑区不同植被恢复群落特征及多样性研究. 西北林学院学报, 2011, 26(2): 22-25, 219.
- [78] 曲红, 王百田, 王棣, 高海平. 黄土区不同配置人工林物种多样性研究. 生态环境学报, 2010, 19(4): 843-848.
- [79] 郭建英. 吴起县退耕还林工程效益的监测与评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [80] 张笑培. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复生态效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [81] 宋西德. 渭北黄土高原两种景观及其界面的生态特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [82] 刘增文, 刘卓玛姐, 段而军, 冯顺煜. 黄土高原半湿润丘陵区林下植物群落数量特征研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008, 36(10): 74-80.
- [83] 韩新辉. 黄土高原退耕还林还草工程生态效应及作用机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [84] 张永. 渭北黄土高原林—草景观界面植被、土壤特征及其关系研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [85] 董强, 李凯荣, 崔宏安. 淳化县不同植被类型群落特征和物种多样性研究. 安徽农业科学, 2007, 35(17): 5232-5234.
- [86] 杨亚辉, 吕渡, 张晓萍, 木热提江·阿不拉, 赵文慧, 蔺鹏飞, 于艺鹏. 不同人工造林树种及其配置方式对土壤理化性质影响分析. 水土保持研究, 2017, 24(6): 238-242, 249.
- [87] 巫翠华. 刺槐人工林群落林下植物多样性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [88] 茹豪. 晋西黄土区典型林地水文特征及功能分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [89] 梁爱华. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复过程的生态效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [90] 李慧. 陕北黄土丘陵区不同降雨量区土壤—植物生态化学计量学特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [91] 冯迪. 陕西省安塞县退耕还林工程生态效益监测与评价[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [92] 白文霞. 安太堡露天矿复垦地典型植被-土壤系统生态效应研究[D]. 太原: 山西大学, 2018.