

黄土残塬沟壑区不同林龄与坡向人工刺槐林生态系统服务协同关系

袁坤宇¹, 曹扬^{2,3}, 杨洁¹, 康永祥¹, 张利利¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 通过权衡关系的研究探索不同林龄与坡向人工刺槐林多项生态系统服务间的差异及动态变化关系, 为黄土残塬沟壑区人工刺槐林的经营管理提供理论依据。[方法] 按照不同林龄阶段和坡向共设置 36 个样地, 对所选林分的涵养水源、土壤碳储量、土壤氮储量、年均生产力、生物多样性 5 个方面的生态系统服务进行测算, 利用均方根偏差(RMSD)对该区人工刺槐林生态系统服务的权衡与协同关系进行研究, 对生态系统服务与林分因子进行冗余分析。[结果] ①不同林龄、坡向人工刺槐林的生态系统服务差异显著($p < 0.05$); 随林龄增加, 涵养水源量和年均生产力从幼龄林到龄林增加达到最大值, 随后逐渐减小; 而生物多样性则呈先增后减趋势, 在成熟林时期最高; 土壤碳、氮储量随林龄增加呈逐渐增加趋势; 阴坡的各生态系统服务价值均高于阳坡。②林龄是引起生态系统服务权衡关系变化的主导因子($p < 0.05$), 坡向对生态系统服务权衡关系的影响不显著($p > 0.05$), 土壤碳固存与土壤氮固存呈协同关系, 涵养水源与其他生态系统服务的权衡关系相比程度较高。③人工刺槐林 5 项生态系统服务与盖度、郁闭度、凋落物厚度呈现不同程度的正相关, 与坡度呈现不同程度的负相关。[结论] 人工刺槐林生态系统服务在中龄林和过熟林时期权衡度高, 不利于整体生态系统服务效益的发挥。应在中龄林时期引入耐旱灌木或乡土草本, 在过熟林经营过程中, 在满足涵养水源的前提下, 合理控制林分密度, 促进其他生态系统服务的作用, 提高整体效益。

关键词: 刺槐; 生态系统服务; 权衡度; 残塬沟壑区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0097-09

中图分类号: S718.5

文献参数: 袁坤宇, 曹扬, 杨洁, 等. 黄土残塬沟壑区不同林龄与坡向人工刺槐林生态系统服务协同关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 97-105. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.015; Yuan Kunyu, Cao Yang, Yang Jie, et al. Synergy relation between ecosystem services of *Robinia pseudoacacia* plantation with different age and slope aspects in residual gully region of Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 97-105.

Synergy Relation Between Ecosystem Services of *Robinia Pseudoacacia* Plantation with Different Age and Slope Aspects in Residual Gully Region of Loess Plateau

Yuan Kunyu¹, Cao Yang^{2,3}, Yang Jie¹, Kang Yongxiang¹, Zhang Lili¹

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau,

Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study investigated the differences and dynamic relationships among multiple ecosystem services by considering the trade-off relationship of a *Robinia pseudoacacia* plantation with different ages and slope aspects. The findings will provide a theoretical basis for the scientific management of *R.*

收稿日期: 2020-06-13

修回日期: 2020-07-10

资助项目: 国家重点研发计划课题“残塬沟壑区人工林景观化经营关键技术和示范”(2017YFC0504605)。

第一作者: 袁坤宇(1994—), 男(汉族), 山东省泗水县人, 硕士研究生, 研究方向为森林生态学。Email: yuanky0910@163.com。

通讯作者: 康永祥(1963—), 男(汉族), 陕西省乾县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事树木学和古树名木保护研究。Email: yxkang@nw-suafe.edu.cn。

pseudoacacia plantations in the residual gully region of the Loess Plateau. [Methods] We set up 36 plots according to different stages of forest age and different slope aspects. The water conservation, soil carbon storage, soil nitrogen storage, annual productivity, and biodiversity of the selected stands were measured. Statistical parameters including the root mean square deviation were used to determine their trade-off relationship, and a redundancy analysis was performed to determine the correlation between ecosystem services and stand factors. [Results] ① The ecosystem services of the *R. pseudoacacia* plantation at the various ages and slope aspects were significantly different ($p < 0.05$). As the forest age increased, so did the benefits of water conservation. Annual productivity initially increased but then decreased from young forests to middle-age forests, and was the greatest for the middle-age forests. Biodiversity increased at first and then decreased, and reached the maximum during the mature forest period, whereas the benefits of soil carbon and nitrogen storage increased gradually. Moreover, the benefits of ecosystem services on the shady slope were higher than those on the sunny slope. ② Forest age was the dominant factor causing the change in the ecosystem services trade-off relationship ($p < 0.05$), whereas slope aspect did not have a significant effect on the trade-off of ecosystem services ($p > 0.05$). Soil carbon retention and soil nitrogen retention were synergistic, and the trade-off of water conservation with other ecosystem services was relatively high. ③ The ecosystem services of the plantation were positively correlated with different degrees with coverage, canopy density, and litter thickness, but were negatively correlated with different degrees of slope. [Conclusion] The trade-off of ecosystem services in the *R. pseudoacacia* plantation was higher during the middle-age and over mature periods, which is not conducive to the overall ecosystem service benefits. Drought-tolerant shrubs or native herbs should be introduced during the middle-age forest period. Regarding the management of the over-mature period, stand density should be reasonably controlled for water conservation such that the role of other ecosystem services can be promoted to improve the overall benefits.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; ecosystem services; trade-offs; residual gully region

生态系统服务是人类在生存和发展的过程中,直接或间接从不同层次生态系统的生境和功能中获得的所有惠益^[1]。千年生态系统评估将生态系统服务分为供给、调节、支持和文化服务 4 个方面^[2]。森林作为最大的陆地生态系统,为人类带来诸如提供木材(供给)、涵养水源(调节)、土壤碳固存(调节)、控制侵蚀(支持)、生物多样性(支持)以及文化和旅游等益处^[3]。由于生态系统具有结构复杂、功能多样和空间异质等特性^[4],不同生态系统服务间存在非线性、不同步的复杂关系^[5],包括权衡关系和协同关系,具体表现为两种生态系统服务间此消彼长的权衡,或两者同增同减的协同,从更广泛意义而言,权衡也指生态系统服务间速率不均匀的同向变化^[3]。权衡度反映了发挥某种生态系统服务引起其他生态系统服务的减少的程度,权衡度高说明发挥某种生态系统服务对其他生态系统服务的抑制程度高。近年来,许多学者对森林生态系统服务的权衡与协同关系进行了研究。朱建佳等^[6]基于 InVEST 模型,使用均方根偏差(RMSD)对南方红壤丘陵区不同采伐强度下人工林的木材生产与碳储量的权衡度进行分析,得出在每十年采伐 10%~20%的管理模式下,木材产出量与碳储量的综合效益高且权衡度最低。吴炜等^[7]对湖南省 3 种次生林的调节服务与

支持服务的研究表明,物种多样性与土壤全氮、土壤有机碳调节为权衡关系,土壤有机碳与土壤全氮调节为协同关系。通过研究生态系统服务间的权衡与协同关系,有助于准确分析不同生态系统服务间的关系,指导人们更加合理的规划和利用自然资源。

刺槐(*Robinia pseudoacacia*)是黄土高原主要造林树种,由于早期造林工作以追求造林面积为主,忽视造林质量^[8],导致部分林分出现低产、自然更新差、稳定性弱等问题^[9]。在人工林管理活动中,应理清不同生态系统服务的权衡与协同的关系,增强其协同效应,削减其权衡作用,使人工林整体效益达到最高,实现生态保护与经济协调发展的双赢局面^[10]。目前,对黄土高原生态系统服务权衡与协同关系的研究集中于宏观大尺度方面,即以土地利用变化为切入点,对农田、森林、草地等复合生态系统进行研究^[11-12],而从坡面尺度对人工林生态系统服务的权衡与协同关系的研究较少。本研究以陕西省永寿县为研究区域,以人工刺槐林为研究对象,基于坡面尺度分析不同林龄、坡向人工刺槐林多项生态系统服务的差异及各生态系统服务间的权衡与协同关系,并分析生态系统服务与林分因子的关系,以期对黄土残塬沟壑区人工刺槐林的多功能管理提供理论依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄土残塬沟壑区代表性区域永寿县,地理位置为 107°56′—108°20′E, 34°29′—34°58′N, 海拔 990~1 440 m。该区地势由南向北逐渐升高,塬、梁、沟相间分布,但以塬面为主,具有黄土残塬沟壑区典型特点。属暖温带大陆性季风气候,年降雨量 601 mm,其中 6—9 月降雨量占全年的 65%,年均温 10.8 ℃,土壤类型为微碱性的黄绵土和褐土。刺槐林下植被包括:南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、陕西绣线菊(*Spiraea wilsonii*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、葎草(*Humulus scandens*)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)等。

1.2 样地设置与调查测定

2018 年 6—8 月,通过实地踏查,选取立地条件相近且处于不同生长阶段的刺槐林分,共设置 36 个 20 m × 20 m 的样地,通过生长锥法确定林龄,并依

据《主要树种龄级与龄组划分》^[13]将其划分为 4 个龄组。每个龄组各设置 9 块样地,包括幼龄林(4 阳坡, 5 阴坡)、中龄林(5 阳坡, 4 阴坡)、成熟林(4 阳坡, 5 阴坡)、过熟林(5 阳坡, 4 阴坡),样地概况见表 1。调查并记录每块样地的坡度、海拔、坡向、林分密度,利用 LAI-2 200 冠层分析仪测定林分郁闭度和叶面积指数,使用目视判读法测定林下植被盖度。在每块样地内,进行每木检尺,测定所有乔木的胸径和树高。分别沿对角线设置 3 个 5 m × 5 m, 3 个 1 m × 1 m 和 3 个 0.5 m × 0.5 m 的灌木、草本和凋落物小样方,记录灌木和草本的种类和数目、凋落物厚度,并对凋落物分层取样,使用烘干法^[14]测定凋落物生物量和自然含水率,使用室内浸水法^[14]测定凋落物最大持水率。沿对角线挖取 3 个土壤剖面,在 0—20, 20—40, 40—60 cm 处,使用环刀取原状土,采用环刀浸泡法^[15]测定土壤容重、孔隙度,另取土样 1 kg 放入自封袋,风干、磨碎、过筛后使用重铬酸钾氧化—外加加热法^[16]测定土壤有机碳含量,采用浓硫酸—高氯酸消煮凯氏定氮法^[16]测定土壤全氮含量。

表 1 样地基本概况

龄组	林龄/ a	坡向	坡度/ (°)	坡位	海拔/ m	胸径/ cm	树高/m	郁闭度/ %	林分密度/ (株·hm ⁻²)	样方数/ 个
幼龄林	8	阳坡	15.5~21	中坡	1 342	5.7~6.2	4.3~4.8	33~40	1 975~2 575	4
	8	阴坡	8~19	中坡	1 246	5.5~6.1	4.6~4.9	35~45	2 025~2 250	5
中龄林	12	阳坡	14~18	中坡	1 209	7.1~7.7	5.5~6.7	50~63	1 475~1 825	5
	15	阴坡	13~20.5	中坡	1 298	7.9~8.4	7.9~8.5	55~68	1 350~1 700	4
成熟林	26	阳坡	15~17	中坡	1 341	11.9~12.6	9.7~10.4	70~78	1 425~1 550	4
	28	阴坡	14~19	中坡	1 208	13.0~13.9	10.2~11.1	70~82	1 225~1 450	5
过熟林	34	阳坡	18~22	中坡	1 325	15.2~16.3	11.6~12.9	70~75	750~975	5
	38	阴坡	14.5~23	中坡	1 274	17.5~18.8	12.1~12.8	75~80	825~1 175	4

1.3 生态系统服务评估方法

1.3.1 涵养水源

$$W_a = (0.85R_m - R_0) \times M_0 + \sum_{i=1}^m 10\,000(P_{\alpha_i} + P_{m_i}) \times H_i \quad (1)$$

式中: W_a 为涵养水源量(t/hm²); R_m 和 R_0 分别为凋落物最大持水率和自然含水率(%); M_0 为凋落物生物量(t/hm²); P_{α_i} 和 P_{m_i} 分别为第 i 层土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度(%); H_i 为第 i 层土层厚度(m)。

1.3.2 土壤碳储量和土壤氮储量

$$SOC = \sum_{i=1}^m C_i \times H_i \times B_i \times (1 - S_i) \times 10 \quad (2)$$

$$STN = \sum_{i=1}^m N_i \times H_i \times B_i \times (1 - S_i) \times 10 \quad (3)$$

式中: SOC 和 STN 分别为土壤碳储量和土壤氮储量(t/hm²); C_i 和 N_i 分别为土壤有机碳含量和土壤

全氮含量(g/kg); H_i 为第 i 层土壤厚度(m); B_i 为第 i 层土壤容重(g/cm³); S_i 为为第 i 层土壤直径 > 2 mm 砾石体积含量(%). 残塬沟壑区的土壤以黄土为主,砾石体积含量很小,计算时忽略不计,故 $S_i = 0$ 。

1.3.3 年均生产力

年均生产力由样地乔木总生物量除以林龄获得,乔木生物量依照李泰君^[17]在永寿县槐平林场建立的刺槐异速生长方程进行估算(见表 2)。

表 2 刺槐生物量自然对数与胸径的异速生长方程

器官	异速生长方程	R ²
树叶	$\ln W = -2.608 + 1.400 \cdot \ln(\text{DBH})$	0.844
树枝	$\ln W = -3.206 + 2.377 \cdot \ln(\text{DBH})$	0.973
树干	$\ln W = -2.360 + 2.424 \cdot \ln(\text{DBH})$	0.988
树根	$\ln W = -1.597 + 2.008 \cdot \ln(\text{DBH})$	0.973

注: W 为生物量(kg); DBH 为胸径(cm)。

1.3.4 生物多样性 生物多样性由 Shannon-Weiner 指数表示:

$$H' = -\sum_{i=1}^S (P_i \times \ln P_i) \quad (4)$$

式中: H' 为 Shannon-Weiner 指数; S 为物种数量; P_i 为 i 物种的相对重要值。

1.4 生态系统服务权衡与协同分析

本文采用 Bradford 和 D'Amato^[18] 提出的使用统计学参数均方根偏差 (RMSD) 来衡量生态系统服务的权衡与协同关系, 该方法巧妙消除了不同生态系统服务之间的量纲差异, 可以清晰明确的量化两种或多种生态系统服务之间的权衡度, 并将权衡的含义从传统意义上的负相关关系, 扩展到在相同方向变化的不均匀率^[3], 即存在协同关系的两个生态系统服务之间, 一个服务的增加可能会导致另一个服务的不均匀增加的情形。首先, 将各项生态系统服务归一化 0~1 范围, 具体方法为:

$$E_{\text{std}} = \frac{E_{\text{ob}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}} \quad (5)$$

式中: E_{ob} 为单项生态系统服务的观测值; E_{max} 和 E_{min} 分别为单项生态系统服务中的最大值和最小值; E_{std} 为单项生态系统服务 E_{ob} 归一化处理后的值。

$$\text{RMSD} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\text{ES}_i - \text{ESi})^2} \quad (6)$$

式中: RMSD 为 m 种生态系统服务的均方根偏差; ES_i 为生态系统服务 i 归一化后的值; ESi 为 m 个生态系统服务的平均值。

两种生态系统服务间权衡与协同关系可以由图 1 表示, 归一化处理后的两种生态系统服务以坐标 $(x_{\text{ES1}}, y_{\text{ES2}})$ 落在 $x \in [0, 1], y \in [0, 1]$ 的坐标系中, A, B, C, D 点横纵坐标为参与比较的两种生态系统服务归一化的值。均方根偏差 (RMSD) 表示两种生态系统服务的权衡度, 可用点 $(x_{\text{ES1}}, y_{\text{ES2}})$ 到 $y=x$ 线的距离表示, 距离越远, 说明权衡度越高, 协同关系越弱。图中 B 和 C 点关于 $y=x$ 对称, 两点到 $y=x$ 线的距离相等, 说明两点的权衡大小相同, 但 B 点表示倾向收益于生态系统服务 1, C 点表示倾向收益于生态系统服务 2。 A 点和 B 点相比, 两对生态系统服务都倾向收益于生态系统服务 1, 但 A 点权衡度小于 B 。 D 点位于 $y=x$ 线上, 说明两种生态系统服务处于零权衡的协同状态。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理, 使用 SPSS 20.0 的 one-way ANOVA 法分析林龄、坡向对生态系统服务影响的显著性, 应用 Duncan 法和独立样本 t 检

验比较不同龄组、不同坡向人工刺槐林生态系统服务的差异 ($\alpha=0.05$), 采用 Origin 2018 作图, 图中所有数据为平均值 \pm 标准差。使用 Canoco 5.0 的冗余分析法 (RDA) 分析生态系统服务与林分因子的相关关系。

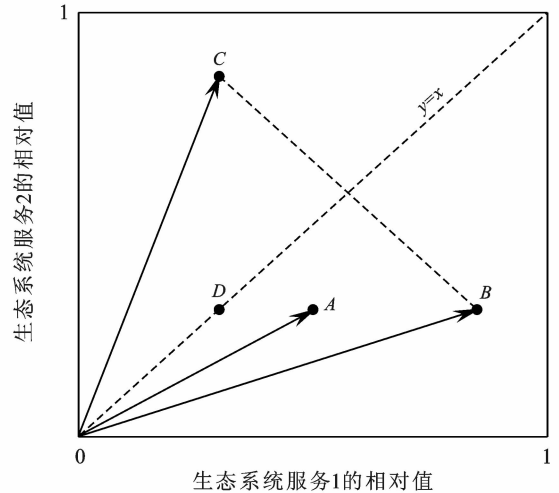


图 1 两种生态系统服务的权衡关系^[3]

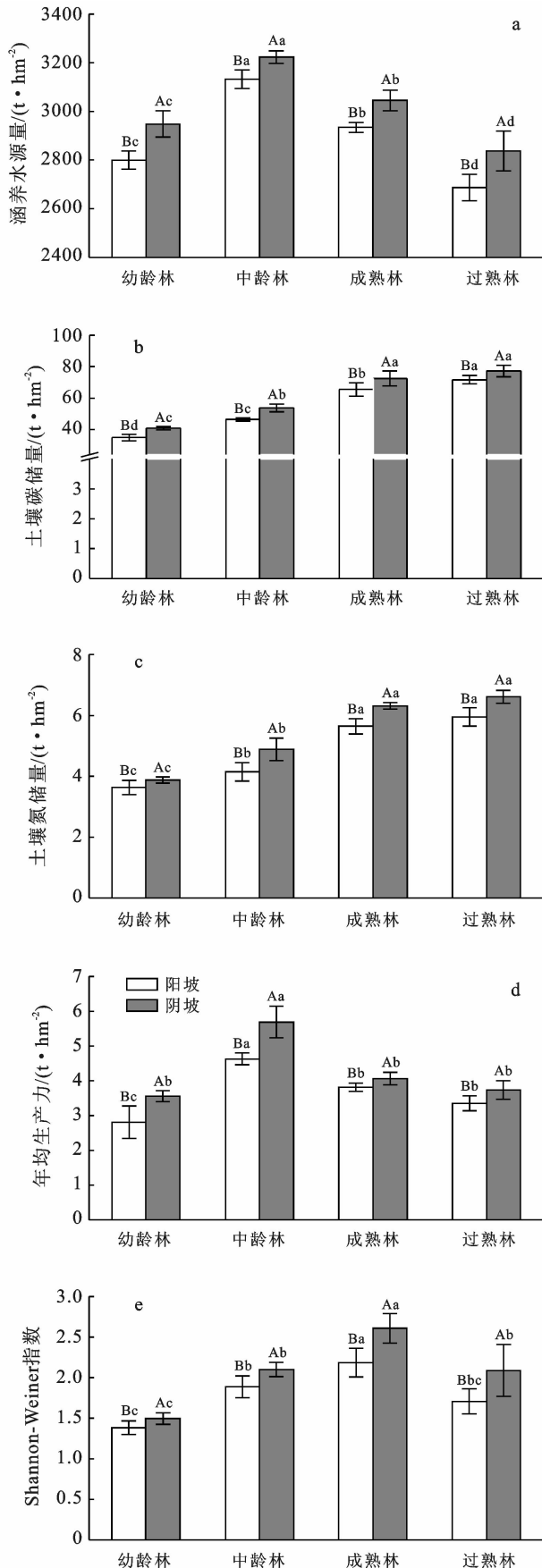
2 结果与分析

2.1 不同龄组与坡向人工刺槐林生态系统服务的差异

2.1.1 涵养水源方差分析得知 林龄对人工刺槐林的涵养水源量具有显著影响 ($p < 0.05$)。在相同坡向, 涵养水源量随林龄增加先增后减, 中龄林的涵养水源量最高, 过熟林的涵养水源量最低 (图 2a)。区分不同坡向发现, 4 个龄组在阴坡的涵养水源量均高于阳坡, 而且涵养水源量在阳坡、阴坡之间均差异显著 ($p < 0.05$), 在 4 个龄组中两两差异显著。

2.1.2 土壤碳储量在相同坡向 随着林龄增加, 土壤碳储量也逐渐增大, 过熟林的土壤碳储量最高 (图 2b)。不同龄组在阳坡的土壤碳储量差异达到显著水平 ($p < 0.05$)。在阴坡, 成熟林和过熟林差异不显著, 其余两两差异显著。区分不同坡向时发现, 同一龄组在不同坡向之间的土壤碳储量存在显著性差异 ($p < 0.05$), 在同一龄组中, 阴坡的土壤碳储量均高于阳坡, 说明阴坡更有利于土壤碳积累。

2.1.3 土壤氮储量林龄和坡向 对土壤氮储量的影响与土壤碳储量相似 (图 2c), 均具有显著影响 ($p < 0.05$)。在相同坡向, 随着林龄增加, 土壤氮储量呈增加趋势, 过熟林的土壤氮储量最高。成熟林和过熟林之间土壤氮储量差异不显著, 其余两两差异显著。在同一龄组, 阴坡的土壤氮储量均显著高于阳坡, 说明阴坡利于人工刺槐林土壤氮积累。



注:图中不同大写字母表示相同龄组不同坡向存在显著差异($p < 0.05$),不同小写字母表示相同坡向不同龄组间存在显著差异($p < 0.05$)。

图2 不同龄组与坡向人工刺槐林生态系统服务价值

2.1.4 年均生产力在相同坡向 人工刺槐林年均生产力随着林龄增加表现为先增后减的趋势,均在中龄林时期最高(图2d)。在阳坡,成熟林、过熟林分别与其他龄组的年均生产力差异显著($p < 0.05$),而成熟林与过熟林之间差异未达到显著水平。在阴坡,中龄林年均生产力显著高于其他龄组,其余龄组两两之间的差异不显著。相同龄组在不同坡向之间的年均生产力差异显著($p < 0.05$),表现为阴坡大于阳坡。

2.1.5 生物多样性方差分析得知 林龄对人工刺槐林的生物多样性具有显著性影响($p < 0.05$)。在相同坡向,从幼龄林到过熟林,Shannon-Weiner指数呈现先增后减的趋势(图2e),在成熟林达到最大值。在阳坡,过熟林与幼龄林、中龄林 Shannon-Weiner指数的差异未达到显著性水平,其余两两差异显著。在阴坡,中龄林和过熟林差异不显著,其余两两差异显著。同龄组不同坡向比较,阴坡 Shannon-Weiner指数显著大于阳坡,且随林龄增加,阴坡与阳坡差值逐渐增加。

2.2 不同龄组与坡向人工刺槐林生态系统服务权衡与协同分析

人工刺槐林各生态系统服务之间的权衡与协同关系会随着林龄和坡向的变化表现出不同程度的变化(见表3—4)。土壤碳储量与土壤氮储量归一化后的点基本分布于 $y=x$ 线附近(图3,4),表明两种生态系统服务间存在稳定的协同关系(RMSD平均值为0.037)。Shannon-Weiner指数分别与土壤碳储量、土壤氮储量、年均生产力的散点在一定程度上偏离 $y=x$ 线,表现出中等程度的权衡(RMSD平均值为0.086,0.094,0.095)。涵养水源量分别与土壤碳储量、土壤氮储量相对收益的点离 $y=x$ 线最远,权衡度最高(RMSD平均值为0.195,0.181)。

林龄对生态系统服务之间的权衡关系有显著性影响($p < 0.05$),从不同龄组来看,涵养水源量和土壤碳储量的权衡度及涵养水源量和土壤氮储量的权衡度均表现为过熟林>中龄林>幼龄林>成熟林(见表3),图3表明在成熟林阶段,涵养水源量和土壤碳储量及土壤氮储量的关系较为协同,而在幼龄林和中龄林阶段,生态系统服务相对收益更倾向于涵养水源服务,但在成熟林阶段生态系统服务相对收益更倾向于土壤碳储量及土壤氮储量服务;涵养水源量和 Shannon-Weiner指数的权衡度表现为中龄林>过熟林>幼龄林>成熟林(见表3)。图3表明在成熟林阶段,涵养水源量和 Shannon-Weiner指数的关系较为协同,而在幼龄林和中龄林阶段,生态系统服务相对收益更倾

向于涵养水源这一服务,但在成熟林阶段生态系统服务相对收益更倾向于 Shannon-Weiner 指数;年均生产力和土壤碳储量的权衡度及年均生产力和土壤氮储量的权衡度均表现为过熟林>中龄林>成熟林>幼龄林(见表 3)。图 3 表明在幼龄林阶段,年均生产力和土壤碳储量及土壤氮储量的关系较为协同,而在

中龄林阶段,生态系统服务相对收益更倾向于年均生产力服务,但在成熟林和过熟林阶段生态系统服务相对收益更倾向于土壤碳储量及土壤氮储量服务。生态系统服务之间的权衡关系对坡向的变化不敏感($p > 0.05$,见表 4)。在不同坡向,两个生态系统服务中的相对收益无明显倾向(见图 4)。

表 3 不同龄组人工刺槐林生态系统服务均方根偏差

龄组	生态服务项目	土壤碳储量	土壤氮储量	年均生产力	Shannon-Weiner 指数
幼龄林	涵养水源量	0.140±0.049	0.115±0.065	0.068±0.047	0.111±0.080
	土壤碳储量		0.057±0.029	0.085±0.025	0.055±0.038
	土壤氮储量			0.052±0.051	0.068±0.044
	年均生产力				0.051±0.057
中龄林	涵养水源量	0.265±0.021	0.266±0.033	0.077±0.037	0.189±0.039
	土壤碳储量		0.024±0.021	0.198±0.056	0.076±0.039
	土壤氮储量			0.199±0.061	0.077±0.053
	年均生产力				0.122±0.061
成熟林	涵养水源量	0.065±0.041	0.060±0.031	0.075±0.056	0.083±0.064
	土壤碳储量		0.039±0.030	0.134±0.080	0.060±0.050
	土壤氮储量			0.126±0.057	0.042±0.044
	年均生产力				0.148±0.072
过熟林	涵养水源量	0.307±0.084	0.283±0.077	0.086±0.040	0.130±0.092
	土壤碳储量		0.031±0.030	0.230±0.046	0.183±0.064
	土壤氮储量			0.207±0.052	0.160±0.063
	年均生产力				0.061±0.064

表 4 不同坡向人工刺槐林生态系统服务均方根偏差

坡向	生态服务项目	土壤碳储量	土壤氮储量	年均生产力	Shannon-Weiner 指数
阳坡	涵养水源量	0.207±0.116	0.189±0.120	0.076±0.044	0.114±0.072
	土壤碳储量		0.041±0.034	0.153±0.071	0.110±0.078
	土壤氮储量			0.129±0.076	0.089±0.076
	年均生产力				0.063±0.052
阴坡	涵养水源量	0.181±0.107	0.173±0.103	0.077±0.046	0.142±0.085
	土壤碳储量		0.034±0.024	0.171±0.086	0.077±0.06
	土壤氮储量			0.164±0.087	0.084±0.058
	年均生产力				0.127±0.079

2.3 人工刺槐林生态系统服务与林分因子的关系

以林分因子为解释变量,以 5 项生态系统服务为响应变量,通过 RDA 排序分析人工刺槐林生态系统服务对不同林分因子的响应程度。首先对五项生态系统服务进行去趋势对应分析(DCA),得出排序轴梯度长度为 $1.2 < 3$,适合进行冗余分析(RDA)。轴 1,轴 2,轴 3 和轴 4 的特征值分别为 0.477,0.223,0.017,0.002,前两轴累积解释了 69.96%的生态系统服务特征。

如图 5 所示,土壤氮储量、土壤碳储量与林分高度、叶面积指数、郁闭度、盖度的夹角均为锐角,且均呈正相关,Shannon-Weiner 指数与盖度、郁闭度、凋落物厚度、叶面积指数、林分高度也都呈正相关,同时年均生产力和土壤涵养水源量与凋落物厚度、盖度呈正相关,而坡度与 5 项生态系统服务的夹角为钝角,呈现不同程度的负相关。总体来看,5 项生态系统服务受盖度、郁闭度、凋落物厚度、坡度的影响较大。

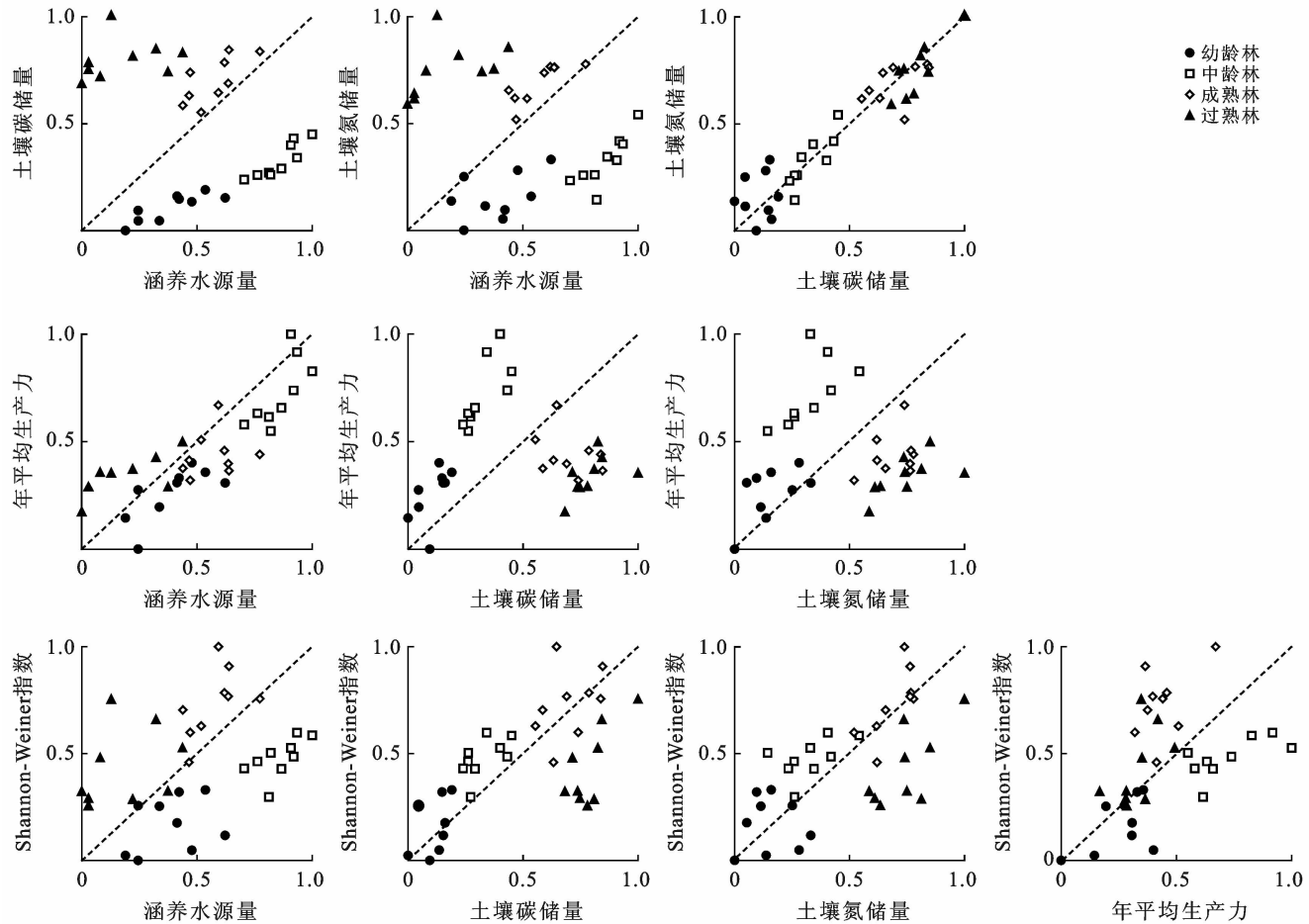


图 3 不同龄组人工刺槐林生态系统服务相对收益散点分布

3 讨论

3.1 林龄和坡向对生态系统服务的影响

林龄是物种组成、物质生产、涵养水源、土壤养分固存等生态系统服务变化的重要影响因素,坡向通过影响光照强度、水分条件、土壤理化性质等也会对生态系统服务产生影响。本研究中,人工刺槐林的涵养水源量、年均生产力与生物多样性 3 项生态系统服务价值均随林龄增加呈现先增后减的趋势,土壤碳、氮储量价值随林龄增加呈增加趋势,与刘江华等^[19]、张晶晶等^[20]、艾泽民等^[21]的研究相一致。涵养水源量和年均生产力均在中龄林时期最高,随后开始下降,生物多样性则在成熟林时期最高,生物多样性的变化随涵养水源与生产力的变化具有滞后性,这也说明生态系统服务随林龄变化存在不同步变化的复杂规律^[5]。

坡向对人工刺槐林 5 项生态系统服务产生显著影响,和阳坡相比,阴坡土壤含水量较高^[22],蒸发量少^[23],更适宜林木生长,5 项生态系统服务价值表现为阴坡高于阳坡。

3.2 林龄和坡向对生态系统服务权衡关系的影响

人工刺槐林在不同生长阶段,种内、种间对资源的分配和竞争对生态系统服务权衡也会产生影响。幼龄时期是刺槐林对新栽培环境的适应阶段,刺槐林的生态系统服务间以协同关系为主。权衡往往发生在林分快速发展的阶段,中龄林时期,年均生产力高,光合、固碳、固氮和呼吸等代谢旺盛,植被生长与水分、养分的供需矛盾的激化,使涵养水源与土壤碳、氮固存、维持物种多样性服务的权衡度较高,年均生产力与土壤碳、氮固存服务的权衡度较高。成熟林时期林木生长速率变缓并趋于稳定^[24],涵养水源与土壤碳、氮固存、维持物种多样性服务较为协同,而过熟林时期林分衰败,物种多样性指数下降,土壤干层化严重^[25],刺槐林的生态系统服务间以权衡关系为主且权衡度较高。在黄土残垣沟壑区,刺槐林生长发育的程度取决于水分因子^[26],水分供给不足会抑制林木生长^[25]和土壤环境的改善^[24],从而使涵养水源与其他生态系统服务的权衡度较高。

本研究表明,刺槐林在幼龄林和中龄林时期倾向于发挥涵养水源服务,在成熟林和过熟林时期倾向于发挥土壤碳、氮固存和维持生物多样性,Lu 等^[26]得

出了类似结论。可见,在不同林龄阶段,刺槐林发挥生态系统服务的倾向不同,刺槐在不同发育阶段,自身的需求和环境供给存在着差异,所以其在不同的生长阶段生态系统服务权衡关系也发生了相应变化。而坡向对刺槐林生态系统服务的两两权衡关系影响

不显著,这可能是因为生态系统服务两两之间的权衡关系不如单项生态系统服务对坡向的变化敏感^[26],说明林龄是引起生态系统服务权衡关系变化的主导因子,生态系统服务权衡关系主要随着林龄的变化而变化。

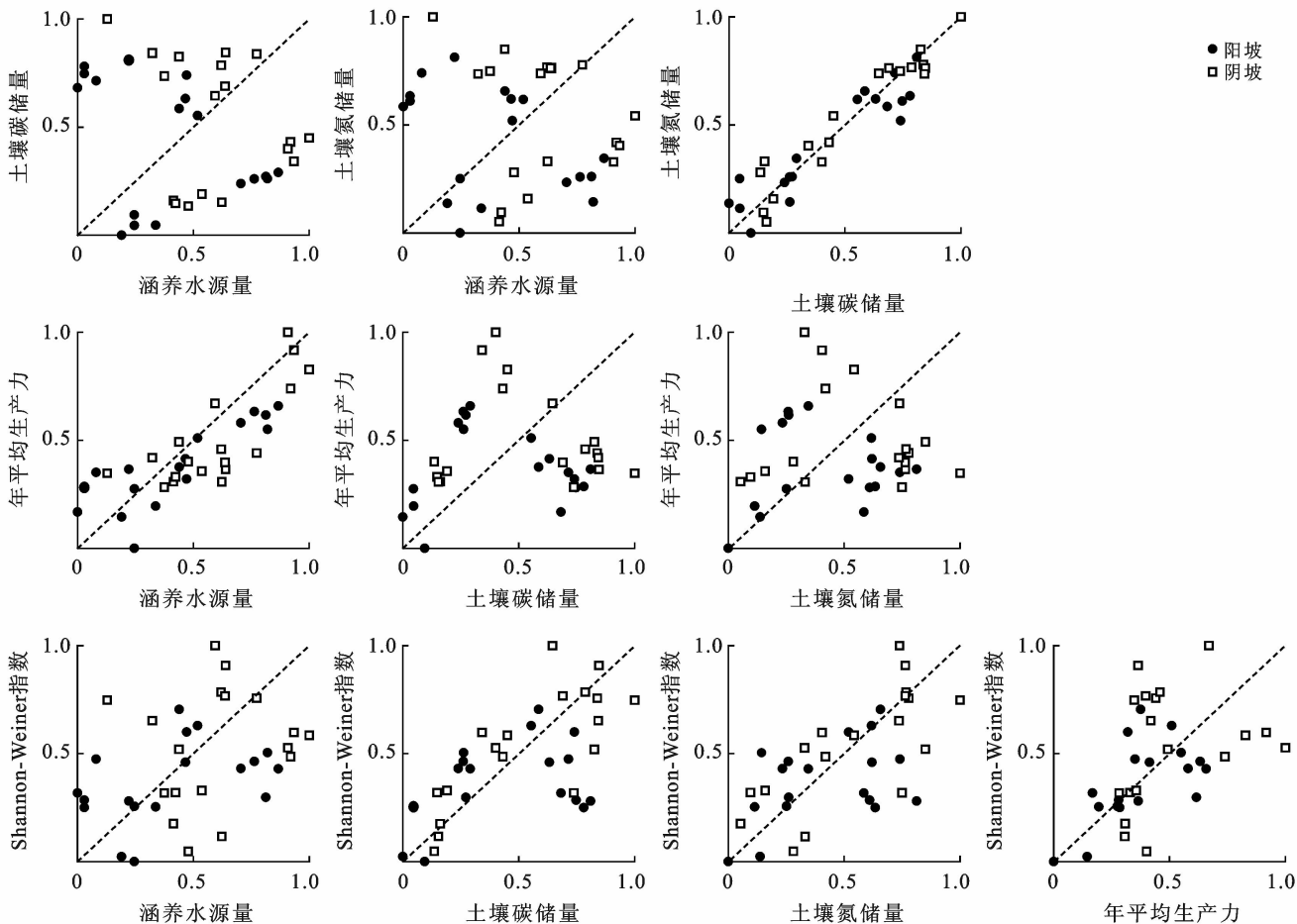
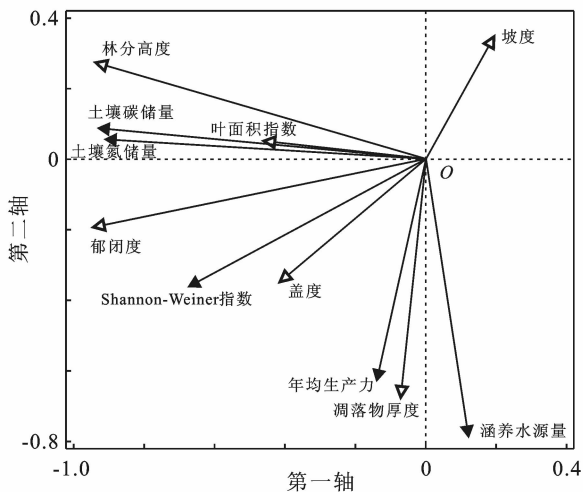


图 4 不同坡向人工刺槐林生态系统服务相对收益散点分布



注:生态系统服务由实心箭头表示,林分因子以空心箭头表示。

图 5 人工刺槐林生态系统服务与林分因子关系的 RDA 排序

3.3 生态系统服务与林分因子的关联特征

影响人工刺槐林生态系统服务的林分因子中,植被盖度与 5 项生态系统服务呈正相关,说明植被盖度的提高有助于生态系统服务的提升,在人工林管理中应加强林下植被的培育,适度引种水栒子(*Cotoneaster multiflorus*)或黄刺玫(*Rosa xanthina*)等耐旱灌木^[8]。坡度与 5 项服务呈负相关,说明坡度越高,土壤水分条件差,对人工刺槐林的生产力、涵养水源和生物多样性等产生负效应,应在陡坡处引入耗水少的达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)或长芒草(*Stipa bungeana*)等乡土草本^[8]。凋落物厚度反映林地凋落物的现存量与分解程度,凋落物厚度高,可以拦蓄更多降水,有助于涵养水源,同时凋落物是土壤碳素、氮素的主要来源^[27],应合理调节林分结构,促进凋落物分解。

本文仅对人工刺槐林 5 个主要生态系统服务两

两之间的权衡关系进行了研究,但由于生态系统服务的多样性和相互影响的复杂性,因此关于多个生态系统服务权衡关系及其互动机制还需进一步研究。

4 结论

(1) 不同林龄、坡向人工刺槐林的生态系统服务的差异均达到显著性水平($p < 0.05$),其中涵养水源量和年均生产力从幼龄林到中年林逐渐增加,随后逐渐减小,生物多样性呈先增后减趋势,在成熟林时期最高,土壤碳、氮储量随林龄增加呈逐渐增加趋势,阴坡的生态系统服务价值高于阳坡。

(2) 林龄是引起生态系统服务权衡关系变化的主导因子,生态系统服务在中年林和过熟林时期权衡度高,说明该时期生态系统服务间协调性较差,不利于整体生态系统服务效益的发挥。应在中年林时期加强林下植被的培育,引入耐旱灌木或乡土草本,在过熟林经营过程中,在满足涵养水源的前提下,合理控制林分密度,促进其他生态系统服务的作用,提高整体效益。

(3) 人工刺槐林5项生态系统服务与盖度、郁闭度、凋落物厚度呈现不同程度的正相关,与坡度呈现不同程度的负相关。

[参 考 文 献]

- [1] Costanza R, Darge R C, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [2] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: Synthesis* [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [3] 傅伯杰,于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法[J]. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [4] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [5] 李振,李浩,曾宪曙,等. 广东鹤山3种亚热带人工林的生态系统服务价值动态[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 967-975.
- [6] 朱建佳,戴尔阜,郑度,等. 采伐影响下人工林木材生产与固碳功能权衡特征:以湖南会同森林生态实验站为例[J]. *地理学报*, 2018, 73(1): 152-163.
- [7] 吴炜,项文化,勾蒙蒙,等. 中亚热带3种次生林生态系统服务权衡与协同[J]. *森林与环境学报*, 2019, 39(3): 256-264.
- [8] 张文辉,刘国彬. 黄土高原植被恢复与建设策略[J]. *中国水土保持*, 2009(1): 24-27.
- [9] 刘恩田,赵忠,宋西德,等. 渭北黄土高原刺槐林健康评价指标体系的构建[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(10): 67-75.
- [10] Cademus R, Escobedo F, Mc Laughlin D, et al. Analyzing trade-offs, synergies, and drivers among timber production, carbon sequestration, and water yield in pinus elliotii forests in southeastern USA [J]. *Forests*, 2014, 5(6): 1409-1431.
- [11] 孙艺杰,任志远,郝梦雅,等. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素:以延安市为例[J]. *生态学报*, 2019, 39(10): 3443-3454.
- [12] 王川,刘春芳,乌亚汗,等. 黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 521-531.
- [13] 国家林业局. LY/T2908-2017 主要树种龄级与龄组划分[S]. 北京:中国标准出版社, 2017.
- [14] 张振明,余新晓,牛健植,等. 不同林分枯落物层的水文生态功能[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(3): 139-143.
- [15] 程东娟,张亚丽. 土壤物理实验指导[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000.
- [17] 李泰君. 陕西黄土高原人工刺槐林碳固持特征与影响因素[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2015.
- [18] Bradford J B, Damato A W. Recognizing trade-offs in multi-objective land management [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(4): 210-216.
- [19] 刘江华,刘国彬,侯禧禄,等. 刺槐林地土壤水分与林下植物群落生物量的关系[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(3): 43-46.
- [20] 张晶晶,赵忠,宋西德,等. 渭北黄土高原人工刺槐林植物多样性动态[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(12): 2490-2496.
- [21] 艾泽民,陈云明,曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 333-341.
- [22] 孔凌霄,毕华兴,周巧稚,等. 晋西黄土区不同立地刺槐林土壤水分动态特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 163-169.
- [23] 周萍,刘国彬,侯喜禄. 黄土丘陵区侵蚀环境不同坡面及坡位土壤理化特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(1): 7-12.
- [24] 韦景树,李宗善,冯晓琦,等. 黄土高原人工刺槐林生长衰退的生态生理机制[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2433-2444.
- [25] 吴多洋,焦菊英,于卫洁,等. 陕北刺槐林木生长及林下植被与土壤水分对种植密度的响应特征[J]. *西北植物学报*, 2017, 37(2): 346-355.
- [26] Lu Nan, Fu Bojie, Jin Tiantian, et al. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across Loess Plateau landscapes [J]. *Landscape Ecology*, 2014, 29(10): 1697-1708.
- [27] 高雪松,邓良基,张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 53-56.