

DOI: 10.5846/stxb202002010187

杨智姣, 温晨, 杨磊, 李宗善, 卫伟, 张钦弟. 半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8606-8617.

Yang Z J, Wen C, Yang L, Li Z S, Wei W, Zhang Q D. Effects of different restoration methods on ecosystem multifunctionality in the semi-arid loess small watershed. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8606-8617.

半干旱黄土小流域不同恢复方式对生态系统多功能性的影响

杨智姣¹, 温晨¹, 杨磊², 李宗善², 卫伟², 张钦弟^{1,*}

¹ 山西师范大学生命科学学院, 临汾 041004

² 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:在黄土高原大规模退耕还林(草)背景下,植被恢复对生态系统功能会产生极大影响。以往研究多为比较不同恢复方式或植被类型的单一生态系统功能,对生态系统多功能性的研究亟待加强。因此,基于甘肃定西龙滩流域 3 种恢复方式(天然荒草、自然恢复、人工恢复)6 种植被类型(长芒草草地、赖草草地、苜蓿草地、柠条灌丛、油松林、山杏林)38 个样地调查数据,选取与土壤养分储存与循环、水源涵养、初级生产力、多样性维持等相关的 23 个功能指标利用平均值法量化生态系统多功能性。研究结果显示,(1)除营养物转化与循环功能外,其余土壤相关的生态系统功能在不同恢复方式与植被类型间均具有显著性差异($P<0.05$)。人工恢复植被的土壤肥力显著高于自然恢复植被;人工恢复植被中土壤肥力从高到低依次为柠条灌丛、苜蓿草地、山杏林、油松林。自然恢复植被的水源涵养功能显著高于人工恢复植被。(2)除植物生长策略外,其余植物相关的生态系统功能在不同恢复方式与植被类型间均具有显著性差异($P<0.05$)。人工恢复植被中地上初级生产力从高到低依次为山杏林、油松林、柠条灌丛、苜蓿草地,并显著高于自然恢复植被。人工恢复植被中植物养分吸收能力从高到低依次为苜蓿草地、柠条灌丛、油松林、山杏林,并显著高于自然恢复植被。自然恢复植被的物种多样性显著高于人工恢复植被。(3)生态系统多功能性在不同恢复方式与植被类型间均具有显著性差异($P<0.05$)。生态系统多功能性表现为人工恢复植被高于自然恢复植被,但人工恢复植被的水源涵养功能与物种多样性均低于自然恢复植被,不利于生态系统的可持续发展。研究认为,在植被恢复具体实践中,应针对不同的恢复目标,根据各植被类型的功能特征,制定因地制宜的植被恢复战略。

关键词:黄土高原;植被恢复;平均值法;多功能性;生态系统功能

Effects of different restoration methods on ecosystem multifunctionality in the semi-arid loess small watershed

YANG Zhijiao¹, WEN Chen¹, YANG Lei², LI Zongshan², WEI Wei², ZHANG Qindi^{1,*}

¹ College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

² State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: Along with the large-scale “Grain for Green” in the Loess Plateau, vegetation restoration significantly affected ecosystem functions. Previous studies have mostly compared the functions of a single ecosystem with different restoration methods or vegetation types, and the research on ecosystems multifunctionality needs to be strengthened urgently. We conducted an ecosystem multifunctionality study in Longtan watershed of Dingxi, Gansu Province, China, based on survey data from 38 plots, which included 3 restoration methods (native grassland, natural restoration and artificial restoration)

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC0501701);国家自然科学基金项目(41871194,41877539,41601027)

收稿日期:2020-02-01; **网络出版日期:**2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nyzqd@126.com

and 6 vegetation types (*Stipa bungeana* grassland, *Leymus secalinus* grassland, *Medicago sativa* grassland, *Caragana korshinskii* shrubland, *Pinus tabuliformis* forestland and *Armeniaca sibirica* forestland), We selected 23 functional indexes related to soil nutrient storage and transformation cycle, water conservation, primary productivity, and diversity maintenance to quantify ecosystem multifunctionality by averaging approach. The results showed that (1) except for nutrient transformation and recycling, the soil single ecosystem function had significant differences among different restoration methods and vegetation types ($P < 0.05$). The soil fertility function of artificial restoration vegetation was significantly higher than that of natural restoration vegetation ($P < 0.05$). The soil fertility of artificial restoration vegetation was in the order *Caragana korshinskii* shrubland, *Medicago sativa* grassland, *Armeniaca sibirica* forestland and *Pinus tabuliformis* forestland from high to low. The water conservation functional of natural restoration vegetation was significantly higher than that of artificial restoration vegetation ($P < 0.05$). (2) Except for plant growth strategies function, the plant single ecosystem function had significant differences among different restoration methods and vegetation types ($P < 0.05$). The above ground primary productivity of artificial restoration vegetation was significantly higher than that of natural restoration vegetation ($P < 0.05$). The above ground primary productivity of artificial restoration vegetation was in the order *Armeniaca sibirica* forestland, *Pinus tabuliformis* forestland, *Caragana korshinskii* shrubland, *Medicago sativa* grassland from high to low. The plant nutrient absorption function of artificial restoration vegetation was significantly higher than that of natural restoration vegetation ($P < 0.05$). The plant nutrient absorption of artificial restoration vegetation was in the order *Medicago sativa* grassland, *Caragana korshinskii* shrubland, *Pinus tabuliformis* forestland and *Armeniaca sibirica* forestland from high to low. The species diversity maintenance of natural restoration vegetation was significantly higher than that of artificial restoration vegetation ($P < 0.05$). (3) Ecosystem multifunctionality had significant differences among different restoration methods and vegetation types ($P < 0.05$). Ecosystem multifunctionality of artificial restoration vegetation was significantly higher than that of natural restoration vegetation, but the water conservation and species diversity of the artificial restoration vegetation were lower than that of the natural restoration vegetation, which was not conducive to the sustainable development of the ecosystem. It is considered that in the practice of vegetation restoration, vegetation restoration strategy should be formulated according to the different restoration objectives and the functional characteristics of each vegetation type.

Key Words: the Loess Plateau; vegetation restoration; averaging approach; multifunctionality; ecosystem function

近几十年来,人类活动导致生物多样性丧失和生态系统结构简化的趋势不断加剧,进而使生态系统功能产生不可预知的改变^[1]。开展植被恢复背景下生态系统功能的研究,有助于为生态恢复工程的科学实施和可持续管理提供借鉴与参考。生态系统功能受多种因素共同影响,包括植被恢复方式、生长年限、土壤类型、气候条件、地形等^[2-3]。Liang 等人对黄土高原的研究中发现不同恢复方式下的土壤水分具有显著性差异,且人工恢复植被的土壤水分明显低于自然恢复植被^[4];而刘宥延等人则发现人工恢复植被则具有较好的土壤养分保持能力^[5]。不同的植被类型由于群落组成的异质性,经过地上和地下物种之间植物生产力、质量和凋落物分解等过程^[6],提供不同的生态系统功能^[7]。随着对生态系统功能理解的加深,研究者们逐步认识到生态系统可以同时执行多种功能和服务,即生态系统多功能性(Ecosystem multifunctionality, EMF)^[8]。以往仅考虑某一生态系统功能的管理策略^[9-10],往往忽略了其他重要的功能,进而削弱生态系统维持或提供其他功能的能力,因此近年来对生态系统多功能性的研究越来越受到关注^[11-12]。

不断积累的研究结果表明,维持生态系统的多功能性比生态系统单一功能需要更高的生物多样性^[13];以功能性状为基础的功能多样性比物种多样性更能准确指示生态系统功能的变化,因为高的功能多样性会提高生物对环境资源的利用效率^[14];地下微生物多样性对生态系统多功能性也起着至关重要的作用,高的土壤多样性有助于维持生态系统多功能性^[15]。在研究对象方面,也从关注草地生态系统^[16-17]逐步向森林生态系统以及水生生态系统发展^[18]。然而,有关生态系统多功能性的研究在指标选取与量化方法上并未得到统一,

Maestre 等人^[10, 19]采用体现碳、氮、磷循环三个生态系统过程的 14 个功能指标来综合评价全球干旱区的生态系统多功能性,发现物种丰富度与生态系统多功能性呈显著正相关,其所选用的指标与均值评价法已成为近年来研究生态系统多功能性的应用次数最多的方法之一。譬如,Valencia 等人同样采用这种指标和方法量化西班牙的干旱区生态系统多功能性,发现功能多样性的高低将直接影响生态系统多功能性对干旱的抵抗力^[19]。

黄土高原是我国水土流失最严重的地区,以退耕还林(草)工程为代表的大规模生态恢复项目实施以来,植被覆盖显著增加,黄河泥沙输移明显减少,土壤的碳氮库也发生了较大变化^[20-22]。目前,关于黄土高原植被恢复生态效益的研究,大多仅单独从养分、水分、初级生产力等方面进行比较研究。例如,Liu 等比较了不同植被恢复过程中土壤碳氮储量的差异性^[23];Yu 和 Qiao 等人分别比较了不同植被类型碳及土壤理化性质的差异^[24-25];Cao 等人研究黄土高原深层蓄水随植被类型和降雨的变化^[26]。生态系统重要的价值在于其多功能性,然而在黄土高原地区植被恢复对生态系统多功能性的相关研究还较为缺乏。黄土高原作为我国生态修复重建的重点区域之一,了解不同恢复措施对生态系统结构与功能的影响,进而分析不同植被类型恢复模式下生态系统多功能性的响应,是保证黄土高原生态系统可持续发展的前提,也是目前急需解决的科学问题。因此,本文基于目前将黄土高原多种生态系统功能同时作用情况进行考虑的研究较少,从生态系统多功能性的角度全面考虑黄土高原的恢复治理问题,评价不同恢复方式下的生态系统多功能性,探究在人工植被恢复方式过程中更有利于多功能水平维持的植被类型,并探讨影响生态系统多功能性的主要因素,以选择合适的植被恢复类型,获取最佳的生态系统多功能性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市龙滩流域(图 1),属于黄土高原典型丘陵沟壑区,地理位置在 35°72'—35°75' N, 104°45'—104°51' E,海拔在 1964—2212 m。该区域雨热同期,降雨少,且主要集中在 6 月—9 月,年平均降水量为 386 mm,但蒸散量大,年平均温度为 6.8 °C,为典型半干旱气候。土壤类型主要为黄绵土,其中黏粒含量为 4.24%—6.48%,土质较为疏松,水土流失严重。研究流域内,天然植被中优势种主要以长芒草(*Stipa bungeana*)、赖草(*Leymus secalinus*)、大针茅(*Stipa grandis*)、百里香(*Thymus mongolicus*)为主。人工恢复植被主要以油松(*Pinus tabulaeformis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)为主。

1.2 样地设置、植被调查与取样

本研究于 2017 年 8 月进行野外调查与采样,共选取立地条件相似的 6 种植被类型共 38 个样地,包括长芒草草地、赖草草地、苜蓿草地、柠条灌丛、油松林和山杏林,其中,长芒草草地为区域性代表植被,从未进行过人为耕种等活动,即天然荒草(Native grassland, NG);赖草草地为自然恢复(Natural restoration, NR)样地;人工恢复(Artificial restoration, AR)样地包括紫花苜蓿草地、柠条灌丛、油松林、山杏林四种不同植被类型(表 1)。每个草地样地随机设置 4 个 1 m×1 m 样方;灌丛样地设置 4 个 5 m×5 m 灌木样方,并在每个样方内设置 1 个 1 m×1 m 草本小样方;乔木样地设置 4 个 10 m×10 m 乔木样方,并在每个乔木样方内设置 1 个 5 m×5 m 灌木样方和 1 个 1 m×1 m 草本层小样方。分别记录每个样方中物种种类、盖度、密度、高度、灌木的地径(mm)、乔木的胸径等数量指标。与此同时,用 GPS 和手持罗盘记录每个样方的海拔、经纬度、坡向和坡位,坡向取正北方向为 0°,按顺时针方向递增。所有地上部分记录过后,草本层采用地上刈割法获取地上生物量(Above ground biomass, AGB),烘干后获取植物样品。

地上生物刈割后,用土钻取 0—60 cm 土样,每 20 cm 进行一次取样,用来测定土壤养分含量及土壤理化性质,土壤粒径组成和土壤质地用 Mastersizer 2000 激光颗粒测试仪测定。此外,每个样方用容积为 100 cm³ 的环刀采集 3 次土样,用来计算土壤容重和土壤总孔隙度。确定土壤质地用吸管法测定土壤粒径组成,分别

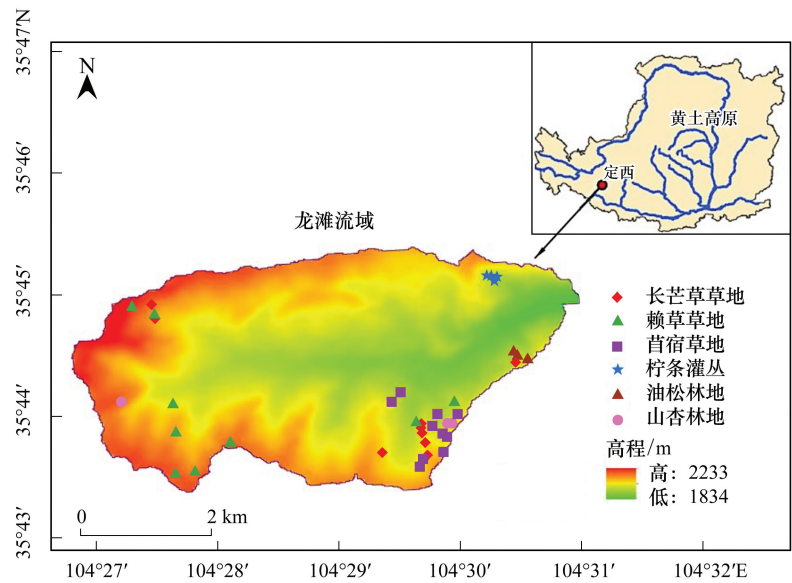


图 1 研究区域和实验样点

Fig.1 Location of the study area and experimental sites

计算黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002—0.02 mm)和砂粒(0.02—2 mm)含量的百分数。最后,使用土钻在样地中进行 0—5 m 深层土壤取样,每间隔 0.2 m 进行一次取样,装袋密封后回实验室用来测定土壤土壤水分。

表 1 不同植被类型基本信息描述(平均值±标准误)

Table 1 Basic description of different vegetation types (mean±SE)

植被类型 Vegetation type	样地数量 Sample number	恢复年限 Restoration age	地形属性 Topographical properties			土壤特性 Soil properties			
			坡向 Slope aspect / (°)	坡度 Slope gradient/ (°)	海拔 Elevation/m	容重 Bulk density/ (g/cm ³)	粘粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sank/%
长芒草地 Stipa bungeana grassland	9	—	247±20	20±7	2052±32	1.14±0.03	0.05±0.00	0.43±0.02	0.52±0.02
赖草草地 Leymus secalinus grassland	9	14	265±46	13±8	2085±67	1.94±0.06	0.05±0.00	0.41±0.02	0.53±0.02
苜蓿草地 Medicago sativa grassland	10	14	151±27	16±2	2033±44	1.17±0.05	0.05±0.00	0.42±0.03	0.53±0.03
柠条灌丛 Caragana korshinskii shrubland	4	30	80±6	29±5	2087±27	1.10±0.03	0.05±0.00	0.44±0.04	0.51±0.04
油松林 Pinus tabuliformis forestland	3	47	342±14	14±1	1978±15	1.10±0.04	0.05±0.00	0.41±0.01	0.54±0.01
山杏林 Armeniaca sibirica forestland	3	47	236±60	21±4	2072±61	1.25±0.02	0.05±0.00	0.40±0.01	0.55±0.01

1.3 生态系统功能测定

本研究中一共选取了 23 种与生态系统功能相关的指标来量化生态系统多功能性,这些指标都是土壤-植

物生物地球化学过程和生态系统承载力的基础。主要从植物和土壤两个方面进行考虑,将这些指标分为与土壤肥力、水源涵养、营养物转化与循环、地上初级生产力、植物生长策略、植物养分吸收、植物多样性维持^[27-28]相关的 7 个功能类别。

1.3.1 土壤肥力

以土壤全碳(Soil total carbon,STC)、土壤全氮(Soil total nitrogen,STN)、速效氮(Available nitrogen,AN)、土壤有机质(Organic matter,OM)、土壤全磷(Soil total phosphorus,STP)、有效磷(Available phosphorus,AVP)、土壤氮磷比(Soil N:P ratio,S N:P)7 个常用且易测得的指标来指示土壤肥力。其中,STC、STN 用 Vario MAX cube 元素分析仪测定,AN 用碱解扩散法测定,STP 用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定,AVP 用碳酸氢钠浸提后比色法测定,OM 用重铬酸钾氧化-容量法进行测定,以上各项指标均取 3 层的均值作为该样地整体水平。

1.3.2 水源涵养

选取土壤水分(Soil moisture content,SMC)和毛管孔隙度(Capillary porosity,CP)作为指示不同植被类型土壤水源涵养功能的指标。其中,SMC 通过在实验室烘干土壤样品后取各层均值为样地整体土壤水分;CP 采用环刀取样烘干称重获得。

$$\text{毛管孔隙度}(CP) = \frac{\text{环刀内水分重量}}{\text{环刀内干土质量}} \times \text{土壤容重} \times 100\%$$

1.3.3 营养物转化与循环

选用土壤总孔隙度(Bulk porosity,BP)、土壤碳氮比(Soil C:N ratio,S C:N)、土壤 pH 来指示营养物转化与循环过程。其中,BP 是通过环刀取样烘干称重获取;土壤 pH 通过 FE20/EL20 型实验室 pH 计测定。

$$\text{土壤总孔隙度} = 1 - \frac{\text{土壤容重}}{\text{土壤比重}} \times 100\%$$

1.3.4 地上初级生产力

地上初级生产力选用地地上生物量(Above ground biomass)和叶面积指数(Leaf area index,LAI)来表征。其中,草地上生物量通过地上刈割法收取后称重获取;柠条灌丛生物量采取收获法估算,具体为先测定每丛高度、地径和分支数,然后在每一样地中收割 3 株标准丛烘干称重,利用标准丛拟合相关关系进而推算单丛生物量;油松林的地上生物量通过测定树高和胸径,采用程堂仁的生物量模型进行估算^[29];山杏林的地上生物量为测定植株高度、丛生枝个数和植冠垂直投影面积,采用曾伟生的生物量模型进行估算^[30];LAI 在野外通过植物冠层分析仪进行测定。

1.3.5 植物生长策略

通过植物碳氮比(Plant C:N ratio,P C:N)、植物氮磷比(Plant N:P ratio,P N:P)和比叶面积(Specific leaf area,SLA)来指示植物生长策略。其中,SLA 是通过在野外通过植物冠层分析仪测定面积后烘干称重计算获取。

1.3.6 植物养分吸收

采用植物全氮(Plant total nitrogen,PTN)、植物全碳(Plant total carbon,PTC)、植物全磷(Plant total phosphorus,PTP)来指示植物的养分吸收情况。用 Vario MAX cube 元素分析仪测定植物根、茎、叶的全碳、全氮,植物全磷采用钼锑抗比色法进行测定,最后取根茎叶的均值表征植物整体养分吸收情况。

1.3.7 植物多样性维持

分别计算不同植被类型的 Gleason 丰富度指数(J)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)和 Pielou 均匀度指数(P),具体计算方法如下:

$$J = \frac{S}{\ln A}$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$P = \frac{H}{\ln S}$$

其中, S 为物种数, A 为样方面积, P_i 为种 i 的重要值。其中,草本层、灌木层重要值 = (相对盖度 + 相对高度) / 2,乔木层重要值 = (相对密度 + 相对优势度 + 相对高度) / 3。

采用群落分层多样性测度法,计算群落乔木层、灌木层和草本层的多样性指数后,设置加权参数计算总体多样性水平^[31],具体计算过程如下:

群落丰富度指数(D): $D = D_1 + D_2 + D_3$

群落多样性指数和均匀度指数(D): $D = W_1 D_1 + W_2 D_2 + W_3 D_3$

其中, D_1 、 D_2 、 D_3 分别为群落乔木层、灌木层和草本层的多样性指数,在这里,乔木群落的权重系数 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 0.5、0.25、0.25;灌木群落的权重系数 W_1 、 W_2 、 W_3 分别为 0、0.5、0.5。

1.4 生态系统多功能性的计算

在计算生态系统多功能性指数之前,首先对 23 个功能指标进行标准化,使各指标都处于同一数量级以上,从而可以进行综合测评分析,本研究选用最小-最大标准化方法。最后运用平均值法计算生态系统多功能性指数^[27],具体计算过程如下:

$$f_x = \frac{x_i}{\max_i} \quad (1)$$

式中, x_i 为样地 i 的生态系统功能参数, $\max_i$ 为生态系统功能的最大值。

$$Mf = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F g(f_i) \quad (2)$$

式中 F 为每个生态系统功能的样地总数, g 为对所有函数的标准化,使 Mf 维持在 0—1 水平上。

$$M_i = \frac{\sum_{i=1}^{23} Mf}{23} \quad (3)$$

式中, M_i 为样地 i 的生态系统多功能性参数。

1.5 统计分析

在本研究中运用 SPSS Statistics 15.0 软件进行统计分析。首先,用单因素方差分析法分析不同植被类型包括长芒草草地、赖草草地、苜蓿草地、柠条灌丛、油松林与山杏林间的生态系统多功能性与单一功能分别是是否存在显著性差异。其次,分析不同恢复方式包括天然荒草、自然恢复与人工恢复间的生态系统多功能性、单一功能是否存在显著性差异。其中,在分析显著性差异前,需采用 Levene test 检验方差是否齐性,方差齐性时采用最小显著差异法(LSD)进行多重比较,方差不齐时采用 Tamhane's T2 进行多重比较($P < 0.05$),最后用 OriginPro 2016 软件进行绘图。

2 研究结果

2.1 不同植被类型土壤功能指标的差异性

不同植被类型的单一土壤生态系统功能差异见图 2,除营养物转化与循环功能外,不同植被类型间的土壤肥力和水源涵养功能间均有显著性差异($P < 0.05$)。在土壤肥力保持方面,人工恢复植被的土壤肥力高于自然恢复植被,且人工恢复植被与自然恢复植被间具有显著性差异($P < 0.05$);在人工恢复植被中,土壤肥力从高到低依次为柠条灌丛、苜蓿草地、山杏林、油松林,且功能最高的柠条灌丛与其它人工恢复植被间具有显著性差异($P < 0.05$)。在土壤水源涵养方面,自然恢复植被的水源涵养功能显著高于人工恢复植被($P < 0.05$)。

2.2 不同植被类型植物功能指标的差异性

不同植被类型的植物单一生态系统功能差异见图 3,除植物生长策略外,不同植被类型在地上初级生产力、植物养分吸收和多样性维持等方面均有显著性差异($P < 0.05$)。在地上初级生产力方面,人工恢复植被的

地上初级生产力高于自然恢复植被,且人工恢复植被与自然恢复植被间具有显著性差异($P<0.05$);在人工恢复植被中地上初级生产力从高到低依次为山杏林、油松林、柠条灌丛、苜蓿草地。在植物养分吸收方面,人工恢复植被的养分吸收功能高于自然恢复植被,且具有显著性差异($P<0.05$);在人工恢复中,植物养分吸收功能从高到低依次为苜蓿草地、柠条灌丛、油松林、山杏林。在植物多样性维持方面,自然恢复植被的物种多样性显著高于人工恢复植被,且两者间具有显著性差异($P<0.05$)。

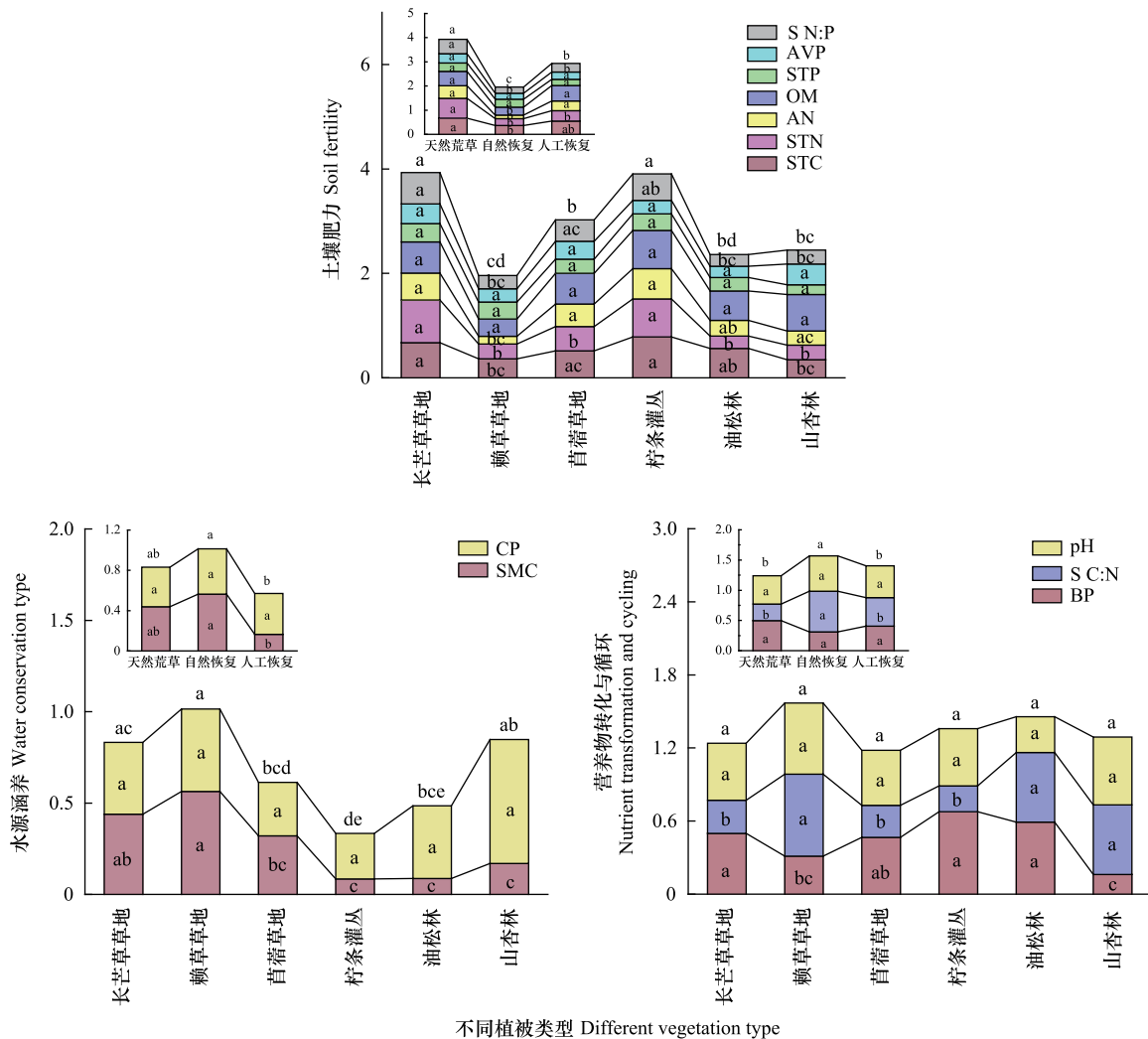


图2 不同植被类型间土壤生态系统功能指标的差异

Fig.2 The different of soil function indexes among different vegetation type

图中不同小写字母代表不同植被类型/不同恢复方式差异显著; S N:P, 土壤氮磷比; AVP, 有效磷; STP, 土壤全磷; OM, 土壤有机质; AN, 速效氮; STN, 土壤全氮; STC, 土壤全碳; CP, 毛管孔隙度; SMC, 土壤水分; S C:N, 土壤碳氮比; BP, 土壤总孔隙度

2.3 不同植被类型生态系统多功能性差异性分析

不同植被类型的生态系统多功能性差异见图4, 不同植被类型间的生态系统多功能性具有显著性差异($P<0.05$)。人工恢复植被的土壤多功能性与植物多功能性均高于自然恢复植被, 总体生态系统多功能性也表现为人工恢复植被显著高于自然恢复植被, 且人工恢复植被与天然荒草间无显著性差异; 在人工恢复植被中土壤多功能性从高到低依次为柠条灌丛、苜蓿草地、山杏林、油松林, 植物多功能性从高到低依次为山杏林、苜蓿草地、油松林、柠条灌丛, 总体生态系统多功能性从高到低依次为柠条灌丛、苜蓿草地、山杏林、油松林, 且多功能性最高的柠条灌丛与除油松林外的其它人工恢复植被间均无显著性差异。

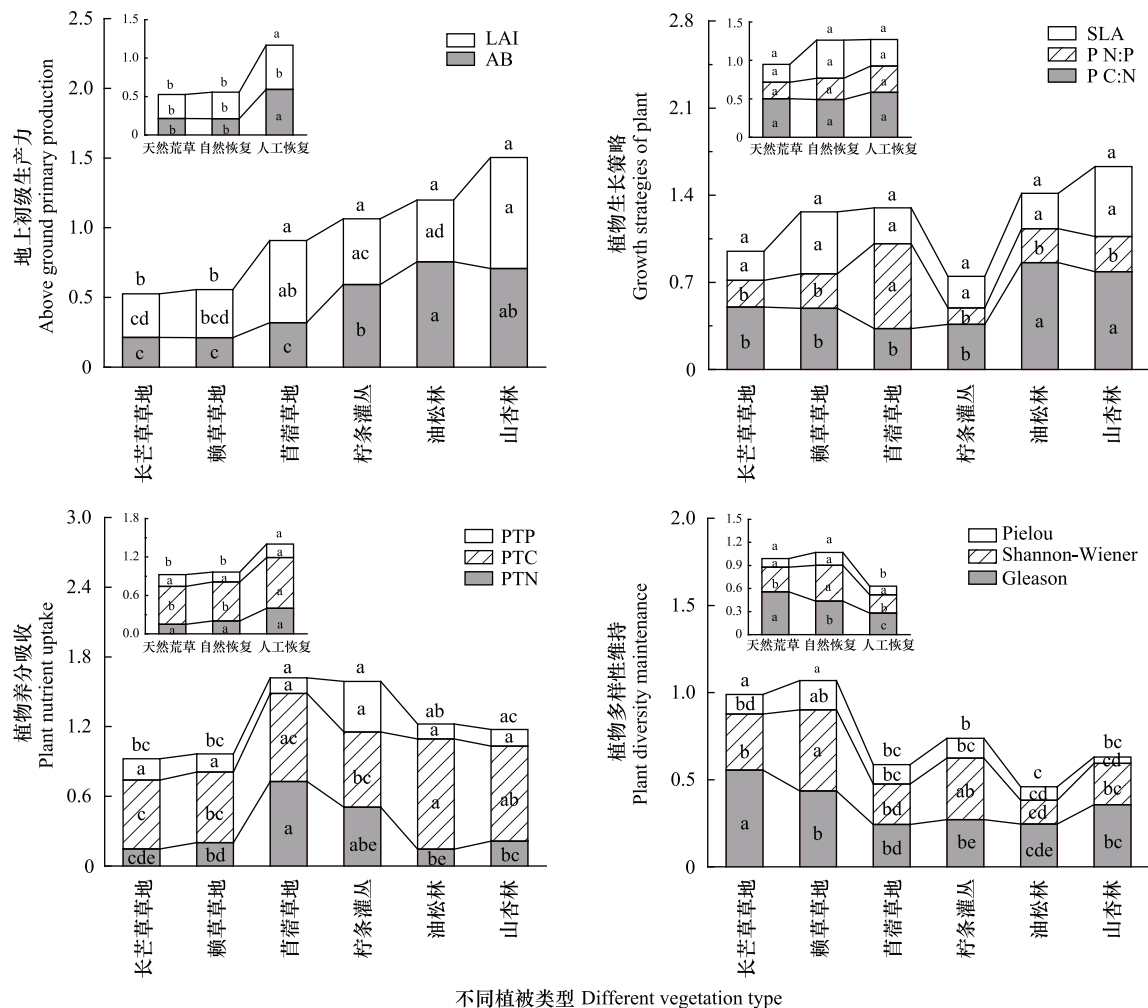


图3 不同植被类型间生态系统植物功能指标的差异

Fig.3 The different of plant function indexes among different vegetation types

图中不同小写字母代表不同植被类型/不同恢复方式差异显著。LAI, 叶面积指数; AB, 地上生物量; SLA, 比叶面积; P N:P, 植物氮磷比; P C:N, 植物碳氮比; PTP, 植物全磷; PTC, 植物全碳; PTN, 植物全氮

3 讨论

本研究主要比较自然恢复与人工恢复的生态系统功能,并从植被类型角度深入探究,以期选择适合当地的植被恢复类型,加深对不同植被类型与生态系统功能演化关系的认识,调整当前和规划未来的恢复计划,以更有效的方式提高生态系统功能。

3.1 不同植被类型土壤功能指标的差异分析

在陆地生态系统中,土壤是一个自然组成部分,可以直接提供多种生态系统功能与服务^[32]。本研究中,与土壤相关的功能除营养物转化与循环功能在不同植被类型间无显著性差异外,土壤肥力与水源涵养功能在不同植被类型间均具有显著性差异。研究结果表明人工恢复植被的土壤肥力高于自然恢复植被,人工恢复植被中土壤肥力功能从高到低依次为柠条灌丛、苜蓿草地、山杏林、油松林,土壤全碳、全氮、土壤氮磷比是造成各植被类型间土壤肥力差异的主要因素。其中,苜蓿与柠条为豆科植物,可与根瘤菌有效共生进行生物固氮,因此二者的土壤氮固存作用显著高于其它植被类型。另外,Tuo 等人在研究干旱地区时发现,草地恢复植被的土壤 C、N 积累明显大于其它植被类型,主要由于草地具有更密集的植被冠层和更高的覆盖度,在减少侵蚀

和增强沉积方面更有效,从而增加了土壤 C、N 的捕捉和保持机会^[33-34]。Aranibar 等人在研究中发现,在干旱地区树木的氮固定功能相对较弱,并且土壤氮供应不足也将限制生态系统水平的吸收和碳储存^[35]。但也有研究表明,林地的有机质和全氮储量高于其他植被类型,主要由于林地具有广泛的根系,根系生物量被认为是土壤养分的最大贡献者^[36]。这与本研究结果相违背,本研究中不同植被类型间有机质并未表现出显著性差异,且林地的全氮水平也较低,可能由于我们土壤养分采样设计为 0—60 cm,而林地乔木根系较深,土壤养分在深层较为丰富。本研究发现自然恢复植被的水源涵养功能显著高于人工恢复植被。据黄土高原的研究报道,土壤水分变化主要受山坡上的植被类型、恢复年限以及地形因素所影响^[26],且不同植被类型间近地表土壤水分差异不显著,深层土壤水分差异显著^[37]。本研究中,各植被类型的根系分布、蒸腾特征和根系吸水量不同^[38],导致对水资源的利用也存在差异。据报道,天然荒草根根系分布在 0—0.5 m,自然恢复草地根系分布在 0—0.4 m 层^[39],而引种植被苜蓿和柠条可向 0—3 m 和 0—6 m 进行延伸^[40],以至于比在自然恢复草地上消耗更多的深层土壤水^[26]。油松林和山杏林则主要由于较高的生产力导致消耗更多的土壤水分,造成一定程度上的土壤水分亏缺效应。

3.2 不同植被类型植物功能指标的差异分析

不同的植物支持和控制不同的生态系统功能和服务,在该区域的研究中发现,与植物相关的功能指标除植物生长策略外,其它植物功能指标在不同植被类型间均具有显著性差异。地上初级生产力直接反映了植物在自然环境条件下的生产能力,可表征生态系统的质量状况。本研究中发现人工恢复植被的地上初级生产力显著高于自然恢复植被,在人工恢复植被中,地上初级生产力从高到低依次为山杏林、油松林、柠条灌丛、苜蓿草地,这与陈雅敏等人的研究结果相同,乔木相较于灌木和草本具有更高的生产力^[41]。也有研究发现叶片性状可能对生态系统功能产生重要影响,因为它们决定了资源的获取和利用速度及凋落物分解^[42]等过程,对维持较高生产力起促进作用。关于与植物养分吸收功能的研究发现,人工恢复植被的植物养分吸收功能显著高于自然恢复植被,且人工恢复中苜蓿草地与柠条灌丛的养分吸收功能高于油松林和山杏林。植物全碳除在油松林和柠条灌丛间具有显著差异外,在其它人工恢复植被类型间未表现出显著性差异;而苜蓿草地和柠条灌丛的氮吸收水平显著高于其它植被类型。另外,也有研究发现在黄土高原降水量较低的地区,草地的养分吸收能力高于林地^[20],这与我们所研究的结果保持一致。本研究中自然恢复植被的物种多样性显著高于人工恢复植被,这与 Cardinale 等人的研究结果相同,自然恢复更有利于增加物种多样性^[1]。人工恢复中柠条灌丛的物种多样性相较于其它人工恢复植被较高,主要由于在该研究区柠条采取的是隔坡水平阶种植,郁闭度低,为其它物种生长提供了良好的条件。

3.3 不同植被类型生态系统多功能性的差异分析

不同植被恢复方式具有不同的物种组成,由于不同物种具有不同的功能特征,它们对生态系统功能的贡献也不同^[43]。值得注意的是,研究中所采用的平均值法忽略了生态系统单一功能重要性的差异,所以我们在研究中结合了单功能法,探讨不同恢复方式对生态系统功能的影响。研究结果显示,自然恢复植被的生态系统多功能性显著低于人工恢复植被,主要由于人工恢复植被具有较高的生产力和养分储存与循环功能。尽管

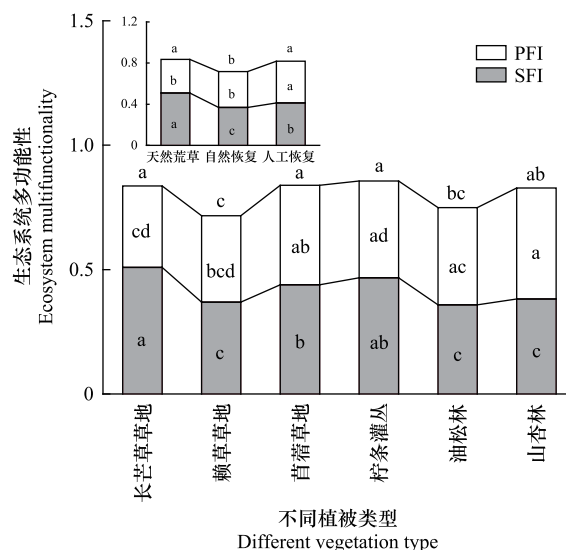


图 4 不同植被类型间生态系统多功能性的差异

Fig. 4 The different of ecosystem multifunctionality among different vegetation types

图中不同小写字母代表不同植被类型/不同恢复方式差异显著。PMF, 植物多功能性; SFI, 土壤多功能性

如此,人工恢复植被的土壤水分和物种多样性却显著低于自然恢复植被。不断累积的研究表明^[37,44],人工恢复植被具有较高的生产力和养分存储能力,但往往是以消耗土壤水分和降低生物多样性为代价,尤其在水分限制地区这种现象愈加明显^[45]。在黄土高原地区,土壤水分特别是深层土壤水分是植被生长的重要来源,也是维系这一地区生态系统健康与可持续性的关键^[46]。物种多样性是生物多样性的的重要组成部分,较高的物种多样性有助于提高生态系统稳定性^[47]。因而,人工恢复植被过度消耗深层土壤水分和降低物种多样性,从长远看不利于生态系统恢复的可持续性。相反,自然恢复植被的多功能性尽管较低,但给予足够长的时间,则具有向天然荒草方向演替的潜力,因此长远看自然恢复有益于提高多功能性特别是土壤相关的多功能性,且不会过度消耗土壤水分和降低物种多样性。人工恢复中,柠条和苜蓿均为豆科植物,由于他们的生物固氮效应,将更有利于养分的储存与循环,对于提高生态系统多功能性起促进作用,但在水源涵养功能上起较大限制作用。其次为山杏林,种植山杏则有助于提高土壤理化性质和初级生产力,但在土壤肥力储存和多样性维持方面则具有限制作用。油松林的多功能性水平则较低,主要除地上初级生产力和养分吸收能力稍高以外,其它单一功能对多功能的贡献均较低。

对小流域尺度各植被类型恢复功能进行系统研究,可为将来大规模的植被恢复积累经验。在黄土高原的植被恢复中,应对当地的立地条件给予充分的调查,根据各植被类型的功能特征,制定特定地点的植被恢复战略。例如:在水分限制地区,不宜进行大规模的人工植被恢复,选用自然恢复则有助于维持较高的物种多样性和水源涵养功能。人工恢复可以在沟谷等土壤水分相对充足的地带适量开展,同时注意降低种植密度,减少对土壤水分的过度消耗,并结合水平阶、反坡台等坡改梯工程,增加水分入渗效率;宜选用苜蓿、柠条等固氮植物,提高土壤肥力。

4 结论

通过对龙滩流域 3 种恢复方式、6 种植被类型的 23 个功能指标的研究表明:自然恢复植被的生态系统多功能性低于人工恢复植被,但有向天然荒草的方向演替的潜力,长期恢复将有利于提高生态系统多功能性特别是土壤相关的多功能性。人工恢复植被具有较高的生产力和养分存储能力,但消耗了土壤水分和降低了物种多样性,长远看不利于生态系统恢复和重建,因此不宜在水分限制地区大规模开展。不同植被类型之间各功能指标还存在一定差异:种植苜蓿、柠条有益于提高土壤肥力和植物的养分吸收能力;隔坡水平阶种植的柠条灌丛郁闭度低,可维持较高的物种多样性;油松林、山杏林具有较高的地上初级生产力,但其它功能指标较差。总之,在未来植被恢复规划过程中,应在对恢复区域进行充分调查的基础上,针对不同的恢复目标,因地制宜,选取适宜的物种,规避受限功能,促进生态系统更高效的可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486(7401): 59-67.
- [2] Gwak Y, Kim S. Factors affecting soil moisture spatial variability for a humid forest hillslope. *Hydrological Processes*, 2017, 31(2): 431-445.
- [3] Zhao Y L, Wang Y Q, Wang L, Fu Z H, Zhang X Y, Cui B L. Soil-water storage to a depth of 5 m along a 500-km transect on the Loess Plateau. *Catena*, 2017, 150: 71-78.
- [4] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 李妙莹. 黄土高原丘陵区人工灌草生态系统水土保持功能评估. *水土保持学报*, 2020, 34(03): 84-90+97.
- [5] Haibin Liang, Yayong Xue, Zongshan Li, Shuai Wang, Xing Wu, Guangyao Gao, Guohua Liu, Bojie Fu. Soil moisture decline following the plantation of *Robinia pseudoacacia* forests: Evidence from the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2018, 412: 62-69.
- [6] Mehmood A, Akhtar M S, Rukh S, Imran M, Hassan A, Abbasi K S, Qayyum A, Mahmood T, Ahmed W, Shahazad K, Khan A, Ahmad Z. Soil organic carbon stock variation with climate and land use in shale derived soils. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2018, 83(6): 785-793.
- [7] Isbell F, Calcagno V, Hector A, Connolly J, Harpole W S, Reich P B, Scherer-Lorenzen M, Schmid B, Tilman D, Van Ruijven J, Weigelt A, Wilsey B J, Zavaleta E S, Loreau M. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, 2011, 477(7363): 199-202.

- [8] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188-190.
- [9] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Arneeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the Earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [10] Maestre F T, Quero J L, Gotelli N J, Escudero A, Ochoa V, Delgado-Baquerizo M, Garcia-Gomez M, Bowker M A, Soliveres S, Escolar C, Garcia-Palacios P, Berdugo M, Valencia E, Gozalo B, Gallardo A, Aguilera L, Arredondo T, Blones J, Boeken B, Bran D, Conceicao A A, Cabrera O, Chaieb M, Derak M, Eldridge D J, Espinosa C I, Florentino A, Gaitan J, Gatica M G, Ghiloufi W, Gomez-Gonzalez S, Gutierrez J R, Hernandez R M, Huang X, Huber-Sannwald E, Jankju M, Miriti M, Monerris J, Mau R L, Morici E, Naseri K, Ospina A, Polo V, Prina A, Pucheta E, Ramirez-Collantes D A, Romao R, Tighe M, Torres-Diaz C, Val J, Veiga J P, Wang D, Zaady E. Plant species richness and ecosystem multifunctionality in global drylands. *Science*, 2012, 335(6065): 214-218.
- [11] Byrnes J E K, Gamfeldt L, Isbell F, Lefcheck J S, Griffin J N, Hector A, Cardinale B J, Hooper D U, Dee L E, Duffy J E. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. *Methods in Ecology and Evolution*, 2014, 5(2): 111-124.
- [12] Lefcheck J S, Byrnes J E K, Isbell F, Gamfeldt L, Griffin J N, Eisenhauer N, Hensel M J S, Hector A, Cardinale B J, Duffy J E. Biodiversity enhances ecosystem multifunctionality across trophic levels and habitats. *Nature Communications*, 2015, 6: 6936.
- [13] Zavaleta E S, Pasari J R, Hulvey K B, Tilman G D. Sustaining multiple ecosystem functions in grassland communities requires higher biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(4): 1443-1446.
- [14] Schneider F D, Morsdorf F, Schmid B, Petchey O L, Hueni A, Schimel D S, Schaepman M E. Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits. *Nature Communications*, 2017, 8: 1441.
- [15] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Reich P B, Jeffries T C, Gaitan J J, Encinar D, Berdugo M, Campbell C D, Singh B K. Microbial diversity drives multifunctionality in terrestrial ecosystems. *Nature Communications*, 2016, 7: 10541.
- [16] 李静鹏, 郑志荣, 赵念席, 高玉葆. 刈割、围封、放牧三种利用方式下草原生态系统的多功能性与植物物种多样性之间的关系. *植物生态学报*, 2016, 40(8): 735-747.
- [17] 熊定鹏, 赵广帅, 武建双, 石培礼, 张宪洲. 羌塘高寒草地物种多样性与生态系统多功能关系格局. *生态学报*, 2016, 36(11): 3362-3371.
- [18] 黄小波, 李帅锋, 苏建荣, 刘万德, 郎学东. 云南松天然次生林物种丰富度与生态系统多功能性的关系. *生物多样性*, 2017, 25(11): 1182-1191.
- [19] Valencia E, Maestre F T, Le Bagousse-Pinguet Y, Quero J L, Tamme R, Borger L, García-Gómez M, Gross N. Functional diversity enhances the resistance of ecosystem multifunctionality to aridity in Mediterranean drylands. *New Phytologist*, 2015, 206(2): 660-671.
- [20] Deng L, Shangguan Z P, Sweeney S. "Grain for Green" driven land use change and carbon sequestration on the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7039.
- [21] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in the Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [22] Wang S, Fu B J, Piao S L, Lü Y H, Ciais P, Feng X M, Wang Y F. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 38-41.
- [23] 刘玉林, 朱广宇, 邓蕾, 陈磊, 上官周平. 黄土高原植被自然恢复和人工造林对土壤碳氮储量的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2163-2172.
- [24] Yu X, Zhou W J, Chen Y P, Wang Y Q, Cheng P, Hou Y Y, Wang Y, Xiong X H, Yang L. Spatial variation of soil properties and carbon under different land use types on the Chinese the Loess Plateau. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134946.
- [25] Qiao L L, Chen W J, Wu Y, Liu H F, Zhang J Y, Liu G B, Xue S. Rehabilitation time has greater influences on soil mechanical composition and erodibility than does rehabilitation land type in the hilly-gully region of the Loess Plateau. *Peer J*, 2019, 7: e8090.
- [26] Cao R X, Jia X X, Huang L M, Zhu Y J, Wu L H, Shao M G. Deep soil water storage varies with vegetation type and rainfall amount in the Loess Plateau. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 12346.
- [27] Xie H T, Wang G G, Yu M K. Ecosystem multifunctionality is highly related to the shelterbelt structure and plant species diversity in mixed shelterbelts of eastern China. *Global Ecology and Conservation*, 2018, 16: e00470.
- [28] Peters M K, Hemp A, Appelhans T, Becker J N, Behler C, Classen A, Detsch F, Ensslin A, Ferger S W, Frederiksen S B, Gebert F, Gerschlaue F, Gütlein A, Helbig-Bonitz M, Hemp C, Kindeketa W J, Kühnel A, Mayr A V, Mwangomo E, Ngereza C, Njovu H K, Otte I, Pabst H, Renner M, Röder J, Rutten G, Costa D S, Sierra-Cornejo N, Vollstädt M G R, Dulle H I, Eardley C D, Howell K M, Keller A, Peters

- R S, Ssymank A, Kakengi V, Zhang J, Bogner C, Böhning-Gaese K, Brandl R, Hertel D, Huwe B, Kiese R, Kleyer M, Kuzyakov Y, Naus T, Schleuning M, Tschapka M, Fischer M, Steffan-Dewenter I. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions. *Nature*, 2019, 568(7750): 88-92.
- [29] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 冯仲科, 张宋智. 小陇山油松林乔木层生物量相容性线性模型. *生态学杂志*, 2008, 27(3): 317-322.
- [30] 曾伟生, 白锦贤, 宋连城, 赵学军, 王雪军, 邢利军, 张振荣. 内蒙古柠条和山杏单株生物量模型研建. *林业科学研究*, 2015, 28(3): 311-316.
- [31] 张峰, 张金屯, 上官铁梁. 历山自然保护区猪尾沟森林群落植物多样性研究. *植物生态学报*, 2002, 26(S1): 46-51.
- [32] Singh A K, Rai A, Banyal R, Chauhan P S, Singh N. Plant community regulates soil multifunctionality in a tropical dry forest. *Ecological Indicators*, 2018, 95: 953-963.
- [33] Wang Y Q, Han X W, Jin Z, Zhang C C, Fang L C. Soil organic carbon stocks in deep soils at a watershed scale on the Chinese loess plateau. *Soil Science Society of America Journal*, 2016, 80(1): 157-167.
- [34] Chen L F, He Z B, Zhu X, Du J, Yang J J, Li J. Impacts of afforestation on plant diversity, soil properties, and soil organic carbon storage in a semi-arid grassland of northwestern China. *CATENA*, 2016, 147: 300-307.
- [35] Aranibar J N, Otter L, Macko S A, Feral C J W, Epstein H E, Dowty P R, Eckardt F, Shugart H H, Swap R J. Nitrogen cycling in the soil-plant system along a precipitation gradient in the Kalahari sands. *Global Change Biology*, 2004, 10(3): 359-373.
- [36] Chang R Y, Jin T T, Lü Y H, Liu G H, Fu B J. Soil carbon and nitrogen changes following afforestation of marginal cropland across a precipitation gradient in the Loess Plateau. *PloS One*, 2014, 9(1): e85426.
- [37] Yang L, Wei W, Chen L D, Chen W L, Wang J L. Response of temporal variation of soil moisture to vegetation restoration in semi-arid the Loess Plateau. *CATENA*, 2014, 115: 123-133.
- [38] 冯棋, 杨磊, 王晶, 石学圆, 汪亚峰. 黄土丘陵区植被恢复的土壤碳水效应. *生态学报*, 2019, 39(18): 6598-6609.
- [39] 韩凤朋, 郑纪勇, 张兴昌. 黄土退耕地植物根系分布特征及其对土壤养分的影响. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 50-55.
- [40] Wang Y Q, Shao M A, Shao H B. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau. *Journal of Hydrology*, 2010, 381(1/2): 9-17.
- [41] 陈雅敏, 张韦倩, 杨天翔, 赵钢, 王寿兵. 中国不同植被类型净初级生产力变化特征. *复旦学报: 自然科学版*, 2012, 51(3): 377-381.
- [42] Kazakou E, Vile D, Shipley B, Gallet C, Garnier E. Co-variations in litter decomposition, leaf traits and plant growth in species from a Mediterranean old-field succession. *Functional Ecology*, 2006, 20(1): 21-30.
- [43] Chen L D, Wang J P, Wei W, Fu B J, Wu D P. Effects of landscape restoration on soil water storage and water use in the Loess Plateau. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1291-1298.
- [44] 蔡国军, 杨磊, 柴春山, 莫保儒. 半干旱黄土丘陵区不同土地利用类型植物物种多样性研究. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(01): 95-104.
- [45] 张钦弟, 卫伟, 陈利顶, 杨磊. 黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局. *自然资源学报*, 2018, 33(08): 1351-1362.
- [46] Peng J, Hu X X, Qiu S J, Hu Y N, Meersmans J, Liu Y X. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 765-775.
- [47] Wang Y F, Cadotte M W, Chen Y X, Fraser L H, Zhang Y H, Huang F M, Luo S, Shi N Y, Loreau M. Global evidence of positive biodiversity effects on spatial ecosystem stability in natural grasslands. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 3207.