DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.06.019 CSTR:32311.14.rswc.2026.06.019
汪艳, 杜婷, 朱宏杰, 等.鄂尔多斯砒砂岩区不同退耕年限植物群落演替与土壤养分协同效应[J].水土保持研究,2026,33(6):222-232,242.
Wang Yan, Du Ting, Zhu Hongjie, et al. Synergistic effects of plant community succession and soil nutrients under different abandonment years in Pisha sandstone area of Ordos[J]. Research of Soil and Water Conservation,2026,33(6):222-232,242.

鄂尔多斯砒砂岩区不同退耕年限植物群落演替与土壤养分协同效应

汪 艳[1,3], 杜 婷[1], 朱宏杰[2], 李 悦[1], 马志强[1], 杜 峰[1,2]
(1.西北农林科技大学 水土保持科学与工程学院 水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.拉萨市高原生物研究所, 拉萨 850000)

摘 要:[目的]揭示砒砂岩区退耕植物群落与土壤环境的协同演变规律,为植被恢复与重建提供科学支撑。[方法]采用空间代替时间方法,以鄂尔多斯砒砂岩区退耕年限为5,8,15,20,28,40 a的天然恢复退耕地为研究对象,通过野外样方调查和室内土壤分析,探究了植物群落特征(物种组成、生物量、多样性)与土壤养分、水分动态变化;借助典范对应分析(CCA)明确了植物与土壤的相互关系。[结果](1)研究区共记录植物23科57属79种,以多年生草本、旱生植物为主,集中于菊科、禾本科和豆科;群落演替优势种序列为硬皮葱+狗尾草(5~8 a)→冰草(15 a)→冰草+狭叶艾蒿(20 a)→达乌里胡枝子+草木樨状黄芪(28~40 a),群落层级由单一草本层向灌草复合层演变,稳定性逐渐增强;群落地上生物量呈先降后升趋势,物种丰富度和Shannon-Wiener多样性指数呈先减后增再减趋势,Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数变化趋于平稳。(2)表层(0—20 cm)土壤有机质(SOM)、碱解氮(AN)、有效磷(AP)及速效钾(AK)含量比深层(20—40 cm)分别高33.23%,52.27%,52.17%和39.28%,表聚效应较为明显,全氮(STN)和全磷(STP)两种土层含量接近。表层养分(SOM,AN,AP)变化速率分别为深层的1.27,1.50,2.69倍,表层养分对植被演替响应更为敏感。总体上,在退耕40 a期间,土壤养分和水分(SWC)含量随退耕年限增加均呈先下降后上升再下降的波动趋势。(3)CCA分析表明,SOM,STN,SWC,AK及退耕时间是驱动群落-环境协同演变的关键因子($p<0.05$),环境限制因子存在阶段更替:初期(5~8 a)受有机质类养分限制,中期(15~20 a)受矿物质养分限制,后期(28~40 a)受土壤水分调控。建议针对不同演替阶段采取差异化调控措施,即初期保蓄土壤,中期补充养分,后期优化群落组成种的水分适应性,提高植被-土壤协同恢复速度。[结论]鄂尔多斯砒砂岩区退耕40 a中,植物群落由一年生草本向多年生草本和灌木发展,群落层级趋于复杂稳定(从单层草本向灌草复合层演变);土壤表层养分随演替进程响应更敏感,其变化特征与群落生物量和物种多样性变化规律基本一致,表现出明显的植被-土壤协同效应。

关键词:退耕演替; 植物群落; 土壤养分; 协同效应; 砒砂岩区
中图分类号:S157.1; S718.54 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-3409(2026)06-0222-11

Synergistic effects of plant community succession and soil nutrients under different abandonment years in Pisha sandstone area of Ordos

Wang Yan[1,3], Du Ting[1], Zhu Hongjie[2], Li Yue[1], Ma Zhiqiang[1], Du Feng[1,2]
(1.*State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 2.*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*; 3.*Lhasa Institute of Plateau Biology, Lhasa* 850000, *China*)

Abstract: [**Objective**] This study aims to elucidate the synergistic evolutionary patterns between plant communities and soil environments in the Pisha sandstone area following farmland abandonment, thereby

收稿日期:2025-11-26 **修回日期:**2025-12-26 **接受日期:**2026-01-09
资助项目:国家自然科学基金(41771322);国家重点研发计划项目(2017YFC0504504)
第一作者:汪艳(1990—),女(穿青人),贵州大方人,硕士研究生,研究方向为林草生态恢复。E-mail:958869013@qq.com
通信作者:杜峰(1971—),男,内蒙古丰镇人,博士,副研究员,主要从事植物生态、植物群落、种群生态及水土保持研究。E-mail:dufeng@ms.iswc.ac.cn

providing a scientific basis for vegetation restoration and reconstruction. [**Methods**] A space-for-time substitution approach was employed, with naturally restored farmlands abandoned for 5, 8, 15, 20, 28, and 40 years in the Pisha sandstone area of Ordos selected as study sites. Through field quadrat surveys and laboratory soil analyses, plant community characteristics [species composition, aboveground biomass (AGB), diversity indices] and soil nutrient and moisture dynamics were investigated. Canonical correspondence analysis (CCA) was applied to clarify the relationships between plants and soils. [**Results**] (1) A total of 79 plant species from 23 families and 57 genera were recorded, and they were predominantly perennial herbs and xerophytic species, primarily distributed across Asteraceae, Poaceae, and Fabaceae. The community succession sequence of dominant species was *Allium ledebourianum* + *Setaria viridis* (5~8 years) → *Agropyron cristatum* (15 years) → *Agropyron cristatum* + *Artemisia lavandulifolia* (20 years) → *Lespedeza daurica* + *Astragalus melilotoides* (28~40 years). The community hierarchy evolved from a single herbaceous layer to a shrub-herb mixed layer, with gradually increasing stability. Aboveground community biomass showed a trend of first decreasing and then increasing, while species richness and the Shannon-Wiener diversity index exhibited a fluctuating decrease-increase-decrease pattern. In contrast, the Simpson diversity index and Pielou evenness index showed relatively stable variations. (2) The contents of soil organic matter (SOM), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP), and available potassium (AK) in the topsoil (0—20 cm) were 33.23%, 52.27%, 52.17%, and 39.28% higher than those in the subsoil (20—40 cm), respectively, indicating a prominent surface aggregation effect. The contents of total nitrogen (STN) and total phosphorus (STP) were relatively close between the two soil layers. The variation rates of topsoil nutrients (SOM, AN, AP) were 1.27, 1.50, and 2.69 times those of the subsoil, respectively, suggesting that topsoil nutrients were more responsive to vegetation succession. Overall, during the 40-year abandonment period, the contents of soil nutrients and soil water content (SWC) showed a fluctuating decrease-increase-decrease trend with increasing abandonment age. (3) CCA analysis revealed that SOM, STN, SWC, AK, and abandonment duration were key factors driving plant-soil synergistic evolution ($p<0.05$). Environmental constraints shifted across successional stages. Early-stage succession (5~8 years) was limited by organic matter, mid-stage (15~20 years) by mineral nutrients, and late-stage (28~40 years) dynamics were primarily regulated by soil moisture. It was recommended that different regulation measures be adopted for different successional stages, namely, soil conservation in the early stage, nutrient supplementation in the middle stage, and optimization of community composition and water adaptability in the late stage, so as to accelerate the synergistic restoration of vegetation and soil. [**Conclusion**] Over the 40-year abandonment period in the Pisha sandstone area of Ordos, plant communities transitioned from annual herbs to perennial herbs and shrubs, with the community hierarchy tending to be complex and stable (evolving from a single herb layer to a shrub-herb mixed layer). Topsoil nutrients are more sensitive to the succession process, and their variation characteristics are basically consistent with those of community biomass and species diversity, reflecting significant vegetation-soil synergistic effects.

Keywords: farmland abandonment succession; plant community; soil nutrients; synergistic effects; Pisha sandstone region

生态脆弱区的植被恢复与土壤质量提升是生态治理的目标所在,植被与土壤的良性互动演变是评估生态修复成效的重要内容[1]。鄂尔多斯砒砂岩区气候干旱、风大沙多、年内温差较大,全年水蚀、风蚀、冻融侵蚀交互发生,导致水土流失剧烈、土壤贫瘠、植被稀疏,成为黄土高原生态系统最脆弱的区域之一,被称为“地球生态癌症”[2-4]。自退耕还林(草)工程实施以来,该区生态修复取得显著成效[4]。但受砒砂岩区特殊地质环境与土壤贫瘠条件的制约,区域整体生态环境仍处于脆弱状态,水土流失、土地荒漠化等问题尚未得到根本解决[5]。区域生态环境问题的解决需要系统内元素输出少,生态系统各要素实现良性的物质循环与能量转化。因此,深入开展砒砂岩区退耕演替过程中植被与土壤的协同效应研究,对进一步优化区域植被恢复策略、提升土壤质量、巩固生态治理成果具有重要理论与实践意义。植被演替是植物与土

壤协同变化的结果,植被与土壤环境的耦合作用是生态系统恢复的内在驱动力。现有研究表明,植物群落优势种的更迭是群落演替发生的关键标志[6]。繁殖体散布、幼苗定居等随机概率性事件,以及种间作用和种-环境作用两种确定性过程是群落组建和群落演替的内在动力,三者共同导致群落共存种发生地位变化,以及建群种与伴生种的替代进程;种-环境作用中群落组成种对环境的需求、忍耐与改造,也使群落属性,如群落生物量和物种多样性等随演替时间呈现规律性变化[7-8]。多数情况下,随着退耕演替推进,物种多样性与群落生产力逐步提升,群落结构向复杂化方向发展,区域生态环境得到持续改善[9]。

在土壤环境响应方面,退耕后土壤养分与水分会发生显著变化,但不同区域的变化规律存在差异。在降水充沛的南方红壤丘陵区,退耕种植池杉10 a后植被迅速恢复,凋落物大量归还土壤,土壤有机质提升30%,土壤水分保持较高状态甚至部分区域呈淹水状态[10];作为南北过渡带的米仓山,退耕后土壤有机质和土壤水分也随退耕年限增加呈显著上升趋势[11];在黄土高原北部的干旱半干旱区,植被恢复缓慢,养分归还少,且风蚀、水蚀风险较高,因而土壤养分增速缓慢,同时因降水稀少易引发水分供需矛盾,尤其是乔木林会加剧蒸腾耗水,导致0—200 cm土层贮水量呈显著下降甚至形成干层[12]。总之,不同区域因植被组成和土壤水分、养分的差异,造成演替过程中土壤水分、养分供应与需求,以及养分的深层吸收和表层富积作用等生态学过程在植被演替中的重要性发生变化。因而,演替过程中土壤水分与养分的协同变化存在区域特异性,且这种变化会反作用于植物群落结构与组成[13]。然而,砒砂岩区作为黄河中游粗泥沙主要来源地,兼具"遇风成沙、遇水成泥"的地质特性和干旱少雨的气候条件[2],与其他区域存在本质区别,其退耕演替中植物群落与土壤环境的协同机制尚未明确。因此,本文以鄂尔多斯准格尔旗砒砂岩区不同退耕年限天然恢复样地为研究对象,采用空间序列代替时间序列法,通过野外样方调查和室内土壤理化分析,系统探究植物群落与土壤养分、水分的动态变化,结合排序分析明确二者耦合关系,揭示砒砂岩区"植被-土壤"系统协同演替机制,为该区植被恢复模式优化提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯市准格尔旗(110°05′—111°27′E,39°16′—40°20′N),海拔820~1 584.6 m,属中温带大陆性半干旱气候。年平均气温7.9 ℃,年均降水量为190~400 mm,全年降雨集中于7—9月,年蒸发量2 000~3 000 mm。土壤类型以栗钙土为主,地带性植被为典型草原,主要建群种包括大针茅(*Stipa grandis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)等;人工植被以沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙柳(*Salix cheilophila*)等灌木为主。

1.2 样地选择与植被调查

采用空间代替时间方法,选取退耕年限为5,8,15,20,28,40 a的6类典型退耕地(编号A—F)作为研究对象,为避免空间异质性(如样地间坡向、坡度、海拔的差异)对时间序列推断的干扰,样地选取原则为:(1)地理位置集中;(2)坡向、坡度、海拔等立地条件相近;(3)植物以天然恢复为主;(4)避免跨越河流、山脊;(5)远离居民点及道路,人为干扰强度低。以面积-种数稀疏曲线确定的最小取样面积为原则,在每个样地内选取5个1 m×1 m草本样方进行物种调查,调查内容为植物的高度、盖度、频度、多度等,记录物种名称并鉴定。样地基本情况见表1。

表1 调查样地基本情况

Table 1 Basic information of surveyed sample plots

样地编号	退耕年限/a	经度E/(°)	纬度N/(°)	坡向	坡度/(°)	海拔/m	群落类型
A	5	110.614	39.771	东北35°(阴坡)	5	1098.38	硬皮葱(*Allium ledebourianum*)+狗尾草(*Setaria viridis*)
B	8	110.617	39.772	平地	0	1093.38	硬皮葱
C	15	110.291	39.450	东北10°(阴坡)	5	1117.03	冰草
D	20	110.617	39.773	平地	0	1092.01	冰草
E	28	110.640	39.790	西南20°(阳坡)	10	1171.59	达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)
F	40	110.640	39.781	西南28°(阳坡)	11	1149.34	达乌里胡枝子+草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)

1.3 植物群落生物量测量及多样性测定

将各样方内每种植物齐地面剪下,用电子天平(精度0.01 g)测定地上生物量(鲜重)。采用物种相对重要值(Ⅳ)确定群落组成,其计算方法为:Ⅳ=

(相对高度+相对盖度+相对多度+相对频度+相对生物量)/5。选取 Simpson 多样性指数(D)、Shannon-Wiener多样性指数(H)、物种丰富度(R)、Pielou均匀度指数(E)衡量物种多样性,不同退耕阶段群落的多样性指数以对应样地内各样方指数均值表示。计算公式如下:

$$D=1-\sum_{i=1}^{S}p_i^2 \quad (1)$$

$$H=-\sum_{i=1}^{S}p_i\ln p_i \quad (2)$$

$$R=S \quad (3)$$

$$E=H/\ln S \quad (4)$$

式中:p_i为种i的相对重要值;S为样地内物种数量。

1.4　土样采集与分析

为获取各退耕年限样地表层与深层土壤养分的总体特征,本研究将同一样地同层次土壤样品混合后测定,以明确不同退耕年限养分变化总体特征。具体方法为在各样方内用直径3.5 cm土钻分别采集0—20 cm和20—40 cm土样,混合后去除根系、石粒等杂质,取200 g带回实验室备用。主要测定方法如下:土壤有机质(Soil Organic Matter, SOM)采用重铬酸钾氧化-外加热法;全氮(Soil Total Nitrogen, STN)采用半微量凯氏定氮法;全磷(Soil Total Phosphorus, STP)采用钼锑抗比色法;碱解氮(Alkali-hydrolyzable Nitrogen, AN)采用碱解扩散法;有效磷(Available Phosphorus, AP)采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法;速效钾(Available Potassium, AK)采用1 mol/L NH_4OAc浸提-火焰光度法;土壤含水量(Soil Water Content, SWC)采用烘干法。

1.5　数据处理

采用Microsoft Excel 2021整理数据,Origin 2021制图。运用Canoco 5软件进行CCA排序分析:以物种重要值为响应变量,环境因子为解释变量,探究植物群落与环境因子的关系(坡向、坡度等非数值指标转换为编码:坡向以正北为0°,按顺时针方向赋值,坡度直接取实测值)[3]。

2　结果与分析

2.1　研究区物种组成区系特征

研究区共发现植物79种,分属57属23科(表2),其中草本植物73种(占比92.41%),灌木5种(6.33%),乔木1种(1.26%)。从生活型来看,一年生草本21种(占比26.58%),多年生草本52种(65.82%);从水分生态型来看,旱生植物48种(60.75%),中生植物31种(39.25%),总体上以多年生草本和旱生植物占比较高。科属构成中,菊科(14属24种)、禾本科(11属15种)、豆科(6属11种)3科的属数占总属数的54.39%,种数占总种数的63.29%,为研究区植物群落优势科。

表2　研究区植物科属种及生活型组成

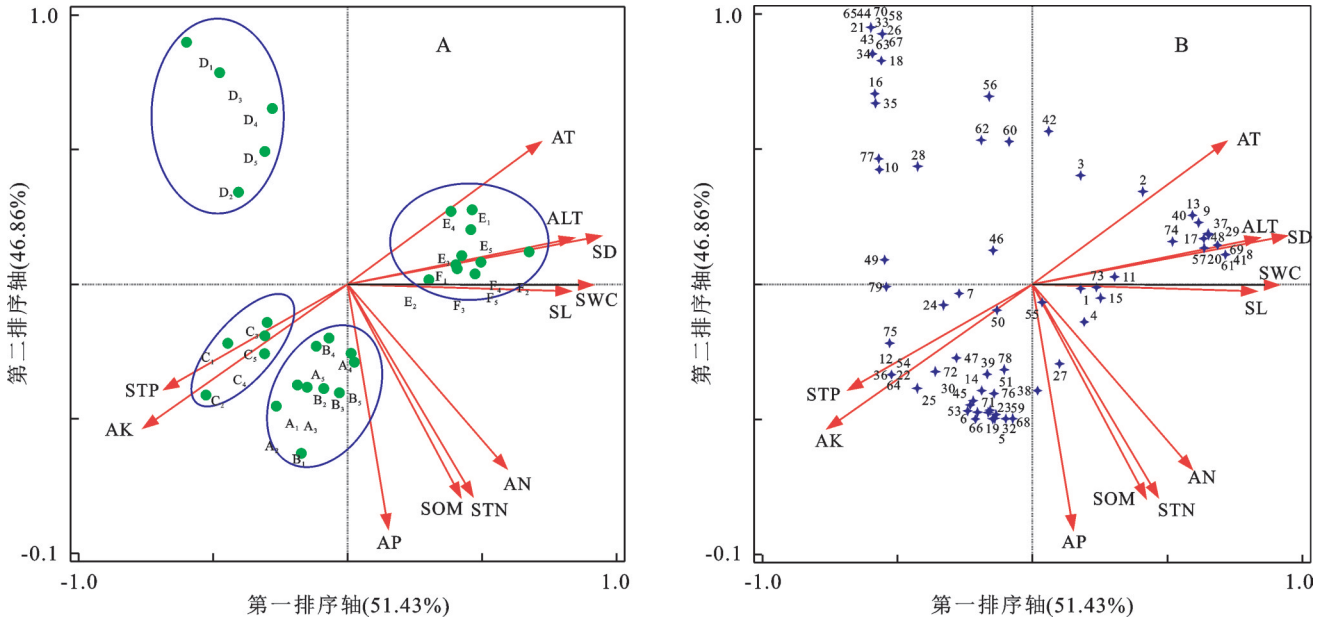
Table 2　Family-genus-species and life form composition of plants in study area

分类指标	类型	科数	属数	种数	占总属比/%	占总种比/%
生活型	一年生草本	12	21	21	36.84	26.58
	多年生草本	14	34	52	59.65	65.82
	灌木	5	5	5	8.77	6.33
	乔木	1	1	1	1.75	1.26
水分生态型	旱生植物	15	37	48	64.91	60.75
	中生植物	15	26	31	45.61	39.25
优势科	菊科	1	14	24	24.56	30.38
	禾本科	1	11	15	19.30	18.99
	豆科	1	6	11	10.53	13.92
	优势科合计	3	31	50	54.39	63.29
总计		23	57	79		

2.2　退耕过程中群落演替序列

CCA排序结果表明,所有典范轴蒙特卡洛(Monte Carlo)置换检验结果达到显著水平(F=4.52,p=0.001),其中典范轴1和轴2的特征值分别为0.514 3,0.468 6,累计解释率达66.26%(总特征值为1.483 3),可较好地解释群落分异特征。如图1A所示,第一轴主要表征退耕时间(AT)和土壤SWC,AK,STP含量以及坡向(SD)。其中退耕时间与排序轴1呈显著正相关(r=0.61,p<0.05),沿着排序轴从左至右,群落退耕年限逐渐增加,即退耕早期群落位于排序轴左侧。根据各群落在排序轴上的分布位置,将群落演替序列划分为一年生杂类草+多年生草本群落→根茎禾草群落→根茎禾草+多年生草本群落→小灌木+多年生草本群落。结合重要值结果可知(表3),优势种的阶段更替为退耕初期(5~8 a)硬皮葱(27.87)+狗尾草(19.45);演替至15 a时,群落优

势种为冰草(29.82)群落,伴生种为赖草(12.12);退耕演替至20 a时,群落优势种为冰草(10.09)+狭叶艾蒿(8.48);28~40 a时,优势群落演变为达乌里胡枝子(25.76)+草木樨状黄芪(18.23)。



注:(1) A_1—F_5分别为6类样地中30个样方;箭头代表环境因子;(2) SOM为土壤有机质,STN为全氮,STP为全磷,AN为碱解氮,AP为有效磷,AK为速效钾,SWC为土壤含水量,AT为退耕时间,ALT为海拔,SL为坡度,SD为坡向;(3) 数字1—79代表研究区79种物种,物种名详见表3。

图1 退耕样地群落与环境因子的CCA排序

Fig. 1 CCA ordination of plant communities and environmental factors in farmland abandonment plots

表3 砒砂岩区不同退耕年限样地植物物种重要值

Table 3 Important values of plant species in sample plots with different abandonment years in Pisha sandstone area

序号	物种名	退耕样地					
		A(5 a)	B(8 a)	C(15 a)	D(20 a)	E(28 a)	F(40 a)
1	阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)	1.41	5.91	6.18	2.28	8.92	7.98
2	艾蒿(*Artemisia argyi*)	0.43	0.19		1.70	13.20	
3	白草(*Pennisetum flaccidum*)	0.43	0.39		4.51	6.67	2.62
4	百里香(*Thymus mongolicus*)	3.41	0.91			6.65	0.68
5	斑种草(*Bothriospermum chinense*)		0.19				
6	尖裂假还阳参(*Crepidiastrum sonchifolium*)	0.65	0.58	0.70			
7	冰草(*Agropyron cristatum*)	2.93	9.27	29.82	10.09	3.45	7.71
8	糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)						0.84
9	草地风毛菊(*Saussurea amara*)					0.55	0.47
10	黄香草木樨(*Melilotus officinalis*)	4.45		2.08	1.92		
11	草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)	4.58	4.35	1.97	3.43	6.30	11.93
12	拐轴鸦葱(*Lipschitzia divaricata*)			0.44			
13	刺儿菜(*Cirsium arvense*)					1.55	
14	刺藜(*Teloxys aristata*)	4.96	3.24	2.46	0.21	0.36	
15	达乌里胡枝子(*Lespedeza daurica*)	6.18	11.31	2.97	2.56	14.17	11.59
16	大针茅(*Stipa grandis*)			0.30		8.12	8.06
17	大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)	0.22	0.19		7.81		
18	地梢瓜(*Cynanchum thesioides*)	0.42		0.30	0.85		
19	鹅观草(*Elymus kamoji*)						4.83
20	二色棘豆(*Oxytropis bicolor*)				0.21		
21	翻白草(*Potentilla discolor*)			0.30			
22	风毛菊(*Saussurea japonica*)	0.22	0.19				
23	狗尾草(*Setaria viridis*)	14.85	4.63	4.79	6.53	1.03	
24	芦苇(*Phragmites australis*)	1.52		5.02			
25	天名精(*Carpesium abrotanoides*)			0.15	0.43		

续表 3

序号	物种名	退耕样地					
		A(5 a)	B(8 a)	C(15 a)	D(20 a)	E(28 a)	F(40 a)
26	黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)				8.13	0.81	
27	画眉草(*Eragrostis pilosa*)	1.88					0.30
28	黄耆(*Astragalus membranaceus*)	0.22	1.53		2.70		
29	火绒草(*Leontopodium leontopodioides*)					0.61	0.62
30	蒺藜(*Tribulus terrestris*)	0.80					
31	尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)	0.53					
32	角蒿(*Incarvillea sinensis*)	0.22	2.78	0.15			
33	节节草(*Equisetum ramosissimum*)				6.02		
34	苣荬菜(*Sonchus wightianus*)	0.20		0.15	3.01		
35	苦荬菜(*Ixeris polycephala*)	0.47		0.15	0.21		
36	赖草(*Leymus secalinus*)			12.12			
37	蓝刺头(*Echinops davuricus*)					2.56	2.38
38	狼毒(*Stellera chamaejasme*)		2.21			0.53	
39	老鹳草(*Geranium wilfordii*)	5.59	3.88	0.59	0.98	0.63	0.53
40	漏芦(*Rhaponticum uniflorum*)					0.55	
41	蒙古莸(*Caryopteris mongholica*)						9.49
42	紫苜蓿(*Medicago sativa*)			1.65	2.19		
43	南牡蒿(*Artemisia eriopoda*)				0.21		
44	泥胡菜(*Hemisteptia lyrata*)				0.21		
45	蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)	0.94	0.58	0.30			
46	乳浆大戟(*Euphorbia esula*)		0.19	0.44	0.43	0.36	
47	米口袋(*Gueldenstaedtia verna*)	0.22		0.15	0.83		
48	斜茎黄耆(*Astragalus adsurgens*)	0.22	0.19	0.15	4.95	0.73	0.30
49	沙蓬(*Agriophyllum pungens*)			0.44	0.43		
50	砂珍棘豆(*Oxytropis racemosa*)	0.22	1.74	0.74	0.29	0.18	1.25
51	中华苦荬(*Ixeris chinensis*)	3.42	7.59	1.21	1.34	0.81	
52	山杏(*Prunus sibirica*)	0.58					
53	田旋花(*Convolvulus arvensis*)	2.63	1.35	0.44			
54	委陵菜(*Potentilla chinensis*)			0.15			
55	无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)	1.09	4.52	2.91	0.64	2.67	2.25
56	细裂叶莲蒿(*Artemisia stechmanniana*)				2.15	0.36	
57	细叶韭(*Allium tenuissimum*)	0.22	0.19			3.79	5.70
58	狭叶艾蒿(*Artemisia lavandulifolia*)				8.48		
59	狭叶米口袋(*Gueldenstaedtia stenophylla*)	0.60	1.82	0.90			
60	香青兰(*Dracocephalum moldavica*)			0.44	2.93	1.15	1.61
61	小花棘豆(*Oxytropis glabra*)				0.43		0.53
62	羊草(*Leymus chinensis*)				0.60		
63	野胡萝卜(*Daucus carota*)			0.15			
64	野青茅(*Deyeuxia pyramidalis*)				1.97		
65	野西瓜苗(*Hibiscus trionum*)	1.32					0.71
66	野亚麻(*Linum stelleroides*)				0.21		
67	一年蓬(*Erigeron annuus*)		0.38				
68	异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)						0.44
69	茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)				1.70		
70	硬阿魏(*Ferula bungeana*)					0.97	0.84
71	硬皮葱(*Allium ledebourianum*)	15.47	12.40	0.15			
72	硬质早熟禾(*Poa sphondylodes*)	4.01	2.61	5.23	1.52		
73	远志(*Polygala tenuifolia*)	2.43	4.49	1.77	2.45	4.35	7.57
74	长芒草(*Stipa bungeana*)		1.34	0.59	0.21	4.73	6.18
75	长蕊石头花(*Gypsophila oldhamiana*)			3.83	0.21		
76	中华隐子草(*Cleistogenes chinensis*)	5.35		1.51		0.92	
77	猪毛菜(*Salsola collina*)			0.30	0.43		0.30
78	猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)	4.74	8.81	5.32	1.41	2.33	2.29
79	紫菀(*Aster tataricus*)			0.59	0.21		

2.3 退耕演替过程中群落生物量及多样性变化

不同退耕年限样地群落地上生物量从大到小依次为5 a(551.30 g/m²)>40 a(290.31 g/m²)>15 a(286.30 g/m²)>8 a(254.43 g/m²)>28 a(248.06 g/m²)>20 a(209.35 g/m²)。如图2所示,随退耕年限增加,群落生物量呈"快速下降—波动稳定—小幅回升"的变化趋势,退耕5~8 a间降幅达53.85%;8~20 a间处于波动阶段,其中8~15 a呈小幅上升,15~20 a略有下降,到20 a时处于最低;20~40 a逐步回升,40 a较20 a增加38.67%。

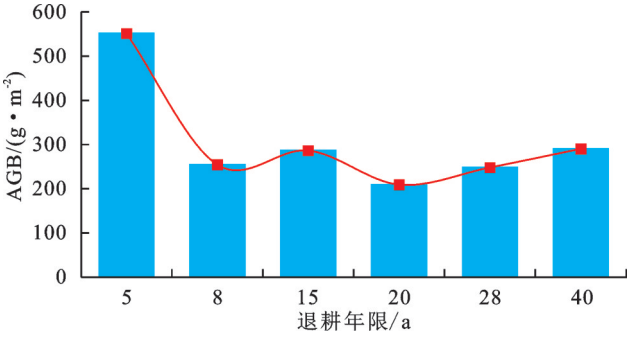


图2 退耕演替过程中群落地上生物量(AGB)变化

Fig. 2 Changes in aboveground biomass during farmland abandonment succession

由表4多样性统计结果可知,随退耕时间延长,物种丰富度和Shannon-Wiener多样性指数呈"降低—增加—降低"波动趋势,退耕初期(5~8 a)表现为下降,8~20 a逐渐上升并达到峰值(44种,2.34),20~40 a持续下降(44种→28种,2.34→1.47)。Simpson指数和Pielou均匀度指数呈"降低—增加—趋于稳定"波动趋势:5~15 a波动下降,15~20 a上升并达最高(0.95,0.86),20~40 a趋于稳定(0.95→0.93,0.86→0.85),总体变化较为平缓。

表4 不同退耕年限样地植物多样性指数

Table 4 Plant diversity indices in plots with different abandonment years

退耕样地	物种丰富度(R)	Shannon-Wiener指数(H)	Simpson指数(D)	Pielou均匀度指数(E)
A(5 a)	39	2.10	0.92	0.83
B(8 a)	32	1.85	0.93	0.85
C(15 a)	42	1.87	0.86	0.77
D(20 a)	44	2.34	0.95	0.86
E(28 a)	31	2.16	0.93	0.84
F(40 a)	28	1.47	0.93	0.85

2.4 植被退耕演替过程中土壤养分和水分动态变化

不同退耕演替阶段(5,8,15,20,28,40 a)土壤养分含量变化趋势如图3所示。0—20 cm土层中,随退耕年限增加,有机质类养分(SOM,STN,AN)和AP整体呈"下降—上升—下降"波动趋势,在20 a时降至最低(SOM:2.00 g/kg,STN:0.20 g/kg,AN:5.38 mg/kg,AP:0.59 mg/kg);矿物质养分(STP,AK)呈波动下降趋势。20—40 cm土层中,矿物质养分(STP,AK)波动下降,有机质类养分和AP变化较为平缓。不同土层间土壤养分含量存在明显差异,其中0—20 cm(表层)土层有机质类养分(SOM,AN)和矿物质养分(AP,AK)含量普遍高于20—40 cm(深层)土层,表层较深层分别高33.23%(SOM),52.27%(AN),52.17%(AP),39.28%(AK);STN,STP两土层含量接近。此外,SOM,AN和AP表层含量减少速率大于深层,分别为深层的1.27,1.50,2.69倍。

如图4所示,在0—20 cm土层中,土壤含水率(SWC)随退耕年限增加呈波动下降趋势,退耕5~15 a间,SWC随退耕时间增加基本保持不变,15~20 a逐渐下降,20~40 a表现为先升后降;20—40 cm土层中,5~28 a变化趋势与表层(0—20 cm)保持一致,均为先降后升,而在28~40 a间,表现为小幅增加。两种土层最低值均出现在退耕后20 a,分别为6.45%(0—20 cm)和7.37%(20—40 cm)。此外,不同土层中SWC含量无明显差异(退耕40 a除外)。

2.5 退耕演替过程中群落与环境因子的相互关系

CCA分析中,与典范轴1相关性较高的环境因子依次为SWC(0.68)>AK(−0.67)>退耕时间(0.61)>坡向(0.60)>STP(−0.58),与典范轴2相关性较高的环境因子为SOM(−0.82)>STN(−0.76)(图1,表5)。环境因子相关分析结果表明,土壤有机质类养分(SOM,STN,AN)彼此呈正相关,退耕时间与矿物质类养分(STP,AK)呈负相关,与SWC呈正相关;SWC、坡向、退耕时间三者呈正相关。植物种分布与样地分布梯度基本一致(图1),沿典范1从左至右(退耕时间增加方向),植物由一年生草本向多年生草本和小灌木演变,且无芒隐子草、阿尔泰狗娃花、达乌里胡枝子等植物种均分布在原点附近。

3 讨 论

3.1 退耕演替对植物群落结构的影响

本研究共调查植物79种(23科57属),其中菊科、禾本科和豆科共计50种,占群落总物种数的63.29%,这些植物具有耐干旱、耐贫瘠、繁殖能力强的特点,是砒砂岩区植被恢复的核心类群[3]。

退耕演替过程中,群落优势种不断发生更迭,群落层级、生物量及物种多样性逐渐变化[8-14]。本研究中,退耕5~8 a以一年生和多年生草本(狗尾草、硬皮葱)为主,群落层次相对简单;15~20 a,优势种发展为根茎

类禾草(冰草)+多年生草本(狭叶艾蒿),群落分层逐渐明显;28~40 a,进一步演变为小灌木(达乌里胡枝子)+多年生草本(草木樨状黄芪)的复合层结构,呈现优势种从一年生草本向多年生草本及灌木变化、群落层级由简单向复杂演变的规律,且表现出明显的连续性特征,如阿尔泰狗娃花、达乌里胡枝子在不同退耕阶段中连续出现,说明群落的稳定性逐渐增强,这与干旱区植物群落演替的普遍规律基本一致[15-16]。

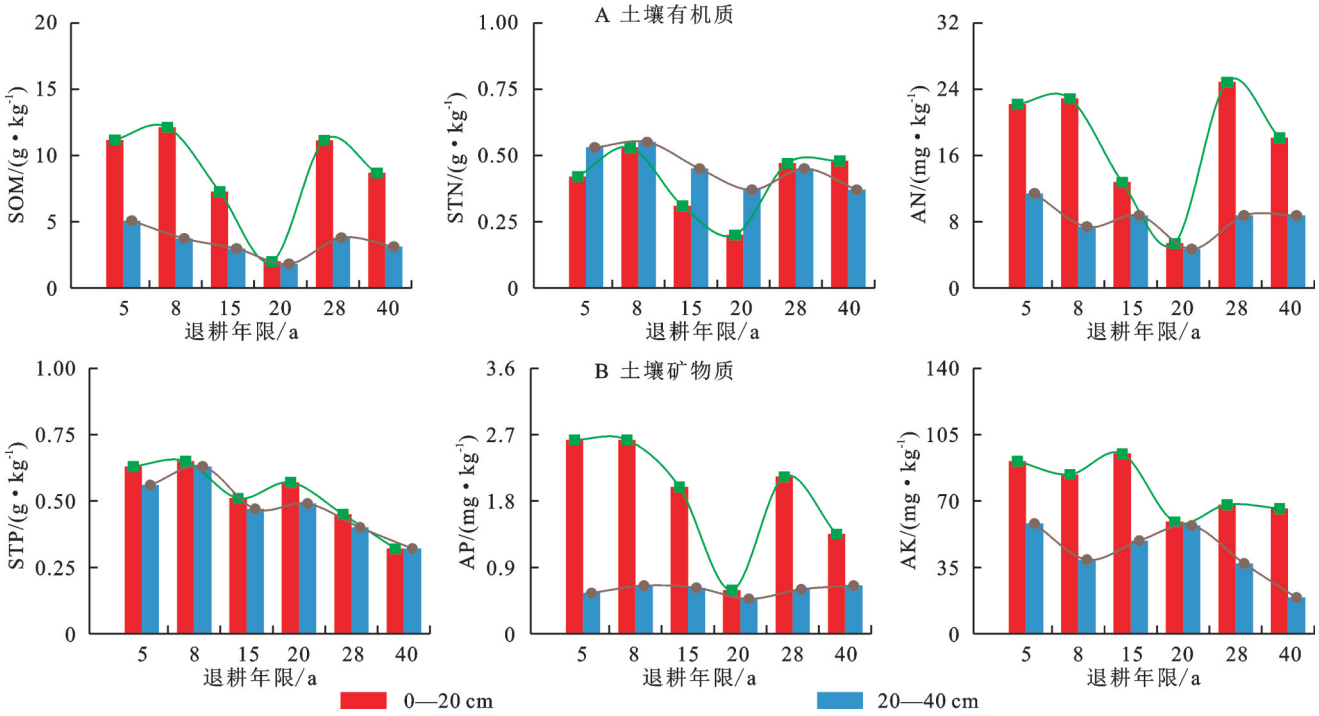


图 3　退耕演替过程中土壤养分的变化

Fig. 3　Changes in soil nutrients during farmland abandonment succession

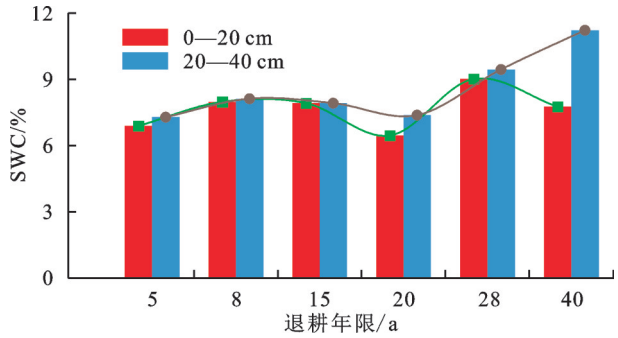


图 4　退耕演替过程中土壤水分的变化

Fig. 4　Changes in soil moisture during farmland abandonment succession

已有撂荒地演替研究表明,植被恢复过程中,群落生物量通常在初期较高,中间有所下降,之后逐渐回升[7,17]。本研究中,砒砂岩区退耕地群落生物量随退耕年限呈先降低后增加的趋势,与安慧等[18]关于荒漠草原弃耕地植被群落生物量变化研究结果一致。出现该特征的可能原因是退耕初期(5 a),因农田耕作效应,土壤养分高、土壤疏松,一、二年生先锋植物繁殖、定居快,形成较高地上生物量;8~20 a,土壤有机质类养分和速效磷降低,外加优势种为根茎类禾草(冰草),其生长缓慢、根冠比大,群落地上生物量积累相应减少;到退耕 28~40 a 时,优势种为豆科植物达乌里胡枝子和草木樨状黄芪,这些植物通过固氮作用补充氮素,使土壤养分小幅回升,群落地上生物量再度呈现增加趋势[19]。群落生物量的阶段性变化反映群落从“快速拓殖”到“稳定发展”的过渡,而 20 a 作为生物量和土壤养分低谷期,可能是植被恢复的关键节点,提示需通过人工干预加速群落演替。

表 5　环境因子与 CCA1 和 CCA2 的相关系数及解释率

Table 5　Correlation coefficients and explanatory rates between environmental factors and CCA1 and CCA2

统计指标	CCA1	CCA2	解释率/%	显著性(p)
SOM	0.15	−0.82	8.20	<0.01
STN	0.11	−0.76	7.51	<0.01
STP	−0.58	−0.24	2.81	<0.05
AN	0.21	−0.34	2.30	>0.05
AP	−0.30	−0.23	1.90	>0.05
AK	−0.67	−0.18	1.52	<0.05
SWC	0.68	−0.22	6.31	<0.01
退耕时间(AT)	0.61	0.25	4.63	<0.05
坡向(SD)	0.60	−0.16	4.02	<0.05
坡度(SL)	0.46	−0.18	5.12	>0.05
海拔(ALT)	0.20	−0.16	2.10	>0.05

物种多样性是揭示群落结构发展阶段与稳定性的重要依据[18-20]。随着演替进行,草原带物种多样性通常呈波动上升趋势[21]。本研究中,物种丰富度、Shannon-Wiener多样性指数呈先减后增再减的波动趋势,Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数变化趋于平稳,该结果与王佳等[15]关于民勤青土湖区退耕地物种多样性变化结果相似。这一变化过程可解释为:退耕初期,大量空闲生态位为一年生杂类草快速繁殖提供机会,具有较高物种多样性[17];而随着大量先锋物种入侵,群落种间竞争激烈,物种多样性降低[20];退耕至15~20 a,经过前期的激烈竞争与遴选,存留下来的物种相互适应,在无外界强烈干扰条件下和平共处[21],物种多样性上升;到退耕28~40 a,因根茎类禾草(如冰草)竞争排他性较强,其地下根系占据土壤大部分养分和空间,资源可利用量减少,物种多样性表现为降低,说明演替与种间竞争和资源可利用量密切相关[3],植物群落与环境存在协同作用。

3.2 退耕演替对土壤养分和水分的影响机制

本研究中,有机质类养分(SOM,STN,AN)和矿物质养分(AP)呈"先降后升再降"的变化趋势,这与砒砂岩区特殊的生态过程密切相关。退耕5~8 a,受前期耕作活动影响,农田土壤养分含量较高;随着演替进程推进(8~20 a),农田残留养分因无外源补充且被先锋植物快速吸收以及淋溶损失而开始下降[22];到20~28 a,微生物分解作用增强,根系层养分含量又开始积累。但退耕40 a时土壤养分仍未恢复至5 a水平,表明砒砂岩区土壤养分积累缓慢,主要与该区成土速率慢、凋落物输入不足,且地表侵蚀导致养分流失有关[5],这也是该区群落生物量难以大幅提升的主要原因。矿物质类养分(STP,AK)呈波动下降,与磷素循环特性及钾素消耗有关。磷素在土壤中易被固定,循环速率慢,且退耕后无外源补充,导致磷含量持续下降[23];钾素作为植物生长必需的大量元素,被植物持续吸收利用,而砒砂岩区土壤钾本底含量低,难以通过自然过程快速补充[24]。

总体而言,演替前期存在农田施肥等耕作效应,养分含量相对高,之后一段时间(脆弱生态系统时间较长)因养分消耗与淋移损失等,养分含量开始下降;再经过一段时间的深层吸收与地表富集(矿物质养分)、微生物转化(有机质、活性碳)和活化(各类有机酸,小分子氨基酸)等过程[20],在根系层养分含量会出现回升,直至形成顶极群落或形成与当地气候、土壤环境更加契合的植被生态系统时,养分含量达到稳定状态。植被处于退化或恢复进程,土壤养分增加或减少,以及演替过程中的养分变化快慢与植被演替快慢,从根本上取决于区域生态系统的物质和能量输入(光合同化、人为施肥和劳作等)与输出(是否有水土流失和人为过量利用等)是否平衡,特别是植被系统物质和能量循环的速率[25]。

已有研究表明,干旱地区土壤水分通常呈下降趋势[12],本研究中,退耕5—20 a间,根系层(20—40 cm)土壤水分呈小幅波动下降,而退耕后期(28~40 a)有所增加,可能是采样时间为雨后几天,加之在演替后期土壤因根系腐烂和土壤动物活动增强,土壤团聚体增加、大孔隙发达等引起入渗加快,进而增强水分入渗能力。此外,在演替后期植物组成以旱生植物为主,也间接证明土壤含水量整体呈下降趋势。

本研究表明,土壤表层(0—20 cm)有机质类养分(SOM,AN)和矿物质养分(AP,AK)含量均较深层(20—40 cm)高,具有表层累积效应,主要源于植被凋落物集中在表层分解,且表层根系密集,养分吸收与归还更加频繁,因而表现出明显的表层积累效应[20]。分析发现,SOM,AN,AP表层含量减少速率更快,说明表层养分对植被演替的响应更敏感,原因是在演替早期,先锋植物多为一年生草本,其根系浅而密集,主要分布在土壤表层,生长快速且对表层土壤养分吸收强烈,此时系统中养分"汇"(植物吸收固定)远大于"源"(凋落物分解),导致表层养分减少速率较深层快,加之雨水冲刷使表层养分淋移流失加剧。退耕地表层养分随土壤动物搬运、土壤大孔隙流和毛细管渗流进入根系活跃层,能够提高植物获取资源的效率,有助于植物的快速生长和修复[25]。此外,土壤养分表层富集特征还可作为植被-土壤协同演替的"信号因子"。因此在生态恢复实践过程中,可基于退耕地土壤养分动态变化和植被群落特征划分植被恢复阶段,并结合区域气候环境、地理特征及经济状况等制定适配的生态恢复措施[21]。

3.3 退耕演替过程中植物群落特征与环境因子的协同关系

植物群落结构特征差异受土壤、地形等环境因子的综合调控[14]。本研究中,5~28 a群落生物量与土壤养分(SOM,STN,AN)总体变化趋势基本一致,均呈先减少后增加趋势,这与杜峰等[26]在黄土丘陵区的研究结果相符,表明群落生物量变化不仅受退耕时间驱动,还与土壤养分动态密切相关。此外,物种多样性"减少—增加—减少"的波动趋势与土壤养分(SOM,STN,AN,AP)"先减后增再减"的变化趋势基本一致,说明植被-土壤系统存在协同演变效应。

CCA排序结果表明,SWC,SOM,STN,AK及退耕时间是影响植物群落分布的关键驱动因子,且

不同退耕演替阶段限制因子存在显著差异,在初期(5～8 a),SOM,STN 含量较高,优势种为肥力偏好型的狗尾草、硬皮葱等,限制因子为土壤有机质类养分;过渡阶段(15～20 a),矿物质养分成为主要驱动因子,优势种转为养分利用效率高的冰草和赖草,限制因子为矿物质磷、钾(STP,AK);到后期稳定阶段(28～40 a),SWC 和坡向成为关键因子,在阳坡生长的达乌里胡枝子占据优势,这一规律表明生态系统恢复过程中限制因子的阶段更替效应[27]。同时,无芒隐子草、阿尔泰狗娃花、达乌里胡枝子等植物种分布在排序图原点附近,表明这些物种生态位较宽,适应范围较广,对砒砂岩区恶劣环境适应性较强。

植被与土壤的协同作用体现在“双向反馈”,植被通过凋落物分解和根系活动改善土壤结构与养分状况,土壤养分则通过资源供给调控植被演替方向和速度[25]。但砒砂岩区恶劣的生态环境致使土壤养分积累比较缓慢,难以满足植被快速恢复的需求[4-5]。对此,提出如下建议:在退耕初期(5～8 a)增施氮肥,补充土壤有机质,同时采取覆盖措施减少表层养分流失;在退耕中期(15～20 a)着重补充磷、钾肥,缓解土壤养分限制;退耕后期(28～40 a)优化植被配置,适当减少高耗水灌木比例,在避免土壤干化的同时促进凋落物分解,加速养分回归土壤。

3.4　研究不足与展望

本研究采用空间序列代替时间序列法,虽能体现演替趋势,但难以完全替代长期定位观测,未来需建立长期定位监测站,探究植被-土壤协同演变的长期动态。同时,本研究仅关注植物群落地上生物量和部分土壤理化性质,未涉及植物群落地下生物量、土壤微生物及碳循环过程,后续应加强相关研究,以更全面地揭示砒砂岩区退耕恢复机制。

4　结 论

(1) 研究区植物以多年生草本、旱生植物为主,菊科、禾本科及豆科为核心优势科;群落演替总体呈“一年生草本→多年生草本→小灌木＋多年生草本”的演替特征,群落层级结构由单一草本层逐步向灌草复合层演变,稳定性逐渐增强。

(2) 土壤养分(SOM,AN,AP,AK)存在明显的表层富集效应,表层养分对演替进程响应更为敏感,其动态变化特征与群落生物量及物种多样性变化趋势基本一致,均随退耕年限增加呈“先减少后增加再减少”的波动规律,可直观表征植被-土壤系统的协同演变效应。

(3) SOM,STN,SWC,AK 及退耕时间是驱动群落-环境协同演变的关键因子,演替限制因子呈阶段更替,与群落优势种的阶段接续性特征高度协同。建议根据演替阶段采取施肥、优化植被配置等措施,加速植被-土壤协同恢复进程。

参考文献(References):

[1] Demie G, Lojka B. Assessment of riverine agroforestry for biodiversity enhancement and carbon sequestration in the Upper Awash Basin of Ethiopia[J]. Agroforestry Systems, 2025,99(8):268.

[2] 盛艳,刘林甫,圆圆,等.气候变化和人类活动对黄河流域砒砂岩区植被覆盖的影响[J].水土保持通报,2023,43(6):412-420.
Sheng Y, Liu L F, Yuan Y, et al. Effects of climate change and human activities on vegetation coverage arsenic sandstone area of the Yellow River Basin[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(6):412-420.

[3] 程帅.砒砂岩区退耕地群落演替规律及引种观测[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
Cheng S. Succession of old-field communities and site observation for species introduction in the sandstone area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[4] 张攀,姚文艺,王靖淑,等.黄河砒砂岩区复合侵蚀作用下的植被退化过程研究现状、发展动态和展望[J].中国水土保持科学(中英文),2026,24(1):1-12.
Zhang P, Yao W Y, Wang J S, et al. Status, developmental dynamics, and prospects of research on vegetation degradation processes under compound erosion in Pisha sandstone area of Yellow River[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2026,24(1):1-12.

[5] 陈鹏,郭建英,董智,等.砒砂岩区不同退耕还林措施土壤颗粒及交换性能分布特征[J].水土保持学报,2019,33(3):43-50.
Chen P, Guo J Y, Dong Z, et al. Distribution characteristics of soil particles and exchange capacity under Grain for Green Project in Pisha sandstone area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019,33(3):43-50.

[6] Poorter L, Sande V D M T, Amissah L, et al. A comprehensive framework for vegetation succession[J]. Ecosphere, 2024,15(4):e4794.

[7] 杜峰,梁宗锁,徐学选,等.陕北黄土丘陵区撂荒群落土壤养分与地上生物量空间异质性[J].生态学报,2008,28(1):13-22.
Du F, Liang Z S, Xu X X, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients and aboveground biomass in abandoned old-fields of Loess Hilly region in Northern Shaanxi, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(1):13-22.

[8] Liu Y L, Zhu G Y, Hai X Y, et al. Long-term forest succession improves plant diversity and soil quality but not significantly increase soil microbial diversity: evi-

dence from the Loess Plateau[J]. Ecological Engineering, 2020,142:105631.

[9] 何文强,王瑞霞,田英,等.毛乌素沙地南缘柠条固沙林演替过程中林下草本植物多样性与群落稳定性动态变化及其驱动因素[J].生态学报,2025,45(22):11171-11183.
He W Q, Wang R X, Tian Y, et al. Dynamic of understory herbaceous plant diversity and community stability and its driving factors during succession of lemon strip sand fixation forests at in the southern edge of the Mu Us Desert [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(22):11171-11183.

[10] 曹裕松,吴风云,肖宜安,等.退耕还林对土壤养分含量及其垂直分布的影响[J].生态环境学报,2016,25(2):196-201.
Cao Y S, Wu F Y, Xiao Y A, et al. Effect of returning farmland to forests on soil nutrients contents and its vertical distribution [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016,25(2):196-201.

[11] 纪月,杜琳青,田鹏,等.米仓山不同退耕年限土壤理化性质变化特征[J].水土保持通报,2020,40(5):48-54.
Ji Y, Du L Q, Tian P, et al. Soil physical and chemical property changes in different periods of abandoned lands in Micang Mountain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):48-54.

[12] 焦峰,温仲明,焦菊英,等.黄丘区退耕地植被与土壤水分养分的互动效应[J].草业学报,2006,15(2):79-84.
Jiao F, Wen Z M, Jiao J Y, et al. Reciprocal effects among vegetation, soil moisture and nutrients of cropland to forest and grassland in the Loess Hilly Region [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006,15(2):79-84.

[13] Rubio A, Escudero A. Small-scale spatial soil-plant relationship in semi-arid gypsum environments [J]. Plant & Soil, 2000,220(1):139-150.

[14] 彭浪,段剑,刘士余,等.红壤侵蚀区不同恢复年限植物群落演替规律[J].水土保持通报,2022,42(1):10-16.
Peng L, Duan J, Liu S Y, et al. Succession law of plant communities with different restoration periods in red soil eroded areas[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(1):10-16.

[15] 王佳,田青,王理德,等.民勤青土湖区不同年限退耕地对土壤水分与物种多样性的影响[J].干旱区研究,2022,39(2):605-614.
Wang J, Tian Q, Wang L D, et al. Effects of different years of returning farmland on soil moisture and species diversity in Minqin Qingtu Lake area [J]. Arid Zone Research, 2022,39(2):605-614.

[16] Zhang W, Ren C J, Deng J, et al. Plant functional composition and species diversity affect soil C, N, and P during secondary succession of abandoned farmland on the Loess Plateau [J]. Ecological Engineering, 2018, 122:91-99.

[17] 王春燕,燕霞,顾梦鹤.黄土高原弃耕地植被演替及其对土壤养分动态的影响[J].草业学报,2018,27(11):26-35.
Wang C Y, Yan X, Gu M H. The interaction effects of vegetation and soil nutrients on vegetation succession in abandoned farmland on the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(11):26-35.

[18] 安慧,杨新国,刘秉儒,等.荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化[J].应用生态学报,2011,22(12):3145-3149.
An H, Yang X G, Liu B R, et al. Changes of plant community biomass and soil nutrients during the vegetation succession on abandoned cultivated land in desert steppe region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011,22(12):3145-3149.

[19] 杜峰,徐学选,张兴昌,等.陕北黄土丘陵区撂荒群落排序及演替[J].生态学报,2008,28(11):5418-5427.
Du F, Xu X X, Zhang X C, et al. The ordination of abandoned old-field communities and secondary succession rate, successional divergence or convergence in the Loess Hilly Region of Northern Shaanxi Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008,28(11):5418-5427.

[20] Gu M H, Liu S L, Duan H C, et al. Dynamics of community biomass and soil nutrients in the process of vegetation succession of abandoned farmland in the Loess Plateau[J]. Frontiers in Environmental Science, 2021, 9:580775.

[21] 郭曼,郑粉莉,和文祥,等.黄土丘陵区不同退耕年限植被多样性变化及其与土壤养分和酶活性的关系[J].土壤学报,2010,47(5):979-986.
Guo M, Zheng F L, He W X, et al. Variation of vegetation diversity and its relationship with soil nutrients and enzyme activity in lands of different abandoned years in the Loess Hilly-Gully region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010,47(5):979-986.

[22] 郭胜利,路鹏,党廷辉.退耕还草对土壤水分养分演变的影响[J].西北植物学报,2003,23(8):1383-1388.
Guo S L, Lu P, Dang T H. Changes of soil C, N and soil water under conversion of cropland into grassland [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(8):1383-1388.

[23] 万昊,刘卫国,魏杰.黄土高原植被演替对土壤碳库及$\delta^{13}C$的影响[J].生态学杂,2015,34(1):100-105.
Wan H, Liu W G, Wei J. Effects of vegetation succession on carbon stock and $\delta^{13}C$ in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015,34(1):100-105.

[24] 姚文艺,申震洲,姚京威,等.黄河砒砂岩区生态治理关键技术研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(5):1-12.
Yao W Y, Shen Z Z, Yao J W, et al. Research on the key technologies of ecological control for Pisha sandstone region of the Yellow River Basin[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2023,44(5):1-12.

(下转第242页)