

# 陕北黄土丘陵区牧草枯落物对针叶纯林土壤极化的修复效应\*

邴焯皓<sup>1</sup> 刘增文<sup>2,3†</sup> Luc Nhu Trung<sup>4,5</sup> 朱博超<sup>2</sup> 张晓曦<sup>4</sup> 吴艺楠<sup>2</sup>

(1 西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

(2 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

(3 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(4 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(5 老街省农业与农村发展厅, 越南老街 330100)

**摘要** 针对陕北半湿润黄土丘陵区的侧柏、油松和落叶松等针叶纯林, 在前期关于土壤极化研究的基础上, 通过采集林地腐殖质层土壤与 7 种不同牧草枯落物进行混合分解培养, 研究不同牧草枯落物对针叶纯林土壤的修复效应, 以此作为选择适宜修复牧草种的依据。结果表明: (1) 针对侧柏纯林土壤, 苜蓿等 7 种牧草对于速效钾含量, 苜蓿、胡枝子、沙打旺、小冠花和草木樨对于蛋白酶活性的负向极化具有显著缓减作用。(2) 针对油松纯林土壤, 7 种牧草对于碱解氮含量, 毛苕子、苜蓿和草木樨对于有效磷含量, 苜蓿对于蔗糖酶活性的负向极化均有显著缓减作用。(3) 针对落叶松纯林土壤, 胡枝子和红豆草对于碱解氮含量, 苜蓿、红豆草、小冠花和毛苕子对于有效磷含量, 除苜蓿和毛苕子外的其他牧草对于有机质含量, 苜蓿以外其他牧草对于磷酸酶活性的负向极化均具有显著缓减作用。(4) 综合主成分分析表明, 对侧柏纯林土壤综合修复效果较好的依次为沙打旺、小冠花、胡枝子和毛苕子; 对于油松纯林土壤综合修复效果较好的依次为苜蓿、小冠花和草木樨; 对于落叶松纯林土壤综合修复效果较好的依次为苜蓿、草木樨和红豆草。

**关键词** 针叶纯林; 土壤极化; 牧草枯落物

**中图分类号** S714.2 **文献标识码** A

人工林在黄土高原综合治理中具有非常重要的作用, 但是长期生长或多代连栽的人工纯林引起的土壤极化现象不容忽视<sup>[1]</sup>。与阔叶纯林相比, 针叶纯林由于枯落物分解较慢和林下植被更加稀少, 所以更易引起土壤发生极化<sup>[2-3]</sup>。前期研究表明<sup>[4]</sup>, 在陕北半湿润黄土丘陵区中侧柏 (*Platycladus orientalis*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 和落叶松 (*Larix principis-rupprechtii*) 纯林中土壤的生物化学性质均发生中度以上极化。其中, 侧柏林地出现了速效钾和阳离子交换量 (CEC) 亏损, 蛋白酶活性下降的负向极化; 油松纯林出现了碱解氮、有效磷强烈亏损, 土壤蔗糖酶活性明显下降的负向极化; 落叶松纯林出现了有机质、碱解氮、有效磷强烈亏损, 磷酸酶活性明显降低的负向极化。针对这些极化现象, 最有效的解决途径是营造针阔混交林或林草复合

植被<sup>[5]</sup>, 因为不同植物在对土壤养分利用和枯落物改良土壤的作用方面可以相互补偿<sup>[6]</sup>。为此, 刘增文等<sup>[7]</sup>曾研究了利用阔叶树种枯落叶对针叶纯林土壤极化的防治效应。本研究则是通过采集林地腐殖质层土壤与 7 种不同牧草枯落物进行混合分解培养试验, 研究不同牧草枯落物对针叶纯林土壤的修复效应, 探索利用牧草防治纯林土壤极化的可行性, 为当地针叶纯林土壤选择适宜的修复牧草种提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 针叶纯林土壤和牧草枯落物样品采集

采样地位于陕北半湿润黄土丘陵区的黄陵县双龙林场, 年均温 9.4℃, 无霜期 150 d, 年均降水量

\* 国家自然科学基金项目 (31070630)、西北农林科技大学大学生创新实验计划项目 (2012 年) 资助

† 通讯作者, E-mail: zengwenliu2003@aliyun.com

作者简介: 邴焯皓 (1987—), 男, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 研究方向林业生态工程。E-mail: yy198766@163.com

收稿日期: 2013-07-25; 收到修改稿日期: 2013-10-27

630.9 mm,相对湿度平均为 64%。土壤为灰褐色森林土。在区内具有典型代表性的地段,选择进入成熟生长期、郁闭度达到 0.9 以上的侧柏、油松和华北落叶松人工针叶纯林,分别建立 20 m×20 m 的标准地(表 1)。于标准地内均匀设置 5 个 1 m×1 m 大小的小样方,清理枯落物层(包括半分解层)后收集每个样方腐殖质层(0~10 cm)的全部土壤,将 5 个样方的土壤充分混合后取部分装袋带回室内,除去

叶子、根系、石块等杂物后直接以鲜土过孔径 5 mm 的土壤筛备用。同时,在当地采集沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、胡枝子(*Leapedeza bicolor*)、毛苕子(*Vicia villosa*)、小冠花(*Coronilla varia*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)、苜蓿(*Medicago sativa*)和红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)等 7 种常见牧草的枯落物,带回室内迅速漂洗干净并风干,然后粉碎后过 1 mm 筛备用。

表 1 针叶纯林标准地基本状况

Table 1 General information of the experimental pure coniferous forests

林地类型 Forest type	林龄 Age (a)	海拔 Elevation (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope(°)	胸径 BHD (cm)	树高 Height (m)	密度 Density (ind hm <sup>-2</sup> )
侧柏 <i>P. orientali</i>	32	1 020	SE45°	32	12.31	7.4	1 500
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	29	1 100	NE80°	30	16.93	12.2	1 350
落叶松 <i>L. principis-rupprechtii</i>	29	1 100	NE50°	25	21.92	17.2	1 595

## 1.2 室内混合分解培养及测定

参照刘增文等<sup>[7]</sup>方法,将供试土样和枯落物粉碎样,按照 100:2 的干重比例两两充分混合,然后分别取 2.5 kg 装入不透水塑料培养钵中。每种牧草枯落物与土壤混合为一个处理,以不与任何物质混合的等量原林地土壤直接培养作为对照,每处理重复 3 次。培养过程中始终调节土壤湿度不变。连续培养 120 d,直至观察绝大部分枯落物分解为止。将培养好的土样平摊到干净的瓷盘里,仔细捡除残留的枯落叶碎屑,将部分鲜土留作微生物数量测定<sup>[8]</sup>,其他土样风干,过孔径 1 mm 土壤筛,以常规方法<sup>[9-10]</sup>测定脲酶、蔗糖酶、蛋白酶、脱氢酶、磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性以及 pH、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量等 16 个指标。每个土壤性质指标测定结果均采用 3 个重复(误差不超过 5%)的平均值。

## 1.3 数据处理

应用 Excel 2003 进行数据整理,利用 SPSS 19.0 进行单因素方差检验(多重比较采用 LSD 法)和综合主成分分析。

## 2 结果

### 2.1 牧草枯落物对侧柏纯林土壤性质的影响

通过比较不同牧草枯落物与侧柏林地土壤混合培养后的生物化学性质变化(表 2)可以看出,

沙打旺显著促进了侧柏林地土壤中放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶、磷酸酶、蛋白酶的活性及碱解氮和速效钾含量,却显著降低了蔗糖酶、多酚氧化酶的活性和 CEC;胡枝子显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶活性及碱解氮和速效钾的含量,却显著降低了蔗糖酶活性和 CEC;毛苕子显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶活性及碱解氮和速效钾的含量,却显著降低了蔗糖酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性及有机质含量和 CEC;小冠花显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶、蛋白酶的活性及碱解氮和速效钾的含量,却显著降低了蔗糖酶、磷酸酶的活性及有机质含量和 CEC;草木樨显著促进了真菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、蛋白酶的活性及碱解氮、有效磷和速效钾含量,却显著降低了蔗糖酶和磷酸酶的活性;苜蓿显著促进了细菌、真菌和放线菌的生长,提高了蛋白酶活性及碱解氮、有效磷和速效钾含量,却显著降低了过氧化氢酶、磷酸酶、多酚氧化酶活性及 CEC;红豆草显著促进了真菌和放线菌的生长,提高了蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶的活性及有机质、有效磷和速效钾含量。

将本次研究结果与前期研究结果<sup>[4]</sup>(即侧柏林地土壤发生了速效钾和 CEC 亏损,蛋白酶活性下降的负向极化)进行比较可以看出,7 种牧草枯落物中,毛苕子和小冠花显著减缓了侧柏林地土壤速效

钾含量的负向极化趋势,其次为红豆草、沙打旺和苜蓿;胡枝子和沙打旺能显著减缓蛋白酶负向极化趋势,其次为小冠花和苜蓿;所有牧草对 CEC 负向极化趋势均无显著减缓效果。同时,对于原侧柏林土壤本身的某些正向极化趋势,苜蓿显著增加了碱解氮和有效磷含量的正向极化趋势;沙打旺和小冠花显著增加了脱氢酶活性的正向极化趋势;而除加入红豆草提高了蔗糖酶和磷酸酶活性外,沙打旺、胡枝子、毛苕子、小冠花和草木樨明显减缓了蔗糖

酶正向极化趋势;同时毛苕子、小冠花、草木樨和苜蓿显著减缓磷酸酶正向极化趋势;沙打旺和毛苕子显著减缓了多酚氧化酶正向极化趋势。

由于土壤受到牧草枯落物的影响后的性质变化较为复杂,为了综合评价牧草枯落物对土壤的改良作用,选取除 pH 以外(尚无法确定 pH 的提高或降低是否对土壤有利)的 13 个指标(用土壤微生物总量代替细菌、真菌和放线菌数量),将不同牧草枯落物与林地土壤混合培养后较原林地土壤性质指

表 2 陕北半湿润黄土丘陵区侧柏林地土壤与不同牧草枯落物混合培养后的生物化学性质

Table 2 Biochemical properties of the soil in the *P. orientalis* forest in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi after being mixed with litters of different forage grasses separately and incubated

土壤性质 <sup>1)</sup> Soil properties	混合枯落物类型 Mixed litter <sup>2)</sup>							原侧柏林地 土壤 Primary soil of <i>P.</i> <i>orientalis</i> forest
	沙打旺 AA	胡枝子 LB	毛苕子 VV	小冠花 CV	草木樨 MO	苜蓿 MS	红豆草 OV	
微生物 Microorganism								
微生物总量 MM( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	6.30b	5.35b	5.30b	6.21b	5.16b	12.72a	5.77b	3.92b
细菌 MB( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	5.61b	4.42b	4.58b	5.76b	4.94b	12.14a	5.36b	3.83b
真菌 MF( $10^3$ cfu $g^{-1}$ )	8.71bc	7.20bc	6.83bc	7.81bc	17.79a	9.64b	21.24a	3.02c
放线菌 MA( $10^6$ cfu $g^{-1}$ )	68.69ab	92.60b	71.19ab	44.90c	21.75de	57.82bc	40.46cd	9.07e
酶活性 Soil enzyme activities								
脲酶 EU( $mg\ kg^{-1}$ )	65.32a	59.38cd	61.39bc	63.92ab	63.22ab	56.10de	56.07de	54.62e
蔗糖酶 ES( $mg\ g^{-1}$ )	1.36c	1.41c	1.52c	1.53c	1.63c	2.68b	3.41a	2.27b
过氧化氢酶 EC( $ml\ g^{-1}$ )	14.10d	14.07de	13.97ef	14.23c	14.53a	12.83g	14.41b	13.94f
脱氢酶 ED( $mg\ g^{-1}$ )	1.10a	0.58b	0.94ab	1.11a	0.71ab	0.51b	0.53b	0.61b
磷酸酶 EPh( $mg\ kg^{-1}$ )	0.74b	0.75ab	0.67de	0.68d	0.66e	0.55f	0.76a	0.71c
蛋白酶 EPr( $mg\ kg^{-1}$ )	13.81a	14.18a	4.79de	11.75ab	7.15cd	8.40bc	4.04de	2.05e
多酚氧化酶 EPo( $mg\ kg^{-1}$ )	11.0d	18.7a	15.6c	15.8bc	17.7ab	14.7c	16.2bc	17.7ab
化学性质 Chemical properties								
pH	7.4a	7.41a	7.22a	7.2a	7.17a	6.94a	7.42a	7.4a
有机质 OM( $g\ kg^{-1}$ )	37.3b	36.8b	35.5cd	34.5d	36.5bc	36.8b	39.8a	37.0b
碱解氮 AN( $mg\ kg^{-1}$ )	675.5d	645.8d	680.8d	723.1c	764.8b	953.8a	567.2e	538.3e
有效磷 AP( $mg\ kg^{-1}$ )	11.73d	11.16d	12.61cd	12.67cd	15.44a	18.26b	14.53bc	11.05d
速效钾 AK( $mg\ kg^{-1}$ )	603.4c	484.3f	628.5a	628.5a	581.5e	594.1d	616.0b	327.5g
CEC( $cmol\ kg^{-1}$ )	37.50c	39.13b	37.50c	39.13b	40.77a	39.79b	41.09a	41.42a
综合主成分值 F	1.458	0.597	0.417	0.887	-0.371	-1.170	-1.818	

1) MM, Microbes, MB, Bacteria, ME, Epiphyte, MA, Actinomyces, EU, Urease, ES, Sucrase, EC, Catalase, ED, Dehydrogenase, EPh, Phosphatase, EPr, Protease, EPo, Polyphenoloxidase, OM, Organic matter, AN, Alkalytic N, AD, Available P, AK, Available K, F, Comprehensive principal component value. 2) AA, *Astragalus adsurgens*, LB, *Leapedeza bicolor*, VV, *Vicia villosa*, CV, *Coronilla varia*, MO, *Melilotus officinalis*, MS, *Medicago sativa*, OV, *Onobrychis viciaefolia*. 3) 同一行中小写字母不同表示差异显著 ( $p < 0.05$ ), 下同 The different letters in same line indicate significant difference ( $P < 0.05$ ). The same below

标的提高率进行主成分分析,得出综合主成分函数(式(1))和综合主成分值  $F$ (表 2),当  $F$  为正值时,表示牧草枯落物使林地土壤性质综合得到改善,反之当  $F$  为负值时,则表示使其恶化。结果表明,沙打旺( $F = 1.458$ )、小冠花( $F = 0.887$ )、胡枝子( $F = 0.597$ )和毛苕子( $F = 0.417$ )枯落物与侧柏林下土壤混合培养后对土壤性质有明显改善效果;而草木樨( $F = -0.371$ )、苜蓿( $F = -1.170$ )和红豆草( $F = -1.181$ )枯落物与侧柏林下土壤混合培养后对土壤性质有恶化作用。

$$F = 0.436F_1 + 0.294F_2 + 0.160F_3 + 0.111F_4 \quad (1)$$

## 2.2 牧草枯落物对油松纯林土壤性质的影响

不同牧草枯落物与油松林地土壤混合培养后生物化学性质的变化(表 3)可以看出,沙打旺显著促进了油松林地土壤中细菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶、磷酸酶、蛋白酶、多酚氧化酶的活性及 pH、速效钾含量和 CEC,却显著降低了有机质和碱解氮的含量;胡枝子显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶、多酚氧化酶的活性及有机质、速效钾含量和 CEC,却显著降低了蔗糖酶活性与碱解氮含量;毛苕子显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶、磷酸酶、蛋白酶、多酚氧化酶的活性及有效磷和速效钾含量,而显著降低了蔗糖酶活性与碱解氮含量;小冠花显著提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶和蛋白酶的活性及碱解氮、速效钾含量和 CEC;草木樨显著促进了细菌、真菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶的活性及碱解氮、有效磷和速效钾的含量;苜蓿显著促进了放线菌的生长,提高了脲酶、蔗糖酶、蛋白酶的活性及碱解氮、有效磷和速效钾的含量,却显著降低了 pH、过氧化氢酶和磷酸酶的活性;红豆草显著促进了细菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶、多酚氧化酶的活性及速效钾含量和 CEC。

将本次研究结果与前期研究结果<sup>[4]</sup>(即油松林地土壤发生碱解氮和有效磷强烈亏损,导致土壤蔗糖酶活性下降的负向极化)进行比较可以看出,所有牧草显著减缓了碱解氮的负向极化趋势,其中苜蓿和小冠花效果最显著;毛苕子、苜蓿和草木樨显著减缓了有效磷负向极化,其中苜蓿效果最显著;除苜蓿显著减缓了蔗糖酶活性的负向极化趋势外,胡枝子和草木樨依旧加剧其负向极化。同时,对于

原油松土壤本身的某些正向极化趋势,7 种牧草均促进了脲酶的正向极化趋势,其中沙打旺、胡枝子和毛苕子效果最显著;所有牧草除苜蓿对多酚氧化酶影响不显著外,其余 6 种牧草均显著促进了其正向极化趋势;对于脱氢酶活性除沙打旺明显促进其正向极化趋势,其余牧草亦维持其原有正向极化趋势;沙打旺和草木樨显著抑制了有机质正向极化趋势;苜蓿分别降低了 pH、过氧化氢酶和磷酸酶活性,抑制了它们的正向极化趋势。

由主成分分析得出 7 种牧草枯落物对油松林地土壤极化防治的综合主成分函数(式(2))和主成分值(表 3),结果表明,苜蓿( $F = 2.249$ )、小冠花( $F = 0.361$ )和草木樨( $F = 0.134$ )枯落物与油松林地土壤混合培养后对土壤性质有明显改善效果。红豆草( $F = 0.041$ )枯落物与油松林地土壤混合培养后对土壤性质改善效果不明显。而毛苕子( $F = -0.411$ )、胡枝子( $F = -0.931$ )沙打旺( $F = -1.443$ )枯落物与油松林地土壤混合培养后对土壤性质有恶化作用。

$$F = 0.446F_1 + 0.243F_2 + 0.190F_3 + 0.121F_4 \quad (2)$$

## 2.3 牧草枯落物对落叶松纯林土壤性质的影响

不同牧草枯落物与落叶松林地土壤混合培养后生物化学性质的变化(表 4)可以看出,沙打旺显著促进了落叶松林地土壤中细菌、真菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、多酚氧化酶的活性及有机质、碱解氮和速效钾的含量;胡枝子显著促进了细菌、真菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶的活性及有机质和速效钾的含量,却显著降低了 CEC;毛苕子显著促进了细菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、脱氢酶、磷酸酶的活性及碱解氮、有效磷、速效钾含量和 CEC;小冠花显著促进了细菌、真菌和放线菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶、多酚氧化酶的活性及有机质、碱解氮、有效磷和速效钾的含量,却显著降低了 CEC;草木樨显著促进了细菌和真菌的生长,提高了脲酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶的活性及有机质、碱解氮和速效钾的含量,却显著降低了 CEC;苜蓿显著促进了细菌的生长,提高了碱解氮、有效磷及速效钾的含量,却显著降低了脲酶和过氧化氢酶的活性;红豆草显著促进了细菌和放线菌的生长,提高了蔗糖酶、过氧化氢酶、磷酸酶、蛋白酶的活性及有机质、有效磷和速效钾的含量。

表 3 陕北半湿润黄土丘陵区油松林地土壤与不同牧草枯落物混合培养后的生物化学性质

Table 3 Biochemical properties of the soil in the *P. tabulaeformis* forest in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi after being mixed with litters of different forage grasses separately and incubated

土壤性质 Soil properties	混合枯落物类型 Mixed litter							原油松林地 土壤 Primary soil of <i>P. tabulaeformis</i> forest
	沙打旺 AA	胡枝子 LB	毛苕子 VV	小冠花 CV	草木樨 MO	苜蓿 MS	红豆草 OV	
微生物 Microorganism								
微生物总量 MM ( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	12.53bc	7.26d	7.98 cd	8.37cd	18.60a	9.91bcd	14.86ab	5.80d
细菌 MB( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	12.15bc	6.71d	7.54cd	8.21cd	18.04a	9.53bcd	14.33ab	5.73d
真菌 MF( $10^3$ cfu $g^{-1}$ )	6.44b	8.27b	9.09b	5.33b	15.56a	9.17b	3.72b	3.64b
放线菌 MA( $10^6$ cfu $g^{-1}$ )	37.74ab	55.14a	43.61a	16.60bc	56.77a	37.58	53.04a	7.28c
酶活性 Soil enzyme activities								
脲酶 EU( $mg\ kg^{-1}$ )	16.55a	15.53a	15.83a	14.83ab	13.52bc	12.55c	7.93d	4.57e
蔗糖酶 ES( $mg\ g^{-1}$ )	5.24bc	3.14e	4.15cde	4.10de	3.42e	6.77a	5.34b	4.80bcd
过氧化氢酶 EC( $ml\ g^{-1}$ )	12.12c	12.38b	11.53e	11.82d	12.61a	10.58g	12.21c	11.12f
脱氢酶 ED( $mg\ g^{-1}$ )	0.51a	0.27bc	0.28b	0.15de	0.15de	0.10e	0.22bcd	0.16cde
磷酸酶 EPh( $mg\ kg^{-1}$ )	0.58b	0.68a	0.58b	0.55cd	0.52d	0.41f	0.58bc	0.48e
蛋白酶 EPr( $mg\ kg^{-1}$ )	10.45ab	9.20b	8.89bc	9.64ab	4.73d	11.07a	7.59c	5.35d
多酚氧化酶 EPo( $mg\ kg^{-1}$ )	10.3a	10.8a	9.3ab	6.4cd	6.4cd	3.4e	7.4bc	4.9de
化学性质 Chemical properties								
pH	8.02a	7.27b	7.06b	6.88b	7.03b	6.27c	7.12b	6.99b
有机质 OM( $g\ kg^{-1}$ )	24.7d	27.9a	25.4cd	27.1ab	24.9d	26.7b	26.1bc	26.0bc
碱解氮 AN( $mg\ kg^{-1}$ )	412.3e	427.0e	475.3d	570.5b	539.0c	770.0a	345.8f	364.0f
有效磷 AP( $mg\ kg^{-1}$ )	4.15cd	3.87cd	6.16ab	4.65bcd	5.23bc	7.67a	4.54bcd	3.06d
速效钾 AK( $mg\ kg^{-1}$ )	609.7b	528.2f	641.1a	597.2d	603.5c	600.3cd	547.0e	355.7g
CEC( $cmol\ kg^{-1}$ )	33.58bc	34.24b	31.30cd	34.24b	33.26bcd	30.97d	40.11a	24.12d
综合主成分值 <i>F</i>	-1.443	-0.931	-0.411	0.361	0.134	2.249	0.041	

将本次研究结果与前期研究结果<sup>[4]</sup>(即落叶松林地发生有机质、碱解氮和有效磷强烈亏损,磷酸酶活性显著下降的负向极化)进行比较可以看出,除胡枝子和红豆草枯落物对于落叶松林地的碱解氮的含量影响不显著外,其余牧草显著减缓其负向极化趋势,其中苜蓿和草木樨效果最明显;除苜蓿对磷酸酶影响不显著外,其余 6 种牧草均有效减缓其负向极化趋势,其中胡枝子作用最显著;除苜蓿和毛苕子外,其他牧草有效减缓了有机质负向极化趋势,其中沙打旺和胡枝子效果最显著;苜蓿、红豆草、小冠花和毛苕子明显减缓了有效磷的负向极化,其中苜蓿效果最显著;同时,对于原落叶松土壤本身的某些正向极化趋势,7 种牧草枯落

物中均显著增加了速效钾含量的正向极化趋势,其中小冠花效果最显著;沙打旺显著促进了过氧化氢酶的正向极化趋势;胡枝子、小冠花、草木樨和红豆草均促进了蛋白酶的正向极化趋势,其中小冠花和红豆草效果最显著;沙打旺和毛苕子显著促进了脱氢酶的正向极化趋势;除红豆草显著提高蔗糖酶活性外,其余牧草亦维持其原有正向极化趋势;除草木樨和苜蓿显著减弱了脲酶的正向极化趋势外,沙打旺、胡枝子、小冠花和草木樨显著促进了其正向极化趋势。

由主成分分析得出 7 种牧草枯落物对落叶松林地土壤极化防治的综合主成分函数(式(3))和主成分值(表 4),结果表明,苜蓿( $F = 2.680$ )、草木樨

( $F = 0.646$ )和红豆草( $F = 0.128$ )枯落物与落叶松林下土壤混合培养后对土壤性质有明显改善效果。小冠花( $F = 0.056$ )枯落物与落叶松林下土壤混合培养后对土壤性质改善效果不明显。而毛苕子( $F = -0.350$ )、胡枝子( $F = -1.014$ )和沙打旺

( $F = -1.724$ )枯落物与落叶松林下土壤混合培养后对土壤性质有恶化作用。

$$F = 0.538 F_1 + 0.209 F_2 + 0.168 F_3 + 0.085 F_4 \quad (3)$$

表 4 陕北半湿润黄土丘陵区落叶松林地土壤与不同牧草枯落物混合培养后的生物化学性质

Table 4 Biochemical properties of the soil in the *L. principis-rupprechtii* forest in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi after being mixed with litters of different forage grasses separately and incubated

土壤性质 Soil properties	混合枯落物类型 Mixed litter							原落叶松林地 土壤 Primary soil of <i>L. principis-ru</i> <i>pprechtii</i> forest
	沙打旺 AA	胡枝子 LB	毛苕子 VV	小冠花 CV	草木樨 MO	苜蓿 MS	红豆草 OV	
微生物 Microorganism								
微生物总量 MM ( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	16.38a	18.21a	13.16a	14.89b	13.37ab	9.46ab	15.17ab	1.28c
细菌 MB( $10^8$ cfu $g^{-1}$ )	15.56a	17.74a	12.77b	14.43ab	13.08ab	9.09ab	14.74ab	1.24c
真菌 MF( $10^3$ cfu $g^{-1}$ )	24.57a	21.83ab	10.72cd	16.13abc	13.35bcd	8.02cd	7.32cd	6.18d
放线菌 MA( $10^6$ cfu $g^{-1}$ )	81.89a	46.40b	38.40b	45.71b	28.48bc	37.42bc	43.02b	4.41c
酶活性 Soil enzyme activities								
脲酶 EU(mg $kg^{-1}$ )	34.65bc	38.29a	36.34ab	32.96cd	20.91f	18.21f	29.93de	28.83e
蔗糖酶 ES(mg $g^{-1}$ )	3.04ab	2.53b	2.70ab	2.49b	2.56ab	2.29b	3.37a	2.55b
过氧化氢酶 EC(ml $g^{-1}$ )	13.55a	12.98c	13.14b	12.78d	12.34e	11.04g	12.68d	11.87f
脱氢酶 ED(mg $g^{-1}$ )	0.21ab	0.17bcd	0.23a	0.17bc	0.17bcd	0.12d	0.13cd	0.16bcd
磷酸酶 EPh(mg $kg^{-1}$ )	0.32ab	0.33a	0.30bc	0.32 ab	0.29c	0.21e	0.25d	0.22e
蛋白酶 EPr(mg $kg^{-1}$ )	13.37de	19.84bc	13.50de	28.36a	16.48cd	14.99cde	25.62ab	10.51e
多酚氧化酶 EPo(mg $kg^{-1}$ )	21.6a	16.6bc	15.8c	19.5ab	17.7bc	15.5c	14.9c	16.3c
化学性质 Chemical properties								
pH	7.48a	7.56a	7.46a	7.43a	7.31a	7.25a	7.71a	7.85a
有机质 OM(g $kg^{-1}$ )	20.6abc	21.5a	19.4cd	20.0bc	20.4abc	18.1d	21.3ab	18.1d
碱解氮 AN(mg $kg^{-1}$ )	364.0c	273.0d	446.3b	439.3b	637.7a	658.0a	273.0d	263.2d
有效磷 AP(mg $kg^{-1}$ )	7.52d	7.44d	12.25b	12.79b	10.81bc	16.03a	12.84b	9.20cd
速效钾 AK(mg $kg^{-1}$ )	547.0c	427.8e	572.1b	628.5a	581.5b	581.5b	487.4d	308.7f
CEC(emol $kg^{-1}$ )	29.01b	27.38c	30.97a	26.07d	27.38c	28.36bc	29.34b	29.34b
综合主成分值 $F$	-1.724	-1.014	-0.771	0.056	0.646	2.680	0.128	

### 3 讨论

牧草对土壤的改良和修复效应既取决于牧草本身特性,也与土壤性状有关<sup>[11]</sup>。前人研究发现,翻压沙打旺、苜蓿和胡枝子等3种牧草对土壤中全氮、全磷有提高效果,其中,苜蓿对全氮的提高效果较后两者明显,而苜蓿和沙打旺对全磷的提高效果

较胡枝子明显<sup>[12]</sup>;红豆草和苜蓿对农田土壤有机质和氮素含量有提高作用<sup>[13]</sup>;小冠花枯落物加入黑河流域的灰棕荒漠土后,土壤有机质、速效氮、有效磷和速效钾含量均有提高<sup>[14]</sup>。这可能是由于豆科牧草含氮丰富,且较低的碳氮比增强了土壤微生物活性<sup>[15]</sup>,从而在增加土壤有机质的同时也提高了土壤中有效磷和速效钾等养分的含量<sup>[16]</sup>。此外,牧草对土壤养分含量的影响与养分元素本身的性质也存

在一定的关系,例如加入所有牧草后,土壤钾含量均有显著提高,这是由于相对于氮和磷,钾基本不与其他元素结合,而以游离态存在于植物组织中,故更容易释放从而使土壤速效钾积累<sup>[17]</sup>。

本研究也进一步验证了这样的推论,如小冠花和红豆草对侧柏林地土壤有机质含量的影响存在明显差异;胡枝子显著提高了油松林地的有机质含量,沙打旺、草木樨和毛苕子枯落物则显著降低了油松林地的有机质含量;除毛苕子和苜蓿外,其他牧草枯落物均显著提高了落叶松林土壤有机质含量。分析其原因可能是由于不同枯落物的本身物质构成、养分含量、碳氮比和碳磷比及养分存在形式等不同<sup>[18-20]</sup>,导致了其分解速率和养分释放过程存在差异<sup>[21-22]</sup>。此外,由于不同牧草改变了土壤微生物繁殖环境和活性,反过来也会影响牧草枯落物的分解。

与此同时,由于3种土壤本身的性质不同,同种牧草枯落物加入后,其在不同林地土壤性质下的养分释放过程也存在差异。本研究结果表明,小冠花加入3种土壤后,对有效磷含量的影响存在明显差异,其原因可能是不同土壤的微生物和酶受牧草枯落物添加的影响存在差异(例如落叶松林地土壤的磷酸酶活性在加入小冠花后显著提高,而侧柏林地土壤的磷酸酶活性在加入小冠花后则显著降低),枯落物可能通过影响土壤酶活性对养分有效性产生间接影响<sup>[23]</sup>。同时张永亮等<sup>[24]</sup>在内蒙古不同草地播种牧草的研究结果也与本研究有相近之处,即由于土壤类型的不同,加入同种枯落物后土壤有机质会出现不同的变化。

此外,由于土壤不同性质之间存在一定的关联性,牧草枯落物加入土壤后,在直接改变某项性质的同时也会间接对其他性质产生影响<sup>[25]</sup>。据王丹等<sup>[26]</sup>的研究发现,土壤碱解氮通常与土壤有机质含量关系密切,刘世全等<sup>[27]</sup>在对西藏土壤阳离子交换量的研究中发现CEC与有机质含量呈显著正相关。本试验的结果也支持了这一点,如在本试验中,当侧柏林地土壤加入胡枝子、毛苕子和小冠花后碱解氮含量显著提高,同时也增加了土壤蛋白酶活性,且由于碱解氮促进了微生物数量和活性提高,从而加速了有机质分解,进而增加了土壤肥力和CEC。

虽然本研究通过综合主成分分析得出了不同牧草枯落物对土壤极化修复的相对优先顺序,但是由于单一的牧草枯落物毕竟不能解决原林地土壤极化的所有问题,所以在生产实践中还是建议采用

不同比例的多种牧草混植以达到全面的修复效果。且需要说明的是,虽然本试验结果揭示了基本的规律,对生产实践具有重要的指导意义,但由于室内混合培养毕竟不能全面模拟野外原林地自然环境,因此尚需要通过今后野外的试验予以补充。

## 4 结 论

综合分析表明7种牧草对不同林地土壤极化的修复效应不同。对于侧柏林地的土壤极化,沙打旺枯落物综合改善效果最明显,其次为小冠花、胡枝子和毛苕子;对于油松林地的土壤极化,苜蓿枯落物综合改善效果最明显,其次为小冠花和草木樨;对于落叶松林地的土壤极化,苜蓿枯落物综合改善效果最明显,其次为草木樨和红豆草。因此,仅从牧草枯落物对土壤极化综合修复效应角度考虑,侧柏林地宜种植的牧草种为沙打旺、小冠花、毛苕子和胡枝子,在油松宜林地种植的牧草种为苜蓿、小冠花和草木樨,在落叶松林地宜种植的牧草种为苜蓿、草木樨和红豆草。

## 参 考 文 献

- [1] 张玉宏,张景群,王超. 黄土高原毛白杨、刺槐人工林对土壤养分的影响. 西北林学院学报, 2011, 26(5): 12—17. Zhang Y H, Zhang J Q, Wang C. Impact on soil nutrient of *Populus tomentosa* and *Robinia pseudoacacia* plantations in Loess Plateau (In Chinese). Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(5): 12—17
- [2] 张士奇,王国栋,张蕾. 黄土高原刺槐林对土壤养分时空分布的影响. 水土保持学报, 2008, 22(5): 91—95. Zhang S Q, Wang G D, Zhang L. Time-space distributive feature of soil nutrient and chemical characteristics of *Robinia pseudoacacia* L. plantation forestland in Loess Plateau (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 91—95
- [3] 陈立新,陈祥伟,段文标. 落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究. 应用生态学报, 1998, 9(6): 581—586. Chen L X, Chen X W, Duan W B. Larch litter and soil fertility (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 581—586
- [4] 刘增文,段而军,刘卓玛姐,等. 陕北半湿润黄土丘陵区纯林土壤性质极化. 生态学报, 2009, 29(10): 5696—5707. Liu Z W, Duan E J, Liu Z M J, et al. Soil polarization of pure forests in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi, China (In Chinese). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5696—5707
- [5] 董智,李红丽,任国勇,等. 黄泛平原风沙化土地种植牧草改良土壤效果研究. 中国草地学报, 2008, 30(3): 84—87. Dong Z, Li H L, Ren G Y, et al. Study on soil amelioration effect of planting grasses in wind-sandy land of yellow river floodplain (In

- Chinese). *Chinese Journal of Grassland*, 2008, 30(3): 84—87
- [6] 梁宏温, 黄承标. 广西宜山县不同林型人工林凋落物与土壤肥力的研究. *生态学报*, 1993, 13(3): 235—242. Liang H W, Huang C B. A study on the litterfall and soil fertility of the different planted forests in Guangxi (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 1993, 13(3): 235—242
- [7] 刘增文, 时腾飞, 杨森浩, 等. 黄土残源沟壑区利用阔叶树种枯落叶对针叶林土壤极化的防治效应. *土壤学报*, 2012, 49(3): 445—453. Liu Z W, Shi T F, Yang S H, et al. Effects of use broad-leaved tree litters to control polarization of soil under stands of conifer forests in gullied Loess Plateau (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 445—453
- [8] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其试验技术. 北京: 科学出版社, 2006. Yao H Y, Huang C Y. *Soil microbial ecology and experimental technology* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2006
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 农业出版社, 1986. Guan S Y. *Soil enzymes and its research methods* (In Chinese). Beijing: Agriculture Press, 1986
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学出版社, 1999. Lu R K. *Analytical methods for soil and agro-chemistry* (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999
- [11] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 不同种类绿肥翻压对土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(6): 1359—1364. Pan F X, Lu J W, Liu W, et al. Effect of different green manure application on soil fertility (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(6): 1359—1364
- [12] 张晓红, 徐炳成, 李凤民. 黄土塬区三种豆科牧草的土壤养分剖面分布特征与平衡. *中国生态农业学报*, 2008, 16(4): 810—817. Zhang X H, Xu B C, Li F M. Nutrient equilibrium and distribution along soil profile of three legumes on highland Loess Plateau (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(4): 810—817
- [13] 李兆丽. 红豆草与紫花苜蓿的培肥效果研究. *草业科学*, 2008, 25(7): 65—68. Li Z L. Study of *Onobrychis viciaefolia* and *Medicago sativa* on yield and soil fertility (In Chinese). *Pratacultural Science*, 2008, 25(7): 65—68
- [14] 王进, 金自学. 黑河流域灰棕荒漠土种植耐旱牧草小冠花改土培肥效果的研究. *土壤通报*, 2006, 37(3): 487—489. Wang J, Jin Z X. Effect of drought-enduring herbage-little crest grass on the fertility improvement of grey brown desert soil in Heihe valley (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(3): 487—489
- [15] 洪春来, 魏幼璋, 黄锦法, 等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2003, 29(6): 627—633. Hong C L, Wei Y Z, Huang J F, et al. Effects of total crop straw return on soil fertility and field ecological environment (In Chinese). *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Science*, 2003, 29(6): 627—633
- [16] 王芳, 张金水, 高鹏程, 等. 不同有机物料培肥对渭北旱塬土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 702—709. Wang F, Zhang J S, Gao P C, et al. Effects of application of different organic materials on soil microbiological properties and soil fertility in Weibei rainfed highland (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 702—709
- [17] Osono T, Takeda H. Potassium, calcium, and magnesium dynamics during litter decomposition in a cool temperate forest. *Journal of Forest Research*, 2004, 9(1): 23—31
- [18] Gusewell S, Gessner M O. N:P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Functional Ecology*, 2009, 23(1): 211—219
- [19] Hattenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2005, 36: 191—218
- [20] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Effects of leaf litter mixtures on the decomposition of quercus serrata and pinus densiflora using field and laboratory microcosm methods. *Ecological engineering*, 1998, 10(1): 53—73
- [21] 赵平, 高明珠. 翻压绿肥与土壤有机质的累积. *新疆农业科学*, 1985, 23(4): 12—13. Zhao P, Gao M Z. Green manure and soil organic matter accumulation (In Chinese). *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1985, 23(4): 12—13
- [22] 朱春茂, 李志芳, 吴文良, 等. 甜玉米/白三叶草秸秆还田的碳氮矿化研究. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 423—428. Zhu C M, Li Z F, Wu W L, et al. Carbon and nitrogen mineralization of incubated sweet maize and white clover straw (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 423—428
- [23] 刘云鹏, 申卫博, 张社奇, 等. 黄河中游湿地土壤养分与酶活性特征及相关性研究. *草地学报*, 2013, 21(3): 474—484. Liu Y P, Shen W B, Zhang S Q, et al. Characteristics and correlation analysis of soil nutrient and enzyme activities of the middle Yellow River Wetland (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3): 474—484
- [24] 张永亮, 范富, 高凯, 等. 苜蓿、无芒雀麦单播与混播对土壤有机质和速效养分的影响. *草地学报*, 2009, 17(1): 22—26. Zhang Y L, Fan F, Gao K, et al. Effects of *Medicago varia* M., *Bromus inermis* L. and mixture of the both on soil organic matter and available nutrients (In Chinese). *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(1): 22—26
- [25] 李松. 豆科牧草对土壤酶活性及肥力影响研究. *草业科学*, 1993, 10(5): 20—23. Li S. Effect of fertility and activity of soil enzymes on legume (In Chinese). *Pratacultural Science*, 1993, 10(5): 20—23
- [26] 王丹, 王兵, 戴伟, 等. 杉木人工林土壤有机质相关变量的敏感性分析. *北京林业大学学报*, 2011, 33(1): 78—83. Wang D, Wang B, Dai W, et al. Sensitivity analysis of variables correlated to soil organic matter in Chinese fir plantations (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(1): 78—83
- [27] 刘世全, 蒲玉琳, 张世熔, 等. 西藏土壤阳离子交换量的空间变化和影响因素研究. *水土保持学报*, 2004, 18(5): 1—5. Liu S Q, Pu Y L, Zhang S R, et al. Spatial change and affecting factors of soil cation exchange capacity in Tibet (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(5): 1—5



## REMEDYING EFFECT OF FORAGE LITTERS ON SOIL POLARIZATION OF PURE CONIFEROUS FOREST IN SEMI-HUMID LOESS HILLY AREA OF NORTH SHAANXI

Bing Yuanhao<sup>1</sup> Liu Zengwen<sup>2,3†</sup> Luc Nhu Trung<sup>4,5</sup> Zhu Bochao<sup>2</sup> Zhang Xiaoxi<sup>4</sup> Wu Yinan<sup>2</sup>

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

(2 College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(5 Department of Agriculture and Rural Development of Laocai, Laocai City 330100, Vietnam)

**Abstract** Based on previous studies on soil polarization of mono-species coniferous forests, an incubation-for-decomposition experiment was conducted of mixtures of soil samples collected from humus layers of *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* and *Larix principis-rupprechtii* forests in the semi-humid loess hilly region of Shaanxi with litters of seven species of forage grass to explore effects of forage litters remedying pure coniferous forest soils and hence to accumulate scientific data for selection of suitable soil-remedying species of forage grass. Results show that in the pure *P. orientalis* forest soil, all the litters displayed significant effects mitigating the negative polarization of readily available K, and the litters of *Medicago sativa*, *Lepedeza bicolor*, *Astragalus adsurgens*, *Vicia villosa* and *Melilotus officinalis* had similar effects on the activity of protease; in the pure *P. tabulaeformis* forest soil, all the litters had such similar effects on alkalytic N, those of *V. villosa*, *M. sativa* and *Melilotus officinalis* had on available P, and only the litter of *M. sativa* had on the activity of sucrase; and in the pure *L. principis-rupprechtii* forest soil, the litters of *L. bicolor* and *Onobrychis viciaefolia* had such similar effects on alkalytic N, the litters of *M. sativa*, *O. viciaefolia*, *Coronilla varia* and *V. villosa* had on available P, all the litters except those of *M. sativa* and *V. villosa* had on organic matter content, and all the litters except that of *M. sativa* had on the activity of phosphatase. Integrated PCA (principal component analysis) shows that in the pure *P. orientalis* forest, the litters of *A. adsurgens*, *C. varia*, *L. bicolor* and *V. villosa* had better comprehensive remediation effects on the soil, in the pure *Pinus tabulaeformis* forest, the litters of *M. sativa*, *C. varia* and *M. officinalis* had, and in the pure *L. principis-rupprechtii* forest, the litters of *M. sativa*, *M. officinalis* and *O. viciaefolia* had.

**Key words** Coniferous pure forest; Soil polarization; Forage litter

(责任编辑:卢萍)