

陕北半湿润黄土丘陵区纯林土壤性质极化

刘增文, 段而军, 刘卓玛姐, 冯顺煜

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要:在由单一树种组成的纯林内土壤性质偏离原平衡态并朝某个方向极端化发展的趋势被称为极化。采用多样地多样点混合采土法对陕北半湿润黄土丘陵区进入后期成熟生长期的不同树种纯林和混交林土壤性质测定结果表明: (1) 几乎所有树种纯林的土壤性质均发生了中度($P > 0.10$)以上的极化, 其中属于极强度极化($P > 0.20$)的性质分别为: 落叶松和白桦林地的化学、生物学性质和微量元素; 侧柏林地的化学和生物学性质; 华山松和辽东栎林地的化学性质和微量元素; 刺槐林地的生物学性质和微量元素; 小叶杨林地的物理和化学性质。(2) 不同树种纯林土壤的极化趋势分别为: 油松林地发生贫养化和微量元素亏损; 落叶松林地发生微量元素富集但却贫养化; 侧柏林地发生富 C、N 和生物学性质改善; 华山松林地发生物理性质改善但却贫养化和生物学性质恶化; 刺槐林地发生富养化、生物学性质改善但却微量元素亏损、物理性质恶化; 小叶杨林地发生贫养化、微量元素亏损和物理、生物学性质恶化; 白桦林地发生物理性质改善、微量元素富集但却贫养化; 辽东栎林地发生微量元素富集。(3) 相对林木抗极化能力, 土壤的绝对综合极抗比属于中等以上($I > 0.40$)的性质分别为: 小叶杨林地的物理性质; 侧柏林地的物理、化学性质和微量元素; 落叶松、刺槐和白桦林地的所有性质。

关键词: 纯林; 土壤退化; 土壤极化

文章编号: 1000-0933(2009)10-5696-12 中图分类号: Q142, S714.2, S718.5 文献标识码: A

Soil polarization of pure forests in the semi-humid loess hilly area of North Shaanxi, China

LIU Zeng-Wen, DUAN Er-Jun, LIU Zhuo-Majie, FENG Shun-Yu

College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5696 ~ 5707.

Abstract: Soil polarization refers to the shift of soil properties away from equilibrium toward unbalanced or extreme conditions due to the presence of a single tree species in pure stands of planted forests. In this study, we measured a broad range of soil properties in mature stands of pure and mixed forests at multiple sites in the semi-humid loess hilly region of northern Shaanxi Province, China. The results indicated that soil polarization reached the level of moderate or higher($P > 0.10$) in almost all pure forests that were examined in this study and in which very strong polarization($P > 0.20$) was observed for the following soil properties: chemical properties, biological properties and trace element content of *Larix principis-rupprechtii* and *Betula platyphylla* forests; chemical and biological properties of *Platycladus orientalis* forest; chemical properties and trace elements of *Pinus armandii* and *Quercus liaotungensis* forests; biological properties and trace element content of *Robinia pseudoacacia* forest; physical and chemical properties of *Populus simonii* forest. The results also indicated the following trends in soil polarization. *Pinus tabulaeformis* forest depleted the soil nutrient and trace element content. *L. principis-rupprechtii* forest increased the soil trace element content but decreased the soil nutrient content. *P. orientalis* forest increased soil C and N content and improved soil biological properties. *P. armandii* forest improved soil physical properties, but depleted soil nutrient levels and caused a deterioration in soil biological properties. *R. pseudoacacia* forest increased soil nutrient content and improved soil biological properties, but decreased soil trace element

基金项目: 西北农林科技大学人才计划资助项目(2005); 国家自然科学基金资助项目(No. 30471376)

收稿日期: 2008-07-05; 修订日期: 2009-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengwenliu2003@yahoo.com.cn

content and caused a deterioration in soil physical properties. *P. simonii* forest decreased soil nutrient and trace element content and caused a deterioration in soil biological and physical properties. *B. platyphylla* forest improved soil physical properties and increased soil trace element content, but depleted soil nutrient content. *Q. liaotungensis* forest increased the soil trace element content. When we compared the level of soil polarization to the anti-polarization capacity of trees, we found more than moderate levels of polarization ($I > 0.40$) for the following soil properties: soil physical properties of *P. simonii* forest; soil physical properties, chemical properties, and trace element content of *P. orientalis* forest; all soil properties of *L. principis-rupprechtii*, *R. pseudoacacia* and *B. platyphylla* forest.

Key Words: pure forests; soil degradation; soil polarization

在由同一树种形成的人工或天然纯林内,由于树种的生物生态学特性的单一性、对物质吸收利用的选择性和对环境效应的特殊性^[1,2],土壤性质往往呈现偏离原平衡态并朝某个方向非平衡或极端化发展的趋势,被称为土壤性质的极化^[3]。“土壤极化(soil polarization)”和“土壤退化(soil degradation)”是两个既有关联又有区别的概念,其中土壤退化是指由于各种自然因素和人类活动引起的林地养分耗竭、退化或农林耕地被占用,包括土壤侵蚀、土壤性质恶化和非农林占地 3 个方面^[4]。可见二者的主要区别在于:首先,极化主要是指纯林发生的一种土壤潜在演变趋势,是由于纯林的单一树种组成所决定的,原因完全来自森林内部的自然因素(即内因引起),而土壤退化是指各种森林受到来自外部或内部的自然因素和人为因素干扰时土壤性质恶化和质量下降现象(即由外因或内因引起)^[5~8];其次,极化反映的是某些土壤理化和生物学性质离开平衡状态的趋势,结果可能是正向(增益性)的,也可能是负向(破坏性)的,而退化的结果总是破坏性的;其三,极化不一定意味着土壤退化,只有负向的、破坏性极化才会导致人工林土壤发生退化,而正向的、增益性极化反而会使土壤性质得到改善。

土壤性质极化包括物理极化、化学极化和生物学极化,其中物理极化包括土壤板结^[9]、砂质化、旱化^[10,11]、潜育化、壤质化和中生化等;化学极化包括土壤酸化^[12,13]、盐碱化、贫养化^[14,15]、重金属污染、土壤中毒^[16,17]和富养化^[18~20]等;生物学极化包括生物活性提高或降低等^[21]。严重的破坏性土壤极化不但会导致土壤退化,而且会引发连栽障碍,如已被广泛研究证实的杉木^[22]、落叶松^[23,24]、小叶杨^[25,26]、桉树^[27]等人工林土壤都存在退化的趋势。

陕北半湿润黄土丘陵区属暖温带湿润森林向干旱草原过渡的生物气候交错带,这里的森林植被中有超过 60% 的面积为人工或天然纯林,形成了当地植被覆盖的重要成分。由于半湿润气候区属森林与灌草植被建设的分界线,该区的森林植被建设以防止水土流失、改善生态环境和兼具经济用材为目标,森林的稳定和可持续发展是目前经营管理森林的首要任务,而维持森林的稳定和可持续发展,防止林地土壤退化是重中之重。所以,为了充分认识该区不同树种纯林土壤性质动态和极化现状,本项研究采用多样地多样点混合采土法对当地分布的主要纯林土壤性质进行综合测定,应用土壤极化理论对其进行综合分析,期望能对指导该区森林植被的建设和管理提供科学理论依据。

1 研究地区概况

本项研究选择了陕北黄陵县双龙林场进行调查,这里地处黄土高原中部暖温带半湿润黄土丘陵区(属桥山林区),年均温 9.4 °C,1 月份均温 -4.7 °C,7 月份均温 21.9 °C,无霜期 150 d,年均降水量 630.9 mm,相对湿度平均为 64 %。土壤为灰褐色森林土。所调查的林地均为当地具有典型代表性的成熟林分,分别有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)、华山松(*Pinus armandii*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、小叶杨(*Populus simonii*)、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、白桦(*Betula platyphylla*)等纯林及混交林。

2 研究方法

2.1 标准地设置、土壤样品采集和测定方法

首先在研究区内最具有典型代表性的地段,选择距离较近且同处于梁坡中上部、坡向阳坡或半阳坡、土壤

质地基本相同的立地,针对进入成熟生长期的以上 8 个树种纯林和 3 种混交林(油松×辽东栎、华山松×辽东栎、侧柏×辽东栎)分别建立 3 块 20 m×20 m 的标准地。然后在所建立的标准地内分别均匀选定 5 个采样点,用环刀法取深度 10 cm 处的原状土进行孔隙度和毛管持水量的测定,同时以 5 样点混合取土法采集 0~20 cm 土层的土壤样品约 3 kg 左右,拣除根系、石子等杂物后带回室内风干过筛,按照以下方法进行分析测定:

物理性质中,团聚体含量采用团粒分析仪测定。化学性质中,土壤 pH 值采用 PHS-2 型酸度计测定(水土比为 2.5:1);有机碳采用重铬酸钾容量法测定;腐殖质组成(胡敏酸、富啡酸和胡敏素)采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾氧化法测定;土壤全 N 采用半微量凯氏定氮法测定;碱解 N 采用扩散法测定;速效 P 采用 NaHCO₃ 浸提钼兰比色法测定;速效 K 采用醋酸铵浸提火焰光度法测定;阳离子交换量采用乙酸钠-乙酸铵火焰光度法测定。生物学性质中,微生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定;脲酶活性采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定,结果以培养 24 h 后每千克土壤中 NH₃-N 的毫克数(mg·kg⁻¹)表示;蔗糖酶活性采用 Na₂S₂O₃ 滴定法测定,结果以培养 24 h 每克风干土壤滴定所需 0.05 mol·L⁻¹ Na₂S₂O₃ 的毫升数(mL·g⁻¹)来表示;过氧化氢酶活性采用 KMnO₄ 滴定法测定,结果以培养 0.5 h 后每克风干土壤滴定所需 0.1 mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数(mL·g⁻¹)来表示;过氧化物酶活性采用滴定法测定,结果以培养 2 h 后每千克土壤消耗的 0.005 mol·L⁻¹ I₂ 标准液的毫升数(mL·kg⁻¹)表示;脱氢酶采用三苯基四唑氯化物比色法测定,结果以培养 24 h 后每克风干土生成的甲量(ug·g⁻¹)表示;磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定(用 pH10 硼酸缓冲液测定碱性磷酸酶),结果以培养 2 h 后每千克土壤中 P₂O₅ 的毫克数(mg·kg⁻¹)表示;蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定,结果以 24 h 后每克土壤中 NH₂-N 的毫克数(mg·g⁻¹)表示。微量元素中,Cu、Zn、Fe、Mn、Ni、Cd 的全量采用硝酸高氯酸消煮-AAS 法测定,有效态含量采用二乙三胺五乙酸(DTPA)浸提-原子吸收分光光度法(AAS 法)测定;F 采用水浸提-氟离子选择电极法测定。

以上所有指标测定均采用 3 次重复(误差不超过 5%)的平均值,并应用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件进行数据处理和 LSD 多重检验法检验不同树种林地土壤性质之间的差异显著性,结果均达到显著或极显著水平。

2.2 土壤性质极化的表征方法

2.2.1 土壤平衡态的确定

根据土壤极化的概念,土壤极化是相对平衡状态而言的,所以首先应该确定处于平衡状态的土壤性质。对于纯林来讲,它的平衡态应该是相同立地条件的、人类尚未破坏的、由各种不同针阔树种组成的天然混交林。但是,在自然界中由于天然混交林树种组成的局限性,很难找到这样的绝对平衡态,所以,本研究中取不同针叶树种纯林、阔叶树种纯林和针阔混交林的二次平均值作为相对平衡态性质,具体计算办法如下:

$$X_{i0} = (\overline{X_{in}} + \overline{X_{ib}} + \overline{X_{im}}) / 3 \quad (1)$$

式中, X_{i0} 为相对平衡态土壤第 i 种性质取值; $\overline{X_{in}}$ 、 $\overline{X_{ib}}$ 和 $\overline{X_{im}}$ 分别为当地针叶林地、阔叶林地和针阔混交林地土壤第 i 种性质平均值。

2.2.2 土壤极化指标计算

(1) 反映树种抗极化能力的指标

抗极化域 W_i 反映树种抵抗土壤性质极化的范围,计算公式如下:

$$W_i = (X_{imax} - X_{imin}) / \overline{X_i} \quad (2)$$

式中, X_{imax} 、 X_{imin} 分别为维持某个树种正常生长所能忍受的土壤第 i 种性质最大和最小限值,可以通过对某成林树种分布的较大范围内林地土壤性质的测定来确定。 $\overline{X_i}$ 为某树种林地土壤第 i 种性质的平均值。

抗极化度 R_i 反映树种在当地抗极化的能力,即保证正常生长发育的情况下能够忍受土壤极化的最大限度,分为正向抗极化度和负向抗极化度,计算公式如下:

$$R_{i(+)} = (X_{imax} - X_{i0}) / X_{i0} \quad R_{i(-)} = (X_{imin} - X_{i0}) / X_{i0} \quad (3)$$

式中, $R_{i(+)}$ 、 $R_{i(-)}$ 分别为某个树种的正向和负向抗极化度; X_{imax} 、 X_{imin} 意义同前, X_{i0} 为相对平衡态土壤

表 2 陕北半湿润黄土丘陵区不同树种纯林及平衡态土壤性质

Table 2 Soil properties of pure forests and equilibrium in semi-humid loess hilly region of North Shaanxi										
土壤性质 Soil properties	代码 Code	油松 <i>P. tabulaeformis</i>	落叶松 <i>L. principis-rupprechtii</i>	侧柏 <i>P. orientalis</i>	华山松 <i>P. armandii</i>	刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>	小叶杨 <i>P. simonii</i>	白桦 <i>B. platyphyllo</i>	辽东栎 <i>Q. liaotungensis</i>	平衡态 Equilibrium
物理性质 Physics										
孔隙度 (%)	SP	49.43	58.11	54.09	58.49	41.89	45.66	57.74	58.11	52.86
毛管持水量 (g·kg ⁻¹)	CW	350.1	445.4	357.6	433.6	260.9	291.9	450.6	452.4	387.6
团聚体 (g·kg ⁻¹)	AG	911.1	870.7	931.7	927.4	962.5	793.5	932.3	757.9	862.4
水稳性团聚体 (g·kg ⁻¹)	WAG	538.4	480	650.8	702	534.2	352.7	660.6	499.7	520.7
化学性质 Chemistry										
pH	pH	8.19	8.20	8.10	8.29	8.01	8.28	8.27	8.02	8.14
有机 C (g·kg ⁻¹)	OC	18.86	14.23	25.66	15.26	18.68	10.93	19.84	21.31	18.53
胡敏酸 (g·kg ⁻¹)	HA	3.93	2.43	4.21	2.29	3.93	1.91	2.67	3.73	3.21
富啡酸 (g·kg ⁻¹)	FA	4.35	4.72	8.08	4.17	5.20	2.86	4.69	5.12	4.90
胡敏素 (g·kg ⁻¹)	Hu	8.98	7.08	13.38	8.80	9.56	6.17	12.47	12.46	10.26
全 N (g·kg ⁻¹)	TN	1.61	1.14	2.02	1.33	1.86	0.93	1.43	1.76	1.58
碱解 N (mg·kg ⁻¹)	AN	93.38	95.85	171.02	104.65	123.43	108.14	118.07	152.41	132.31
速效 P (mg·kg ⁻¹)	AP	6.61	4.51	9.24	6.70	7.67	7.40	5.36	6.00	9.03
速效 K (mg·kg ⁻¹)	AK	129.86	115.12	79.92	50.76	158.93	127.55	62.11	86.70	131.78
CEC (me/100g)	CEC	16.67	17.78	9.10	22.83	16.44	8.72	11.14	18.93	14.38
生物学性质 Biology										
脲酶 (mg·kg ⁻¹)	EU	19.37	19.91	20.52	11.42	35.34	14.99	18.76	22.90	20.29
蔗糖酶 (mL·g ⁻¹)	ES	1.70	4.59	3.34	2.06	2.84	2.12	0.50	2.24	2.60
过氧化氢酶 (mL·g ⁻¹)	EC	2.25	2.28	2.29	2.27	2.20	2.29	2.25	2.26	2.23
过氧化物酶 (mL·kg ⁻¹)	EPe	6.64	8.96	6.47	5.97	8.47	6.73	6.47	6.97	6.25
脱氢酶 (μg·g ⁻¹)	ED	108.14	83.15	143.18	101.37	111.18	99.21	89.46	100.67	91.96
磷酸酶 (mg·kg ⁻¹)	EPH	0.40	0.22	0.56	0.26	0.32	0.29	0.21	0.33	0.32
蛋白酶 (mg·g ⁻¹)	EPr	0.16	0.21	0.17	0.10	0.15	0.15	0.24	0.15	0.18
微生物量 C (mg·kg ⁻¹)	MC	63.67	56.22	88.27	56.00	60.38	39.25	66.06	73.82	62.50
微量元素 Trace elements										
全 Cu (mg·kg ⁻¹)	TCu	55.44	63.58	52.29	63.66	61.79	36.26	61.30	59.45	50.73
有效 Cu (mg·kg ⁻¹)	ACu	0.41	1.40	0.89	0.40	0.30	0.70	1.01	0.87	0.80
全 Zn (mg·kg ⁻¹)	TZn	58.32	80.61	79.54	77.41	87.26	51.84	81.13	72.76	71.49
有效 Zn (mg·kg ⁻¹)	AZn	5.42	7.16	10.25	3.60	5.43	6.25	6.78	4.48	7.73
全 Fe (g·kg ⁻¹)	TFe	33.74	29.44	29.92	29.88	34.99	33.03	35.40	30.80	31.98
有效 Fe (mg·kg ⁻¹)	AFe	9.64	14.66	9.14	13.33	6.51	13.13	14.28	16.87	11.86
全 Mn (mg·kg ⁻¹)	TMn	85.21	110.22	82.35	103.23	72.50	82.63	110.64	95.36	87.81
有效 Mn (mg·kg ⁻¹)	AMn	11.47	19.03	17.10	3.73	4.25	8.70	8.38	13.28	11.81
全 Ni (mg·kg ⁻¹)	TNi	57.12	89.48	33.60	27.38	40.40	44.37	62.25	87.23	48.42
全 Cd (mg·kg ⁻¹)	TCd	8.44	21.16	7.52	9.77	9.91	13.67	20.93	18.49	11.06
全 F (mg·kg ⁻¹)	TF	7.54	9.56	7.77	4.11	7.18	7.01	5.20	5.17	6.60

SP: Soil porosity; CW: Capillary water; AG: Aggregate (>0.25 mm); WAG: Water-stable aggregate (>0.25 mm); OC: Org-C; HA: Humic acid; FA: Fulvic acid; Hu: Humin; TN: Total N; AN: Available N; AP: Available P; AK: Available K; EU: Urease; ES: Sucrase; EC: Catalase; EPe: Peroxidase; EPr: Phosphatase; EPh: Phosphatase; MC: Microorganism biomass C;

TCu: Total Cu; ACu: Available Cu; The rest trace elements are indicated in the same way

性质。

(2) 反映土壤极化程度的指标

极化度 P_i 反映土壤性质离开平衡态的相对距离,计算公式如下:

$$P_i = (X_i - X_{i0}) / X_{i0} \quad (4)$$

式中, X_i 、 X_{i0} 分别为待评和平衡态土壤第 i 种性质的测定值, P_i 的值有正有负, 表示土壤极化是有方向的, 正向即增强或积累, 负向即减弱或亏损。

极抗比 I_i 反映土壤极化度相对于抗极化度的比率, 计算公式如下:

$$I_i = P_i / |R_i| \quad (5)$$

式中, P_i 为土壤极化度, R_i 为抗极化度。 I_i 的值有正有负, 表示土壤极化的方向。

根据以上对各项土壤性质极化程度指标的计算结果, 当假定所有土壤性质相对实现当前土地生产力同等重要时, 可以分别土壤物理、化学和生物学性质计算土壤的综合极化程度, 公式如下:

$$P_a = \frac{1}{N} \sum (|P_i|) \quad P_r = \frac{1}{N} \sum P_i \quad I_a = \frac{1}{N} \sum (|I_i|) \quad (N \text{ 为指标总数}) \quad (6)$$

式中, P_a 和 P_r 分别为待评土壤性质的绝对和相对综合极化度; I_a 为绝对综合极抗比。当 $P_a = P_r$ 时, 所有土壤性质向同一方向极化, 即要么正向, 要么负向 (这种情形很少见); 当 $P_a > P_r$ 时, 不同土壤性质向不同方向极化, 即有的正向, 有的负向 (多数情况是这样), 且当 $P_r > 0$ 时, 土壤性质综合正向极化, 当 $P_r < 0$ 时, 土壤性质综合负向极化。

2.3.3 土壤性质极化程度分级

以土壤极化度 (P) 和极抗比 (I) 绝对值为依据, 将土壤极化度可以划分为 5 个等级, 具体如表 1。需要指出, 表 1 中判断标准的临界值的确定基本上还是经验的, 有待进一步研究确定。因为不同树种对于土壤极化的忍受程度不同, 那么临界值的确定会因树种而异。所以, 准确的临界值确定需要针对具体树种, 经过大量的调查和数据统计分析后得出, 表 1 仅作为一种模式被提出。

表 1 纯林土壤性质极化程度分级

Table 1 Gradation of soil polarization in pure forest

极化度 (P) 分级 Grade of polarization		极抗比 (I) 分级 Grade of polarization/anti-polarization	
I 基本稳定 Conserve stable	≤ 0.05	I 基本稳定 Conserve stable	≤ 0.20
II 弱度极化 Light polarization	$0.05 \sim 0.10$	II 轻微极化 Light polarization	$0.20 \sim 0.40$
III 中度极化 Moderate polarization	$0.10 \sim 0.15$	III 中等极化 Moderate polarization	$0.40 \sim 0.60$
IV 强度极化 Strong polarization	$0.15 \sim 0.20$	IV 严重极化 Serious polarization	$0.60 \sim 0.80$
V 极强度极化 Very strong polarization	> 0.20	V 极严重极化 Very serious polarization	> 0.80

3 结果与分析

3.1 不同树种纯林土壤的极化度

根据对每个树种纯林或混交林土壤性质测定结果的平均值, 应用公式 (1) 计算了当地森林土壤的相对平衡态 (表 2), 再根据公式 (4) 计算了每个树种纯林土壤的极化度 (图 1), 结果表明:

油松纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为微量元素 (强度极化 $P_a = 0.17$) > 生物、化学性质 (为了讨论方便, 这里指除了微量元素之外的其他化学性质, 下同) (中度极化 $P_a = 0.12 \sim 0.13$) > 物理性质 (弱度极化 $P_a = 0.07$), 说明油松纯林更容易引起微量元素发生极化, 而物理性质的极化相对迟缓。从相对综合极化度来看, 物理性质和生物学性质总体保持基本稳定 ($P_r = -0.04, 0.00$), 化学性质总体负向极强度极化 ($P_r = -0.38$), 微量元素总体负向弱度极化 ($P_r = -0.09$)。具体来讲, 油松纯林容易引起土壤胡敏酸、全量 F 和 Ni 的强烈富集, CEC、脱氢酶和磷酸酶活性明显提高, 但会引起富啡酸、胡敏素、碱解氮、速效 P、有效态 Cu、Zn 和 Fe、全量 Cd 和 Zn 强烈亏损, 蔗糖酶活性明显降低。可见, 当地油松纯林土壤性质总体表现出贫养化和微量

元素亏损的极化趋势。

落叶松纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为微量元素(极强度极化 $P_a = 0.42$) > 生物、化学性质(极强度极化 $P_a = 0.24 \sim 0.27$) > 物理性质(中度极化 $P_a = 0.11$),说明落叶松纯林更容易引起微量元素发生极化,其次为生物、化学性质,而物理性质的极化相对迟缓。从相对综合极化度来看,物理性质总体正向弱度极化($P_r = 0.06$),化学性质总体负向强度极化($P_r = -0.20$),生物学性质总体正向中度极化($P_r = 0.11$),微量元素总体正向极强度极化($P_r = 0.39$)。具体来讲,落叶松纯林容易引起土壤有机 C、胡敏酸、胡敏素、全 N、碱解氮、速效 P 的强烈亏损,全量 Cu、Mn、Ni、Cd、F 和有效态 Cu、Fe、Mn 的强烈富集;导致土壤蔗糖酶、过氧化物酶和蛋白酶明显提高,磷酸酶活性明显降低。可见,当地落叶松纯林土壤基本表现出微量元素富集但却贫养化的极化趋势。

侧柏纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为生物、化学性质(极强度极化 $P_a = 0.27 \sim 0.29$) > 微量元素(强度极化 $P_a = 0.20$) > 物理性质(中度极化 $P_a = 0.12$),说明侧柏纯林更容易引起生物、化学性质发生极化,其次为微量元素,而物理性质的极化相对迟缓。从相对综合极化度来看,物理性质总体正向弱度极化($P_r = 0.07$),化学性质总体保持基本稳定($P_r = 0.04$),生物学性质总体正向极强度极化($P_r = 0.25$),微量元素总体保持基本稳定($P_r = 0.02$)。具体来讲,侧柏纯林容易促进土壤水稳性团聚体的形成,富啡酸、有机 C、胡敏酸、胡敏素、N 素、有效态 Zn、Mn 的强烈富集,速效 K、CEC、有效态 Fe、全量 Ni 和 Cd 的强烈亏损,导致磷酸酶、脱氢酶、蔗糖酶活性和微生物量 C 的大幅度提高。可见,侧柏纯林土壤基本表现出富 C、N 和生物学性质改善的极化趋势。

华山松纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为化学性质和微量元素(极强度极化 $P_a = 0.30 \sim 0.33$) > 生物学和物理性质(强度极化 $P_a = 0.19$),说明华山松纯林更容易引起土壤化学性质和微量元素的极化,其次为生物学和物理性质。从相对综合极化度来看,物理性质总体正向强度极化($P_r = 0.19$),化学性质总体负向中度极化($P_r = -0.14$),生物学性质总体负向强度极化($P_r = -0.16$),微量元素总体负向强度极化($P_r = -0.19$)。具体来讲,华山松纯林容易促进土壤水稳性团聚体的形成,引起土壤全 Cu 和 Mn 的强烈富集,却导致养分和有效 Cu、Zn、Mn、全量 Ni 和 F 的强烈亏损,脲酶、蔗糖酶、磷酸酶和蛋白酶活性降。可见,华山松纯林土壤基本表现出物理性质改善但却贫养化和生物学性质恶化的极化趋势。

刺槐纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为微量元素(极强度极化 $P_a = 0.28$) > 生物学性质(极强度极化 $P_a = 0.21$) > 物理性质(强度极化 $P_a = 0.19$) > 化学性质(中度极化 $P_a = 0.13$)。说明刺槐纯林更容易引起土壤微量元素、生物学性质的极化,其次为物理性质和化学性质。从相对综合极化度来看,物理性质总体负向强度极化($P_r = -0.17$),化学性质总体保持基本稳定($P_r = 0.05$),生物学性质总体正向中度极化($P_r = 0.15$),微量元素总体负向强度极化($P_r = -0.17$)。具体来讲,刺槐纯林容易导致土壤胡敏酸、全 N、速效 K 和全量 Cn、Zn 的强烈富集,却使得有效 Cu、Zn、Fe、Mn 出现强烈亏损,提高了脲酶、过氧化物酶、脱氢酶活性,但降低了蛋白酶活性。可见,刺槐纯林土壤基本表现出富养化、生物学性质改善但却微量元素亏损、物理性质恶化的极化趋势。

小叶杨纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为化学性质(极强度极化 $P_a = 0.27$) > 物理性质(极强度极化 $P_a = 0.24$) > 生物学性质和微量元素(强度极化 $P_a = 0.16$)。说明小叶杨纯林更容易引起土壤化学和物理性质的极化,其次为生物学性质和微量元素。从相对综合极化度来看,物理性质总体负向极强度极化($P_r = -0.24$),化学性质总体负向极强度极化($P_r = -0.27$),生物学性质总体负向中度极化($P_r = -0.11$),微量元素总体负向弱度极化($P_r = -0.08$)。具体来讲,小叶杨纯林容易导致土壤有机 C、胡敏酸、富啡酸、胡敏素、全 N、碱解氮、速效 P、CEC、全量 Cu 和 Zn、有效态 Zn 和 Mn 的强烈亏损,全量 Cd 出现富集,脲酶、蔗糖酶、蛋白酶活性和微生物量 C 含量明显降低。可见,小叶杨纯林土壤基本表现出贫养化、微量元素亏损和物理、生物学性质恶化的极化趋势。

白桦纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为微量元素(极强度极化 $P_a = 0.27$) > 化学性质(极强度极化

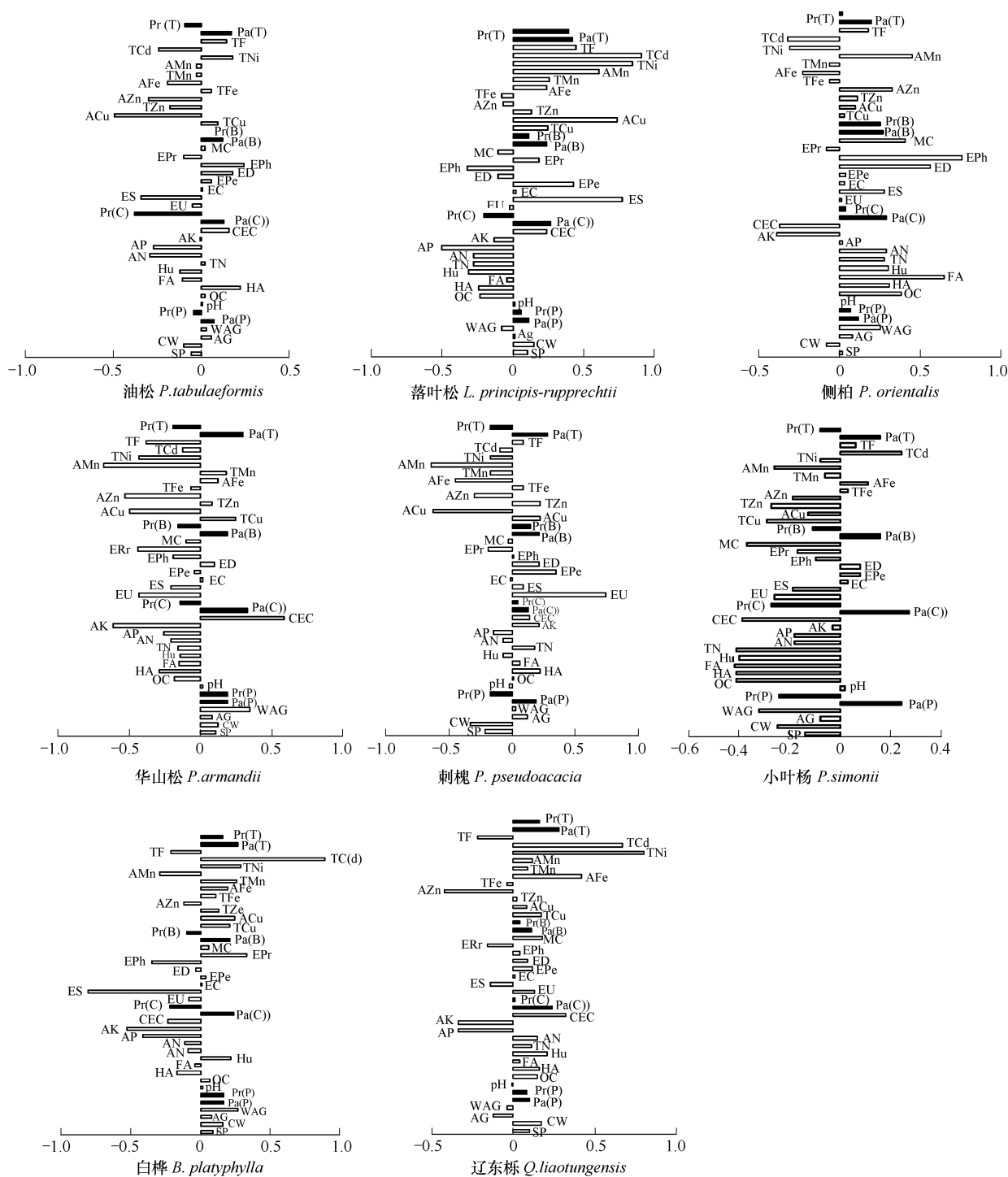


图1 陕北半湿润黄土丘陵区不同树种纯林土壤极化度

Fig. 1 Soil polarization of pure forests in semi-humid loess rolling region of North Shaanxi

图1中符号意义同表2, P_a 和 P_r 分别为土壤物理、化学和生物学性质的绝对和相对综合极化度,其中计算中除过AG、pH、HA、FA和Hu

The codes in figure 1 mean the same as table 2; P_a and P_r mean absolute and relative comprehensive polarization of physical (P), chemical (C) and biological (B) properties which are calculated except AG, pH, HA, FA and Hu

$P_a = 0.24$) > 生物学性质 (极强度极化 $P_a = 0.21$) > 物理性质 (强度极化 $P_a = 0.17$)。说明白桦纯林更容易引起土壤微量元素、化学性质的极化,其次为生物学和物理性质。从相对综合极化度来看,物理性质总体正向

极强度极化($P_r = 0.17$),化学性质总体负向极强度极化($P_r = -0.22$),生物学性质总体负向弱度极化($P_r = -0.10$),微量元素总体正向强度极化($P_r = 0.16$)。具体来讲,白桦纯林容易导致土壤胡敏素、CEC、全量 Cu、Mn、Ni、Cd 出现强烈富集,胡敏酸、速效 P、K、有效态 Mn、全量 F 强烈亏损,提高蛋白酶活性,降低蔗糖酶、磷酸酶活性。可见,白桦纯林土壤基本表现出物理性质改善、微量元素富集但却贫养化的极化趋势。

辽东栎纯林土壤绝对综合极化度大小顺序为微量元素(极强度极化 $P_a = 0.28$) > 化学性质(极强度极化 $P_a = 0.24$) > 生物学和物理性质(中度极化 $P_a = 0.11$)。说明辽东栎纯林更容易引起土壤微量元素、化学性质的极化,其次为生物学和物理性质。从相对综合极化度来看,物理性质总体正向弱度极化($P_r = 0.08$),化学性质总体保持基本稳定($P_r = 0.01$),生物学性质总体保持基本稳定($P_r = 0.04$),微量元素总体正向强度极化($P_r = 0.16$)。具体来讲,辽东栎纯林容易导致土壤胡敏酸、胡敏素、CEC、全量 Cu、Ni、Cd 和有效态 Fe 的强烈富集,速效 P、K、有效态 Zn、全量 F 强烈亏损,明显提高微生物量 C 含量和脲酶、过氧化物酶活性,却降低蛋白酶和蔗糖酶活性。可见,辽东栎纯林土壤基本表现出微量元素富集的极化趋势。

3.2 不同树种纯林的抗极化域和土壤的极抗比

以整个陕蒙半湿润半干旱地区(包括陕北黄土高原直至内蒙高原)为单元,根据对陕北半湿润黄土丘陵区黄陵县双龙林场、陕北半干旱黄土丘陵区延安南泥湾林场、陕北半干旱风沙区靖边县万亩林场和内蒙半干旱低山丘陵区武川县东坡林场 4 个地区广泛分布的油松、落叶松、侧柏、刺槐、小叶杨、白桦等树种纯林土壤性质的测定结果,确定维持各个树种正常生长所能忍受的土壤某种性质最大和最小限值,通过公式(2)计算各个树种在整个陕蒙半湿润半干旱地区的抗极化域(见表 3 中的 W_i),从抗极化域的平均值来看,不同树种纯林抗物理性质极化能力大小顺序为:油松 > 小叶杨 > 落叶松、刺槐、白桦 > 侧柏;抗化学性质极化能力大小顺序为:小叶杨 > 油松、白桦 > 落叶松 > 刺槐、侧柏;抗生物学性质极化能力大小顺序为:小叶杨 > 白桦、油松 > 侧柏 > 落叶松、刺槐;抗微量元素极化能力大小顺序为:小叶杨 > 油松 > 白桦、侧柏、落叶松 > 刺槐。可见,小叶杨、油松的抗极化能力均较强,这也正是其在陕蒙半湿润半干旱地区分布最为广泛的原因。

此外,根据公式(3)和(5)计算各个树种在陕北半湿润黄土丘陵区(黄陵)的极抗比(表 3 中的 I_i)。

油松纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:微量元素(轻微极化 $I_a = 0.29$) > 生物学、物理性质(轻微极化 $I_a = 0.22 \sim 0.23$) > 化学性质(基本稳定 $I_a = 0.19$),说明油松纯林土壤的各种性质综合极抗比均较低,其中属严重极化的指标有团聚体和有效 Cu 含量。

落叶松纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:微量元素(严重极化 $I_a = 0.80$) > 物理、化学、生物学性质(严重极化 $I_a = 0.67 \sim 0.70$),说明落叶松纯林土壤的各种性质综合极抗比均较高。其中,属极严重极化的指标有孔隙度、毛管持水量、pH、全 N、碱解 N、速效 P、脲酶、磷酸酶、蛋白酶、全量 Cu、Zn、Fe、Mn、Ni、Cd、F 和有效态 Cu,属严重极化的指标有胡敏素、过氧化氢酶、过氧化物酶、有效态 Mn 含量。

侧柏纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:物理性质(中等极化 $I_a = 0.55$) > 微量元素、化学性质(中等极化 $I_a = 0.46 \sim 0.48$) > 生物学性质(轻微极化 $I_a = 0.38$),说明侧柏松纯林土壤的各种性质综合极抗比均不太高。其中,属极严重极化的指标有速效 K、CEC,属严重极化的指标有毛管持水量、团聚体、过氧化氢酶、全量 Zn、Ni、Cd、F。

刺槐纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:物理性质(极严重极化 $I_a = 1.00$) > 微量元素、化学性质(严重极化 $I_a = 0.72 \sim 0.75$) > 生物学性质(中等极化 $I_a = 0.60$),其中属极严重极化的指标有孔隙度、毛管持水量、水稳性团聚体、pH、有机 C、胡敏酸、富啡酸、全 N、速效 K、CEC、蔗糖酶、过氧化物酶、磷酸酶、全量 Cu、Zn、Fe、Mn 和有效态 Cu、Mn,属严重极化的指标有蛋白酶、有效态 Fe。

小叶杨纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:物理性质(严重极化 $I_a = 0.69$) > 生物化学性质(轻微极化 $I_a = 0.38 \sim 0.39$) > 微量元素(轻微极化 $I_a = 0.23$),其中属极严重极化的指标有孔隙度、毛管持水量,属严重极化的指标有 CEC、过氧化氢酶、过氧化物酶活性。

表 3 陕北半湿润黄土丘陵区不同树种纯林土壤的极抗比 (I_i)
Table 3 Ratio of soil polarization/anti-polarization of pure forests in semi-humid loess hilly region of North Shaanxi

土壤性质 Soil properties	代码 Code	油松 <i>P. tabulaeformis</i>		落叶松 <i>L. principis-rupprechtii</i>		侧柏 <i>P. orientalis</i>		刺槐 <i>R. pseudoacacia</i>		小叶杨 <i>P. simonii</i>		白桦 <i>B. platyphylla</i>	
		W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i
物理性质 Physics													
孔隙度 (%)	SP	0.34	-0.29	0.25	1.00	0.13	0.20	0.28	-1.00	0.43	-0.83	0.30	0.29
毛管持水量(g·kg ⁻¹)	CW	0.61	-0.26	0.45	1.00	0.34	-0.72	0.53	-1.00	0.88	-0.92	0.73	0.16
团聚体(g·kg ⁻¹)	AG	2.78	0.72	2.00	1.00	0.73	0.76	1.84	1.00	2.37	-0.08	1.77	1.00
水稳性团聚体(g·kg ⁻¹)	WAG	3.23	0.11	2.00	-0.08	0.75	0.72	1.90	1.00	2.55	-0.32	1.91	1.00
I_a		1.74	0.22	1.18	0.69	0.49	0.55	1.14	1.00	1.56	0.69	1.18	0.48
I_r			-0.15		0.64		0.07		-0.33		-0.69		0.48
化学性质 Chemistry													
pH	pH	0.18	0.19	0.19	1.00	0.04	-0.12	0.03	-0.87	0.23	0.56	0.19	1.00
有机C(g·kg ⁻¹)	OC	1.92	0.03	1.16	-0.52	0.57	0.44	0.95	1.00	2.60	-0.49	1.51	0.03
胡敏酸(g·kg ⁻¹)	HA	2.80	0.20	1.80	-0.50	0.94	0.21	1.06	1.00	3.41	-0.45	2.12	-1.00
富啡酸(g·kg ⁻¹)	FA	1.35	-0.16	0.97	-0.13	0.64	0.44	0.71	1.00	2.22	-0.53	1.55	-1.00
胡敏素(g·kg ⁻¹)	Hu	1.40	-0.15	1.01	-0.61	0.52	0.47	1.07	-0.10	2.49	-0.48	1.40	0.10
全N(g·kg ⁻¹)	TN	1.99	0.03	0.98	-1.00	0.64	0.31	0.88	1.00	2.46	-0.52	1.24	-1.00
碱解N(mg·kg ⁻¹)	AN	1.11	-0.43	0.70	-1.00	0.57	0.34	0.72	-0.12	2.37	-0.23	1.57	-1.00
速效P(mg·kg ⁻¹)	AP	1.37	-0.35	0.49	-1.00	1.11	0.02	1.05	-0.20	2.23	-0.20	0.81	-0.81
速效K(mg·kg ⁻¹)	AK	1.82	-0.03	0.23	-0.41	0.49	-0.81	0.73	1.00	1.51	-0.08	1.89	-1.00
CEC(me/100g)	CEC	0.99	0.28	1.39	0.28	1.01	-0.85	0.30	1.00	1.71	-0.73	1.09	-1.00
I_a		1.49	0.19	0.89	0.70	0.65	0.46	0.75	0.72	2.12	0.38	1.34	0.81
I_r			-0.47		-0.61		-0.09		0.61		-0.38		-0.80
生物学性质 Biology													
脲酶(mg·kg ⁻¹)	EU	1.08	-0.06	0.51	-1.00	0.83	0.01	0.32	0.54	1.20	-0.59	0.93	-1.00
蔗糖酶(mL·g ⁻¹)	ES	1.20	-0.40	0.65	0.37	0.87	0.29	0.57	1.00	0.37	-0.36	3.14	-1.00
过氧化氢酶(mL·g ⁻¹)	EC	0.12	0.25	0.03	-0.71	0.03	0.69	0.05	-0.31	0.21	0.68	0.24	0.78
过氧化物酶(mL·kg ⁻¹)	EPe	1.22	0.54	0.09	-0.72	0.80	0.18	0.67	1.00	1.13	0.65	0.35	0.10

续表

土壤性质 Soil properties	代码 Code	油松		落叶松		侧柏		刺槐		小叶杨		白桦	
		<i>P. tabulaeformis</i>		<i>L. principis-rupprechtii</i>		<i>P. orientalis</i>		<i>R. pseudoacacia</i>		<i>P. simonii</i>		<i>B. platyphylla</i>	
		W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i	W_i	I_i
脱氢酶($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	ED	0.91	0.17	1.19	-0.31	1.50	0.54	0.46	0.24	2.13	0.04	0.44	-0.05
磷酸酶($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	EPh	1.81	0.25	0.86	-1.00	0.66	0.52	0.72	1.00	2.92	-0.13	2.10	-1.00
蛋白酶($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	EPr	0.96	-0.18	0.04	1.00	0.48	-0.37	0.30	-0.68	1.41	-0.24	1.17	0.49
微生物量C($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	MC	1.87	0.03	1.11	-0.27	0.59	0.45	0.92	-0.05	2.39	-0.45	1.82	0.02
	I_a	1.15	0.23	0.56	0.67	0.72	0.38	0.50	0.60	1.47	0.39	1.27	0.55
	I_r		0.07		-0.33		0.29		0.34		-0.05		-0.21
微量元素 Trace elements													
全Cu($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TCu	1.46	0.34	0.98	1.00	0.45	0.17	1.07	1.00	0.91	-0.39	1.00	1.00
有效Cu($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ACu	1.26	-0.67	0.57	1.00	1.00	0.37	0.77	-1.00	2.38	-0.20	1.13	0.41
全Zn($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TZn	0.63	-0.38	0.28	1.00	0.42	0.68	0.76	1.00	0.80	-0.43	0.37	1.00
有效Zn($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AZn	2.75	-0.34	0.94	-0.10	1.81	0.31	1.38	-0.35	1.93	-0.19	1.36	-0.15
全Fe($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TFe	0.54	0.17	0.27	-1.00	0.20	-0.40	0.29	1.00	0.74	0.07	0.16	0.75
有效Fe($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AFe	2.59	-0.30	1.86	0.06	0.87	-0.38	0.35	-0.74	3.29	0.03	1.23	0.27
全Mn($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TMn	0.42	-0.15	0.11	1.00	0.19	-0.43	0.22	-1.00	0.82	-0.19	0.16	0.99
有效Mn($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	AMn	2.14	-0.04	0.34	0.69	2.04	0.35	0.85	-1.00	3.01	-0.41	0.88	-0.63
全Ni($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TNi	1.53	0.24	0.35	1.00	0.24	-0.79	0.21	-0.51	1.12	-0.13	0.60	1.00
全Cd($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TCd	1.32	-0.33	1.49	1.00	0.44	-0.76	0.72	-0.19	1.98	0.44	1.70	1.00
全F($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	TF	0.87	0.26	0.66	1.00	0.40	0.69	0.38	0.50	2.17	0.04	0.24	-0.56
	I_a	1.41	0.29	0.71	0.80	0.73	0.48	0.64	0.75	1.74	0.23	0.80	0.71
	I_r		-0.11		0.60		-0.02		-0.12		-0.12		0.46

表中 W_i 表示抗极化域; I_i 表示极抗比; I_a 和 I_r 分别为的绝对和相对综合极抗比。其他符号意义同表 2 W_i means width of anti-polarization; I_i means ratio of polarization/anti - polarization; I_a and I_r mean absolute and relative comprehensive ratio of I_i of physical (P), chemical (C) and biological (B) properties which are calculated except AG, pH, HA, FA and Hu. Other codes mean the same as table 2.

白桦纯林土壤的绝对综合极抗比大小顺序为:化学性质(极严重极化 $I_a = 0.81$) > 微量元素(严重极化 $I_a = 0.71$) > 物理、生物学性质(中等极化 $I_a = 0.48 \sim 0.55$),其中属极严重极化的指标有水稳性团聚体、pH、胡敏酸、富啡酸、全 N、碱解 N、速效 P、速效 K、CEC、脲酶、蔗糖酶、磷酸酶、全量 Cu、Zn、Mn、Ni、Cd,属严重极化的指标有过氧化氢酶、全量 Fe、有效 Mn。

至于华山松、辽东栎纯林由于在整个陕蒙半湿润半干旱地区只分布在最南端的陕北半湿润黄土丘陵区,所以不能确定其极抗比。

4 结论

4.1 从不同树种纯林土壤绝对综合极化度来看,与平衡态相比,几乎所有树种林地的土壤性质均发生了中度以上的极化,其中属于极强度极化(极化度 > 0.20)的性质分别为:落叶松和白桦林地的化学、生物学和微量元素性质;侧柏林地的化学和生物学性质;华山松和辽东栎林地的化学和微量元素性质;刺槐林地的生物学和微量元素性质;小叶杨林地的物理和化学性质。

4.2 总体而言,不同树种纯林土壤的极化趋势分别为:油松林地发生贫养化和微量元素亏损;落叶松林地发生微量元素富集但却贫养化;侧柏林地发生富 C、N 和生物学性质改善;华山松林地发生物理性质改善但却贫养化和生物学性质恶化;刺槐林地发生富养化、生物学性质改善但却微量元素亏损、物理性质恶化;小叶杨林地发生贫养化、微量元素亏损和物理、生物学性质恶化;白桦林地发生物理性质改善、微量元素富集但却贫养化;辽东栎林地发生微量元素富集。

4.3 不同树种纯林抗物理性质极化能力大小顺序为:油松 > 小叶杨 > 落叶松、刺槐、白桦 > 侧柏;抗化学性质极化能力大小顺序为:小叶杨 > 油松、白桦 > 落叶松 > 刺槐、侧柏;抗生物学性质极化能力大小顺序为:小叶杨 > 白桦、油松 > 侧柏 > 落叶松、刺槐;抗微量元素极化能力大小顺序为:小叶杨 > 油松 > 白桦、侧柏、落叶松 > 刺槐。相对林木抗极化能力,土壤的绝对综合极抗比属于中等以上(极抗比 > 0.40)的性质分别为:小叶杨林地的物理性质;侧柏林地的物理、化学和微量元素性质;落叶松、刺槐和白桦林地的所有性质。

References:

- [1] Cui G F. Depletion mechanism of forest plantation productivity and preventive strategy. *World Forestry Research*, 1996, 9 (5): 61—68.
- [2] Ma X Q, Huang B L. Advance in research on site productivity decline of timber plantations. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1997, 21 (2): 77—82.
- [3] Liu Z W, Duan E J, Fu G, *et al.* A new concept: soil polarization in artificial pure forest. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (6): 1119—1126.
- [4] Zhao Q G. Study on Control of Soil Degradation in China. Beijing: Chinese Scientific Press, 1990. 1—6.
- [5] Sun C Z, Shen G F. Study on the problems of forest plantation productivity of China (I)—to probe into the natural factors of influencing the plantation productivity. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37 (3): 72—77.
- [6] Sun C Z, Shen G F. Study on the problems of forest plantation productivity of (II)—to probe into the social and other non-nature factors debasing the plantation productivity. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37 (4): 26—34.
- [7] Abril A, Bartfeld P, Bucher E H. The effect of fire and overgrazing disturbs on soil carbon balance in the Dry Chaco forest. *Forest Ecology and Management*, 2005, 206 (1): 399—405.
- [8] Filser J, Koehler H, Ruf A, *et al.* Ecological theory meets soil ecotoxicology: Challenge and chance. *Basic and Applied Ecology*, 2008, 9 (4): 346—355.
- [9] Fang D Y. Ecological restoration of degraded forest of *Eucalyptus globules* in Western Guangdong. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2005, 17 (3): 22—25.
- [10] Hou Q C. Preliminary study on dry layer of soil of artificial forestland and grassland in Loess Plateau. *Soil and Water Conservation in China*, 1999, 5 (5): 11—13.
- [11] Jiao F, Wen Z M, Jiao J Y. Spatial growth differences of planted *Populus simonii* and their ecological effects on soil moisture in Hilly Loess Regions. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2005, 25 (7): 1 303—1 308.
- [12] Tang H S. Effect of soil acidification on Chinese pine growth. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2001, 7 (1): 21—23.
- [13] Wu Y, Yang J H, Wei Z F. Chongqing tea garden soil acidification and fertility characters. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35 (6): 715—719.
- [14] Pang X Y, Liu Q, Liu S Q. Changes of soil fertility quality properties under subalpine spruce plantation in Western Sichuan. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (2): 261—266.

- [15] Wu S G. Study on Reforestation of Chinese Pine Pure Forest in Western Area of Liaoning. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2005, 36(3): 320—323.
- [16] Lin S Z, Huang S G, Cao G Q. Autointoxication of Chinese fir. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(6): 661—664.
- [17] Ma X Q, Liu A Q, Huang B L. A study on self poisoning effects of Chinese fir plantation. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2000, 24(1): 12—16.
- [18] Xiao C Y, Ruan H H, Tu L B. Biological characteristics of different forest soils in Nanjing-Zhenjiang mountain area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9): 1 077—1 081.
- [19] An S S, Chang Q R, Li B C, *et al.* Benefits of different age forest vegetation on soil fertilization and amelioration. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(3): 22—27.
- [20] Lin D X, Han J F, Xiao Z Q, *et al.* *Mytilaria laosensis* improved on the soil physical & chemical properties. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2000, 20(1): 12—16.
- [21] Zhang B X, Meng P. Strategies to soil degradation and sustainable development of artificial forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in Liaoning Province. *Science & Technology of Protection Forest*, 2005(3): 86—89.
- [22] Jiao R Z, Yang C D, Sun Q W, *et al.* Changes in soil microbial amount and biomass during the development of Chinese fir plantation. *Scientina Silvae Sinicae*, 2005, 41(6): 163—165.
- [23] Yan D R. Study on soil fertility and content of microbes in larch plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 1996, 24(3): 46—50.
- [24] Yang M S, Xie H C. Effect of introduced larch forests on soil. *Journal of Northwest Forestry College*, 2002, 17(3): 35—37.
- [25] Yu C B, Chen F, Wang K Y. Advances in the study of fertilization on poplar plantation. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(3): 67—71.
- [26] Joshil M, Bargali K, Bargali S S. Changes in physio-chemical properties and metabolic activity of soil in poplar plantations replacing natural broad-leaved forests in Kumaun Himalaya. *Journal of Arid Environments*, 1997, 35(1): 161—169.
- [27] Fang D Y. Ecological restoration of degraded forest of *Eucalyptus globules* in Western Guangdong. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2005, 17(3): 22—25.

参考文献:

- [1] 崔国发. 人工林地力衰退机理及其防止对策. *世界林业研究*, 1996, 9(5): 61~68.
- [2] 马祥庆, 黄宝龙. 人工林地力衰退研究综述. *南京林业大学学报*, 1997, 21(2): 77~82.
- [3] 刘增文, 段而军, 付刚, 等. 一个新概念: 人工纯林土壤性质的极化. *土壤学报*, 2007, 44(6): 1119~1126.
- [4] 赵其国. *中国土地退化防治研究*. 北京: 中国科学技术出版社, 1990. 1~6.
- [5] 孙长忠, 沈国舫. 我国人工林生产力问题的研究(I)——影响我国人工林生产力的自然因素评价. *林业科学*, 2001, 37(3): 72~77.
- [6] 孙长忠, 沈国舫. 我国人工林生产力问题的研究(II)——影响我国人工林生产力的人为因素与社会因素探讨. *林业科学*, 2001, 37(4): 26~34.
- [9] 方代有. 论粤西退化桉树林地的水土保持生态修复. *亚热带水土保持*, 2005, 17(3): 22~25.
- [10] 侯庆春. 黄土高原人工林地和草地土壤干层初步研究. *中国水土保持*, 1999, 5(5): 11~13.
- [11] 焦峰, 温仲明, 焦菊英. 黄土丘陵区人工小叶杨生长空间差异及其土壤水分效应. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1 303~1 308.
- [12] 唐鸿寿. 土壤酸化对油松生长的影响. *应用与环境生物学报*, 2001, 7(1): 21~23.
- [13] 吴云, 杨剑虹, 魏朝富. 重庆茶园土壤酸化及肥力特征的研究. *土壤通报*, 2004, 35(6): 715~719.
- [14] 庞学勇, 刘庆, 刘世全. 川西亚高山云杉人工林土壤质量性状演变. *生态学报*, 2004, 24(2): 261~266.
- [15] 吴生广. 辽宁西部半干旱地区油松纯林改造的研究. *沈阳农业大学学报*, 2005, 36(3): 320~323.
- [16] 林思祖, 黄世国, 曹光球. 杉木自毒作用的研究. *应用生态学报*, 1999, 10(6): 661~664.
- [17] 马祥庆, 刘爱琴, 黄宝龙. 杉木人工林自毒作用研究. *南京林业大学学报*, 2000, 24(1): 12~16.
- [18] 肖慈英, 阮宏华, 屠六邦. 宁镇山区不同森林土壤生物学特性的研究. *应用生态学报*, 2002, 13(9): 1 077~1 081.
- [19] 安韶山, 常庆瑞, 李壁成, 等. 不同林龄植被培肥改良土壤效益研究. *水土保持通报*, 2001, 21(3): 22~27.
- [20] 林德喜, 韩金发, 肖正秋, 等. 米老排对土壤理化性质的改良. *福建林学院学报*, 2000, 20(1): 12~16.
- [21] 张柏习, 孟鹏. 辽宁省沙地樟子松人工纯林地力衰退与持续发展的对策. *防护林科技*, 2005(3): 86~89.
- [22] 焦如珍, 杨承栋, 孙启武, 等. 杉木人工林不同发育阶段土壤微生物数量及其生物量的变化. *林业科学*, 2005, 41(6): 163~165.
- [23] 阎德仁. 落叶松人工林土壤肥力与微生物含量的研究. *东北林业大学学报*, 1996, 24(3): 46~50.
- [24] 杨茂生, 谢会成. 引种的华北落叶松人工林对土壤影响的研究. *西北林学院学报*, 2002, 17(3): 35~37.
- [25] 余常兵, 陈防, 万开元. 小叶杨人工林营养及施肥研究进展. *西北林学院学报*, 2004, 19(3): 67~71.
- [27] 方代有. 论粤西退化桉树林地的水土保持生态修复. *亚热带水土保持*, 2005, 17(3): 22~25.