

杨树人工林品种更替连作与非更替连作根际效应的比较

王延平¹, 王华田^{1,*}, 谭秀梅¹, 姜岳忠², 孔令刚³

(1. 山东农业大学农业生态与环境实验室, 山东农业大学林学院, 山东泰安 271018

2. 山东省林业科学研究院, 山东济南 250014; 3. 山东省莱芜市林业局, 山东莱芜 271100)

摘要: 采用空间位移法对杨树人工林更替连作和非更替连作两种经营模式下土壤养分、土壤酶活性和土壤微生物的根际效应进行了比较研究, 以期探明不同连作经营模式对杨树人工林土壤生态环境的影响, 探讨品种更替对杨树人工林地力维持的生态效果。研究表明, 更替连作和非更替连作均导致杨树人工林土壤发生不同程度的衰退, 非更替连作导致的林地土壤衰退现象更为严重。杨树根际和非根际土壤养分在非更替连作中下降最为显著, 土壤有机质的根际效应显著大于更替连作, 而土壤速效 N、P、K 的根际效应在更替连作中显著增大。非更替连作导致根际和非根际土壤中过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性发生较大幅度的下降, 而多酚氧化酶和过氧化物酶活性较大幅度的上升; 更替连作也导致土壤酶活性有类似的变化趋势, 但下降(上升)幅度远小于非更替连作, 土壤酶活性的根际效应总体呈现非更替连作变化幅度强于品种更替连作的趋势。两种连作模式下土壤中可培养土壤微生物的数量变化大致呈现一致趋势, 连作将导致根际和非根际土壤微生物数量整体下降, 其中土壤细菌比例有所降低, 真菌比例上升, 土壤呈现从细菌型向真菌型转化的特点, 非更替连作对土壤微生物的根际效应明显大于更替连作。更替连作和非更替连作根际效应的差异可能由不同杨树品种根系分泌物的差异所导致。

关键词: 连作模式; 杨树人工林; 根际效应; 根系分泌物

Comparison on rhizosphere effect of cultivar alternation and non-alternation continuous cropping poplar (*Populus deltoids*) plantation

WANG Yanping¹, WANG Huatian^{1,*}, TAN Xiumei¹, JIANG Yuezhong², KONG Linggang³

1 Agro-Ecoenvironmental Laboratory of Shandong Agricultural University, Forest College of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China

2 Shandong Academy of Forestry, Jinan, Shandong 250014, China

3 Forest Bureau of Laiwu, Laiwu, Shandong 271100, China

Abstract: Rhizosphere is the important interface between plant roots and the soil environment. To detect the effects of cultivar alternation and continuous cropping on soil fertility maintenance and the soil environment of poplar (*Populus deltoids*) plantation, we compared soil nutrient, enzyme activity and microbe abundance of the rhizosphere and bulk soils from the poplar plantations under cultivar alternation continuous cropping (ACC) and non-alternation continuous cropping (NACC). The results showed that both ACC and NACC led to soil degradation, but the extent of NACC was higher than ACC. The nutrients in rhizosphere and bulk soils of NACC decreased significantly more than ACC. Rhizosphere effects of soil organic matter in NACC was significantly larger than ACC. In contrast, the rhizosphere effects of soil available N, P and K were significantly lower in NACC than ACC. As for the soil enzyme activity, NACC led to a significant decline in catalase, urease and alkaline phosphatase activity while an increase in polyphenol oxidase and peroxidase activity in rhizosphere and bulk soils. The same pattern occurred in ACC, but the amplitude of decline or increase was much smaller.

基金项目: 教育部博士点科研基金资助项目(2006434010); 中国公益性行业科研专项资助项目(200704032); 山东省自然科学基金资助项目(Y2007D30, Q2008D06)

收稿日期: 2008-11-17; **修订日期:** 2009-12-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanght@sdau.edu.cn

In addition, the rhizosphere effects of soil enzyme activity in NACC demonstrated the same pattern as that of ACC, but with a larger range of variation. For soil microbe abundance, the same patterns occurred in ACC and NACC. Both of the two continuous cropping models led to decrease of soil microbe abundance in rhizosphere and bulk soils. The percentage abundance of soil bacteria was decreased while that of fungi was increased indicating a transition from the bacterial functioning soil to the fungi functioning soil. The rhizosphere effects of soil microbes in NACC were significantly higher than ACC, which could be attributed to the difference of root exudates. We concluded that continuous cropping of poplar plantations would lead to soil degradation, possibly be mitigated by cultivar alternation, which should be considered in future managements.

Key Words: continuous cropping model; poplar planation; rhizosphere effect; root exudate

根际环境是在根系的吸收和分泌两个动态过程作用下形成的在物理、化学和生物学性质方面不同于原土体的、复杂的微生态系统^[1],其范围一般是离根表数毫米到 1—2 cm。根际是一个重要的环境界面,其不仅是植物与环境之间物质能量交换的场所,同时也是有益或有害微生物、有机或无机污染物进入植物体的门户,是土壤圈物质循环的重要环节^[2]。长期以来,根际环境一直是植物营养学、生态学、土壤学、微生物学学者研究和关注的热点,丰富的研究成果为人们认识植物根系生理活动与土壤物理环境和土壤生物环境之间的互作关系提供了科学依据。目前根系分泌物对根际养分的转化和土壤微生物区系的影响(根际效应)已得到广大学者的普遍认可^[3-5]。此外,根际效应发生的微生态机制也备受关注,近年来“根际对话”概念的提出更是把这一领域的研究推向了一个新的高度^[6]。根际效应研究不但有助于人们认识植物根-土环境界面的性质及其在此界面上发生的生态学过程,在土壤的改良实践中也具有重大的理论价值^[7-9]。

在连作人工林地力衰退研究中,根际效应研究也很活跃,研究内容涉及土壤养分、土壤酶、土壤微生物等众多方面^[10-13]。随着林木化感效应的逐步揭示,林木根系分泌物的化感效应在连作人工林地力衰退机理研究中受到广泛重视^[14]。针对杨树(*Populus deltoids*)人工林的地力衰退问题^[15-16],王华田等人曾先后从土壤微生态环境变化^[17]、化感物质累积规律^[18]等方面对其衰退机理进行过报道。但由于杨树品种繁多,在人工林培育实践中杨树品种更替较为迅速,致使其人工林在经营模式上与其他树种相比有其自身的特点,即——更替连作(更替杨树品种)和非更替连作(单一杨树品种连作)两种经营模式同时存在。长期以来,单一品种连作引发杨树人工林地力衰退得到普遍认可,但更替品种对杨树人工林地力的影响仍缺乏必要研究和认识。尽管已有的研究表明更替品种后杨树人工林林地土壤养分、土壤酶活性和土壤微生物数量显著增加,被认为是杨树人工林林地生产力维持的重要措施之一^[19-20]。但针对定量表征杨树根-土界面生态过程的根际效应问题尚未有人研究,而这一问题对正确评价更替品种后杨树连作人工林地力的维持效应具有重要意义。基于此,本文针对杨树人工林在上述两种不同连作经营模式下的根际效应进行了比较研究,以探讨连作杨树人工林土壤生态特点,阐明杨树品种更替连作对土壤根际环境的影响,为杨树人工林的可持续经营提供理论依据。

1 试验设计及研究方法

1.1 试验设计及土壤采集

本研究试验地设在山东省菏泽市单县大沙河林场,东经 116°04'(E),北纬 34°26'(N),所研究杨树人工林位于黄河冲积平原,土壤为轻壤质黄潮土,肥力较差。

采用空间位移法,在立地条件相似、空间连片的区域,选择林地抚育和管理措施相同的杨树一代(I)、二代(II)、更替二代(III)和更替三代林(IV),林龄均为 4a,当前杨树品种均为黑杨派 I-69 杨(*Populus deltoids* “I-69/55”),株行距均为 4 m × 5 m。其中,林地 II 第一代林为 I-69 杨,当前林地无间作,不浇水,不施肥;林地 III 第一代是黑杨派 I-214 杨(*Populus euramericana* I-214),当前林地无间作,不浇水不施肥;林地 IV 第一代是加杨(*Populus Canadensis*),第二代是 I-214 杨,曾间作花生和红薯,当前林地无间作作物,不浇水,不施肥。于 2007 年 7 月,在上述每种类型林分内布设 3 个 20 m × 30 m 标准地,在每一标准地内进行每木检尺,测量标准

地内杨树的树高、冠幅、胸径等指标。另外,在每一标准地内选取 6 株平均木,距树干基部 0.5 m 呈梅花形分布挖取根系周围 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 土样,分层充分混合后作为非根际土壤样品。同时采集各层直径小于 0.2—0.5 cm 细根上粘附的土壤,充分混合作为根际土壤。每个林地采集土壤样品 3 份,共计采集 12 份土样,后进行室内分析。不同类型林地基本情况见表 1。

表 1 不同连作模式杨树人工林分生长和土壤状况

Table 1 Forest growth and land soil condition of different continuous cropping poplar plantations

指标 Indices		非更替连作 Non alternation continuous cropping		更替连作 Alternation continuous cropping	
		I	II	III	IV
林分生长状况	胸径/cm	15.6a	13.7b	15.1a	14.5ab
Forest growth	树高/m	13.7a	11.7c	12.9ab	12.3b
林地土壤状况	土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.46a	1.49a	1.48a	1.50a
Land soil	总孔隙度/%	48.20a	46.55b	48.19a	46.29b
	pH(H ₂ O)	8.64a	8.08a	8.24a	8.13a

注:表中数据为多样地的平均值,每组同行字母不相同表示经 LSD 多重比较后差异显著($P < 0.05$)

1.2 研究方法

1.2.1 土壤样品的处理

鲜土样装入消毒密封塑料袋,带入实验室,供微生物分析。用于土壤酶活性测定的土壤经风干后,过 20 目筛(孔径 1 mm)。

1.2.2 土壤样品测定方法

土壤有机质采用重铬酸钾容量法,速效钾采用醋酸铵浸提火焰光度法,速效磷采用碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法,水解氮采用碱解扩散法,具体方法参照文献^[21]。

土壤脲酶活性采用比色法测定,以 24h 后 1g 土壤产生的 NH₃-N 的毫克数表示(mg·(g·24h)⁻¹);多酚氧化酶、过氧化物酶活性采用邻苯三酚比色法,以 2h 后 1g 土壤中含紫色没食子素的毫克数表示(mg·(g·2h)⁻¹);过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法,以 20 min 内滴定 1g 土壤需要的 0.1mol·L⁻¹ KMnO₄ 的毫升数表示(ml·(g·20min)⁻¹),碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,活性以 24h 后 100 g 土壤产生的 P₂O₅ 的毫克数表示(mg·(100 g·24h)⁻¹),具体描述见参考文献^[22]。

土壤中各微生物类群的培养采用如下方法,真菌采用 PDA 培养基,放线菌采用改良高氏 1 号培养基,氮化细菌采用牛肉汁蛋白胨琼脂培养基,亚硝酸细菌采用稀释法,好气性固氮菌采用改良克斯曼培养基,好气性纤维素分解菌采用郝奇式逊培养基,菌落计数参照许光辉的方法^[23]。

1.2.3 数据处理与统计

土壤根际效应值用 R/S 表示,R 为根际土指标,S 为非根际土指标,R/S > 1 为正效应,R/S < 1 为负效应。数据统计及分析在 SPSS 和 Ms Excel 中完成。

2 结果与分析

2.1 不同连作经营模式下杨树人工林土壤养分的变化及其根际效应

从图 1 可以看出,不同林地根际土壤有机质、速效 N、P、K 等养分含量多大于非根际土壤,这说明杨树根际土壤养分状况较非根际土壤发生明显变化。为清晰表明连作对林地土壤养分的影响,将林地 II、III、IV 土壤养分数据与一代林(I)养分数据进行比较,发现林地 I 土壤养分含量最高,更替连作和非更替连作均降低了土壤养分含量,但下降幅度不一。非更替连作导致的林地 II 土壤养分下降显著($P < 0.05$),这与连作二代杉木林、马尾松林和柳杉林具有相同的规律^[11,12,24]。在此连作模式下杨树根际土壤有机质含量下降 41.14%,速效磷下降 40.95%,速效钾下降 35.82%,速效氮下降 25.58%;非根际土壤养分也发生大幅度下降,其中土壤速效氮下降幅度最大(55.74%),其次是土壤有机质(43.23%)。而实施更替连作方式,土壤养分下降幅度

相对较小,如林地Ⅲ根际土壤有机质仅下降 11.94%,而速效氮则基本不变;非根际土壤养分下降幅度也远小于单一品种连作。但如果再实施连作经营(林地Ⅳ),土壤养分将继续减少,其中以速效磷下降最为剧烈,可达 37.17% (R)、30.10% (S)。

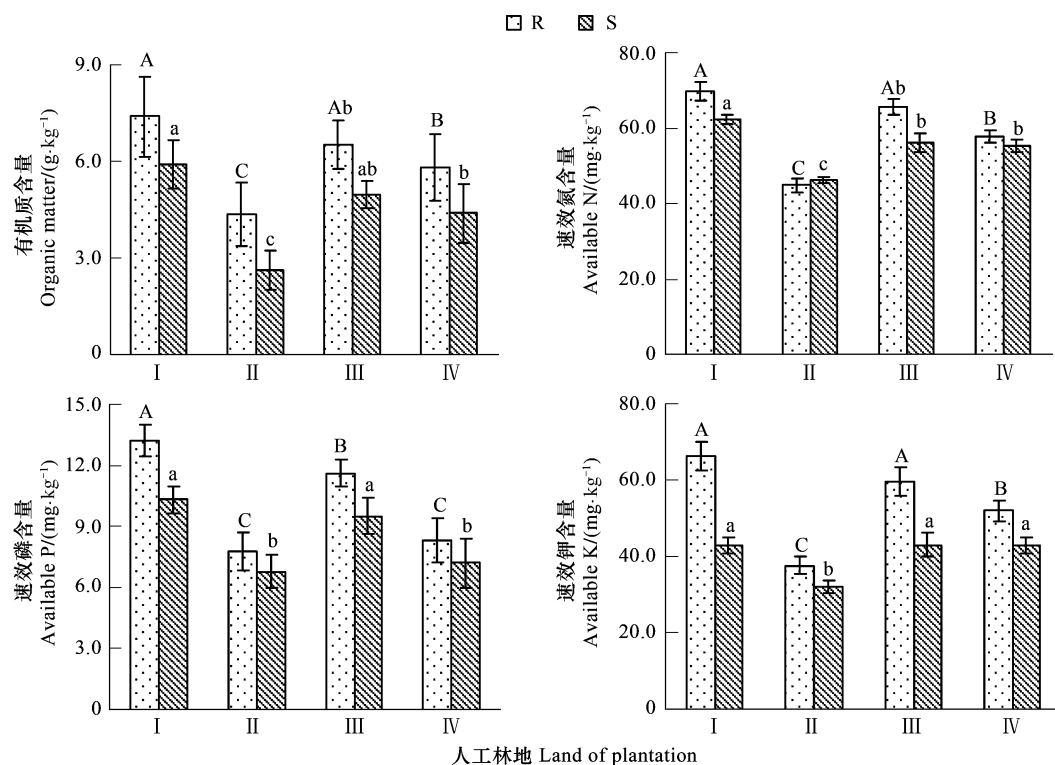


图1 不同连作经营模式下杨树根际和非根际土壤养分的比较(平均值 ± 标准误)

Fig.1 Soil nutrients in rhizosphere and bulk soils from four types of continuous cropping plantations (mean ± SE)

注:R 为根际土,S 为非根际土,误差线上方的不同字母表示经 LSD 多重比较后差异显著 ($P < 0.05$); 横坐标中 I、II、III、IV 为杨树连作人工林林地代码;下同

从图 2 可以看出,不同连作模式下林地土壤养分根际效应 R/S 值均大于 1 (林地 II 土壤速效钾除外),杨树根系对土壤养分具有正根际效应。其中土壤有机质和速效氮的根际效应值大于速效磷和速效钾,这说明杨树根系对土壤 N 素的转化具有强烈的正效应。在不同连作经营模式下,林地 II 土壤有机质的根际效应显著大于林地 III、IV,但速效 N、P、K 的根际效应值显著小于林地 III 且与林地 IV 差异不显著 ($P < 0.05$)。此外,对于土壤中的 N、P、K 等速效养分而言,林地 II 根际效应值较林地 I 显著下降,而林地 III 下降幅度较小,林地 IV 根际效应值则与 II 林地差异不显著,这说明单一品种连作不利于土壤速效养分的活化,最终可能导致根系对速效养分的吸收能力下降,而实施品种更替连作会在一定程度上减缓此过程,但并不能改变这一趋势。

2.2 不同连作经营模式下杨树人工林土壤酶活性的变化及其根际效应

从图 3 可以看出,两种连作经营模式下,杨树人工林根际土壤酶活性均大于非根际土壤,这依赖于杨树根

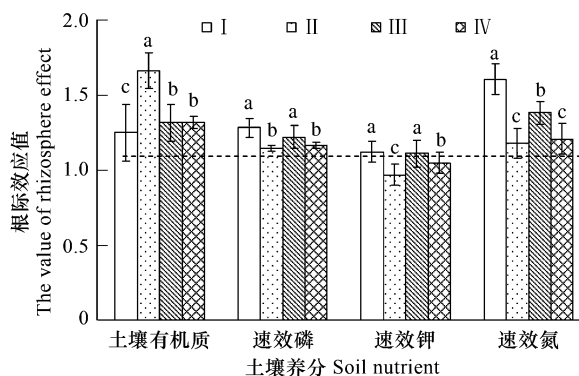


图2 不同连作经营模式下土壤养分根际效应的比较(平均值 ± 标准误)

Fig.2 Rhizosphere effects of soil nutrient from four types of continuous cropping plantations (mean ± SE)

系和根际微生物的生理活动。此外,林地Ⅱ较林地Ⅰ根际和非根际土壤中过氧化氢酶、脲酶、碱性磷酸酶活性发生显著下降,而多酚氧化酶和过氧化物酶活性发生显著升高($P < 0.05$)。品种更替连作根际和非根际土壤酶活性的变化较为复杂,但总体上仍呈现相似趋势。将林地Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ与林地Ⅰ根际和非根际土壤酶活性各土壤酶活性数据进行比较,发现单一品种连作将导致根际土壤和非根际土壤中的过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性发生较大幅度的下降。其中,过氧化氢酶活性下降幅度为 35.90% (R)、19.22% (S),脲酶活性下降 29.29% (R)、23.47% (S),碱性磷酸酶活性下降 28.11% (R)、26.36% (S)。同时,单一品种连作可导致多酚氧化酶和过氧化物酶活性较大幅度的上升,幅度分别为 36.74% (R)、10.58% (S) 和 40.55% (R)、16.21% (S)。实施更替连作也导致土壤过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性的下降和多酚氧化酶、过氧化物酶活性的上升,但下降(上升)幅度远小于非更替连作;如果再次实施更替连作,土壤酶活性上升或下降的幅度进一步增大,如林地Ⅲ脲酶活性较林地Ⅰ下降 8.31% (R)、2.22% (S),林地Ⅳ则下降了 13.67% (R)、7.94% (S);林地Ⅲ过氧化物酶活性较林地Ⅰ升高了 20.29% (R)、2.73% (S),林地Ⅳ则升高了 38.39% (R)、14.81% (S)。

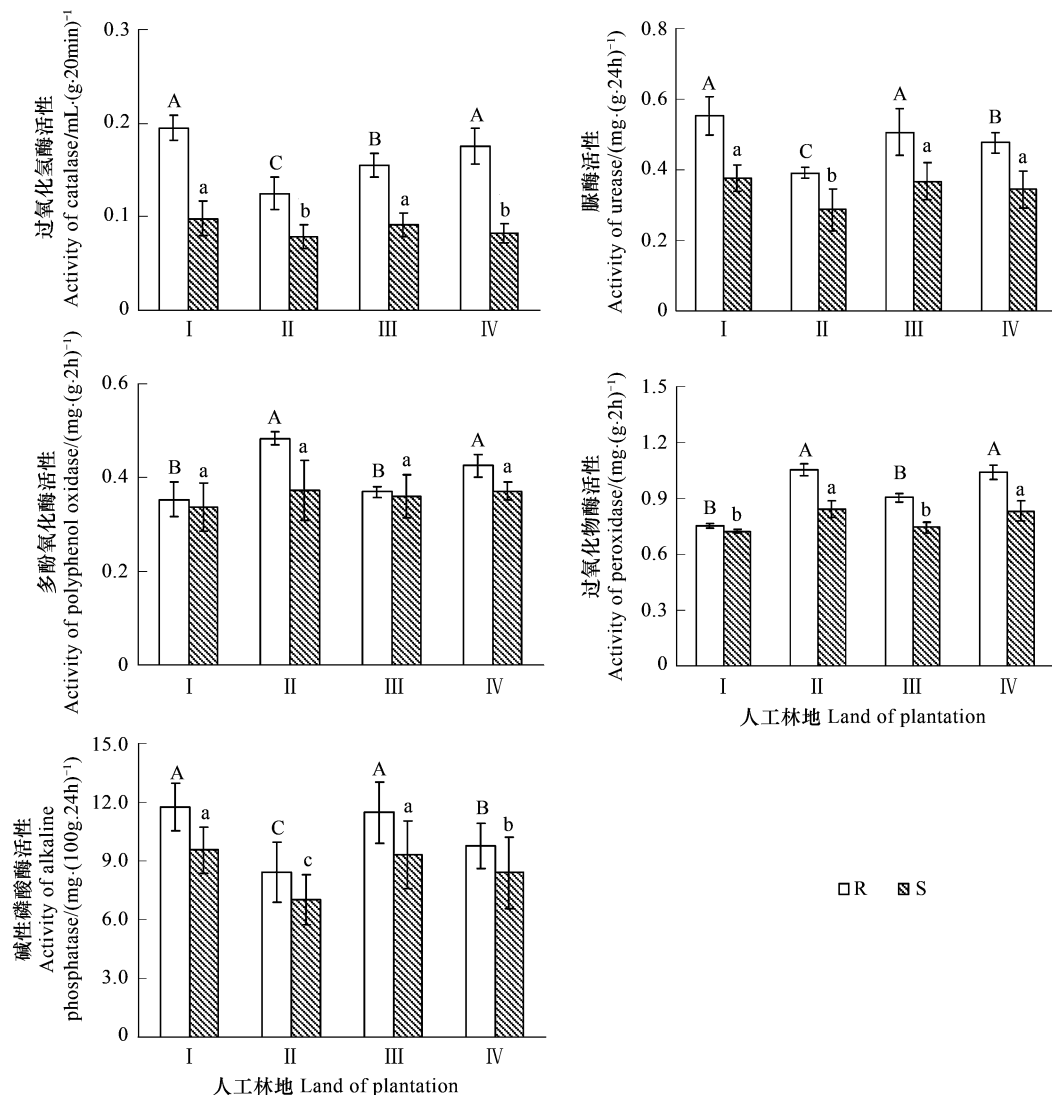


图3 不同连作经营模式下杨树根际和非根际土壤酶活性的比较(平均值 ± 标准误)

Fig.3 Soil enzyme activity in rhizosphere and bulk soils from four types of continuous cropping plantations (mean ± SE)

从图4中可以看出,试验中所测几种土壤酶活性的根际效应值均大于1,说明在杨树根际存在土壤酶活性升高的现象。除林地Ⅰ和林地Ⅲ多酚氧化酶根际效应较小(R/S值分别为1.048和1.026)外,其余林地土

壤酶活性的根际效应均显著大于 1。林地 II 和林地 I 相比较,即实施单一品种非更替连作经营,过氧化氢酶的根际效应发生显著下降(I 为 1.983, II 为 1.579);脲酶和磷酸酶的根际效应值也存在一定程度的下降但未达到显著水平;多酚氧化酶和过氧化物酶的根际效应值均显著升高($P < 0.05$)。林地 III、IV 与林地 I 相比较,即实施不同品种更替连作经营时,林地 III 过氧化氢酶的根际效应值下降幅度较大且达到显著水平,脲酶和磷酸酶的根际效应值存在一定程度的下降,但未达到显著水平;林地 IV 土壤脲酶和磷酸酶根际效应值也稍有下降。此外,林地 III 过氧化氢酶的根际效应值为 1.691 (小于林地 I),但林地 IV 提高至 2.126 (大于林地 I),多酚氧化酶的根际效应也有类似的变化规律。针对杨树人工

林的两种连作经营模式,除了脲酶和碱性磷酸酶根际效应值变化幅度较小外,过氧化氢酶、多酚氧化酶和过氧化物酶的根际效应值均较一代林发生了显著变化,总体呈现单一品种连作变化幅度强于品种更替连作的趋势。土壤酶根际效应值的升高或下降依赖于根际和非根际土壤酶的活性变化,在一定程度上可以指示土壤酶活性在根际微域中的动态规律,根际效应值越大说明根际环境越有利于酶活性的发挥,反之则对酶活性有抑制作用。

2.3 不同连作经营模式下杨树人工林土壤微生物群落的数量变化及其根际效应

从图 5 中可以看出,不同林地根际土壤中可培养微生物数量高于非根际土壤,这表明根际环境有利于大多数土壤微生物的生存与繁殖,但不同连作经营模式下土壤微生物的数量变化规律不尽一致。根际土壤中放线菌、纤维素分解菌、好气性固氮菌和氨化细菌数量随连作而发生显著降低,而真菌和亚硝酸细菌数量则显著增加($P < 0.05$)。单一品种连作使根际土壤中微生物总数量显著降低,林地 I 高达 18.7×10^8 个,而林地 II 中微生物总量为 9.30×10^8 个,其中放线菌、真菌、纤维素分解菌、氨化细菌数量所占比例在林地 II 中分别都有显著提高,而好气性固氮菌则呈现显著下降(表 2)。更替连作使根际土壤微生物总量下降也较为剧烈,林地 III 土壤微生物总量为 7.67×10^8 个,而林地 IV 仅有 3.78×10^8 个,其中放线菌、真菌、纤维素分解菌数量比例呈现显著增加,氨化细菌比例显著下降,好气性固氮菌数量比例变化不显著(表 2)。

非根际土壤中微生物的变化与根际土壤有一定差异,非根际土壤中放线菌、好气性固氮菌、氨化细菌数量随连作显著降低,此外真菌数量也发生了显著下降,而亚硝酸细菌则仍然呈现显著增加,纤维素分解菌变化则并不显著($P < 0.05$)。单一品种连作也使非根际土壤微生物总量下降,但下降幅度较根际土壤小,林地 I 非根际微生物总量为 4.08×10^8 个,林地 II 为 3.48×10^8 ,其中除放线菌数量比例显著增加外,真菌、纤维素分解菌、好气性固氮菌的比例均有显著减小。品种更替连作也是非根际土壤中微生物总量下降,其幅度较单一品种连作稍大(林地 III 为 4.04×10^8 个,林地 IV 为 2.57×10^8 个),其中,除好气性固氮菌比例有显著下降外,其余各类菌的比例都有显著升高(表 2)。

植物根系对土壤微生物的影响,主要是通过根分泌物等生理活动产生作用,这种影响可以用土壤微生物的根际效应加以体现。从表 5 可以看出,不同连作林地土壤放线菌、真菌、纤维素分解菌和好气性固氮菌的根际效应值均大于 1,说明这些微生物在根际土壤中的数量高于非根际土壤;而亚硝酸细菌在不同连作林地的根际效应值均小于 1,说明根际土壤亚硝酸细菌数量小于非根际土壤。不同连作模式下各类微生物的根际效应值变化规律不尽相同,非更替连作使放线菌和真菌的根际效应值显著升高(林地 I 为 1.17 和 1.14,而在林地 II 中为 1.71 和 1.92),但各细菌类群的根际效应值显著下降(表 3)。更替连作经营模式下杨树人工林土壤微生物的根际效应值具有相似的变化趋势。这进一步说明了连作使土壤由细菌型向真菌型转化的特点。

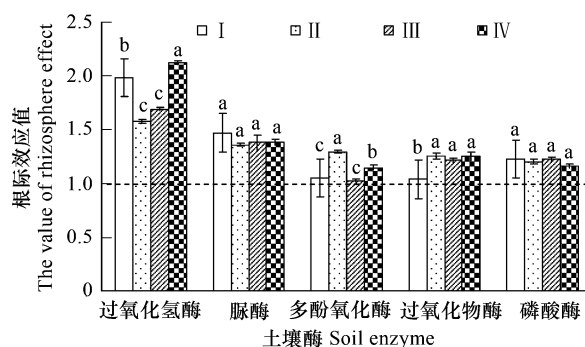
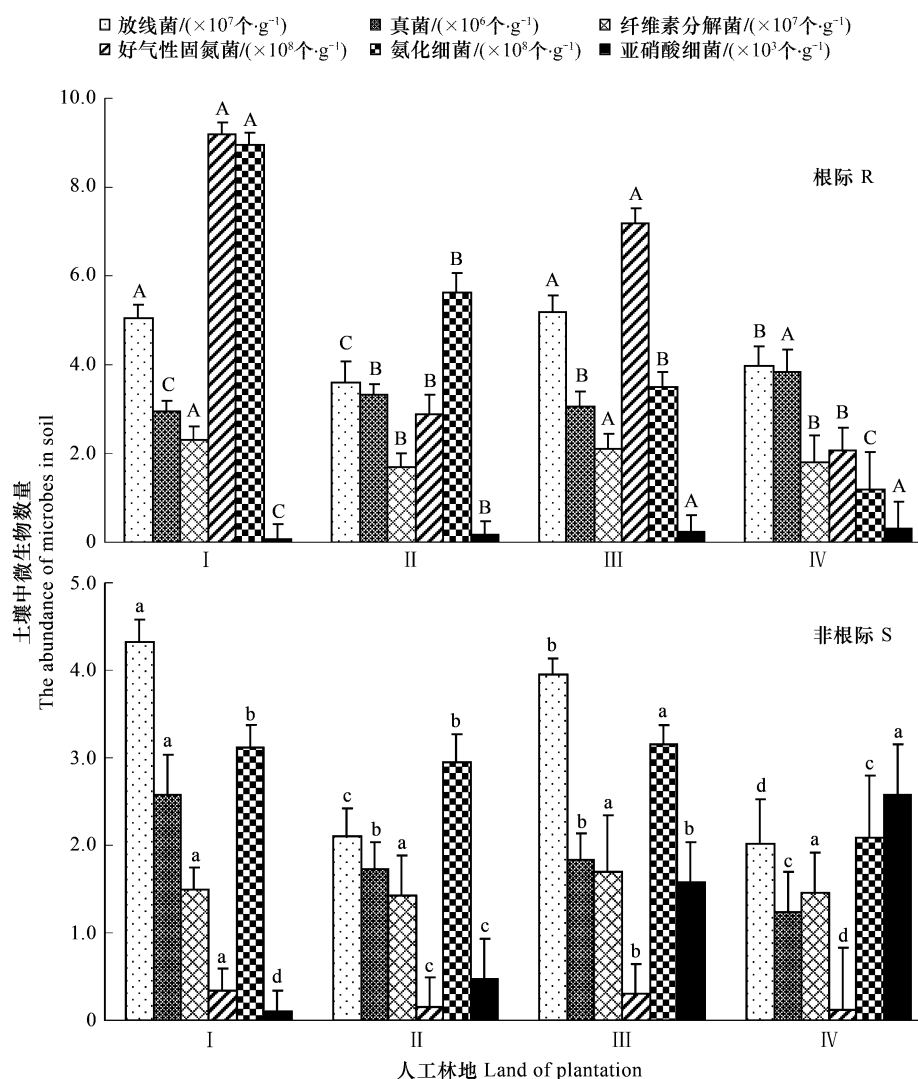


图 4 不同连作经营模式下土壤酶活性根际效应的比较(平均值 $\pm$ 标准误)

Fig. 4 Rhizosphere effects of soil enzyme activity from four types of continuous cropping plantations (mean $\pm$ SE)

图5 不同连作经营模式下根际和非根际土壤微生物数量的变化规律(平均值 $\pm$ 标准误)Fig. 5 Abundance dynamics of microbes in rhizosphere and bulk soils from four types of continuous cropping plantations (mean $\pm$ SE)表2 不同连作经营模式下根际和非根际土壤微生物类群的数量比例(平均值 $\pm$ 标准误)Table 2 Percentage abundance of five kinds of microbes in rhizosphere and bulk soils from the four types of continuous cropping plantations (mean $\pm$ SE)

土壤微生物类群 Group of soil microbes		微生物数量比例/% Ratio of microbes			
		非更替连作 Non alter-continuous cropping		更替连作 Alter-continuous cropping	
		I	II	III	IV
放线菌	R	1.00 $\pm$ 0.07C	4.14 $\pm$ 0.21B	1.19 $\pm$ 0.11C	7.61 $\pm$ 0.26A
Actino-mycetes	S	2.66 $\pm$ 0.15b	14.45 $\pm$ 0.54a	0.58 $\pm$ 0.05d	1.82 $\pm$ 0.09c
真菌	R	0.16 $\pm$ 0.02C	0.36 $\pm$ 0.04B	0.40 $\pm$ 0.04B	1.50 $\pm$ 0.07A
Fungi	S	1.01 $\pm$ 0.06a	0.45 $\pm$ 0.07b	0.04 $\pm$ 0.01c	0.54 $\pm$ 0.09b
纤维素分解菌	R	1.74 $\pm$ 0.23B	4.18 $\pm$ 0.35A	2.09 $\pm$ 0.17B	4.75 $\pm$ 0.52A
Cel-decomposing bacteria	S	9.72 $\pm$ 0.87a	3.32 $\pm$ 0.62c	0.82 $\pm$ 0.09d	6.36 $\pm$ 0.77b
好气性固氮菌	R	49.22 $\pm$ 3.25A	30.93 $\pm$ 2.18B	50.81 $\pm$ 3.11A	54.53 $\pm$ 3.59A
Nitrogen fixing bacteria	S	13.52 $\pm$ 1.02b	4.14 $\pm$ 0.55c	80.88 $\pm$ 5.72a	0.45 $\pm$ 0.04d
氨化细菌	R	47.88 $\pm$ 5.34B	60.39 $\pm$ 4.22A	45.51 $\pm$ 3.67B	31.60 $\pm$ 2.81C
Ammon-ificator	S	73.09 $\pm$ 7.23b	77.64 $\pm$ 6.62b	17.67 $\pm$ 1.56c	90.83 $\pm$ 4.78a

注:亚硝酸细菌在微生物总量中所占比例极小,故省略

但是,不同连作经营模式下各微生物类群根际效应值上升(或下降)的幅度不同,如对真菌而言,林地 I 根际效应值为 1.14,林地 II 根际效应达 1.92,而更替连作二代则为 1.66,至更替连作三代根际效应值高达 3.1。放线菌在更替连作二代林地根际效应值均小于非更替二代林,而对细菌各类群则正好相反。这从侧面反映出非更替连作对根际土壤微生物的根际效应明显大于更替连作。

表 3 不同连作经营模式下土壤微生物的根际效应值(平均值 $\pm$ 标准误)

Table 3 Rhizosphere effect value of soil microbes from the four types of continuous cropping plantations (mean $\pm$ SE)

土壤微生物 Soil microbes	非更替连作 Non Alter-continuous cropping		更替连作 Alter-continuous cropping	
	I	II	III	IV
放线菌 Actino-mycetes	1.17 $\pm$ 0.03c	1.71 $\pm$ 0.07a	1.32 $\pm$ 0.05b	1.97 $\pm$ 0.07a
真菌 Fungi	1.14 $\pm$ 0.04c	1.92 $\pm$ 0.05b	1.66 $\pm$ 0.05b	3.10 $\pm$ 0.14a
纤维素分解菌 Cel-decomposing bacteria	1.53 $\pm$ 0.11a	1.19 $\pm$ 0.15b	1.24 $\pm$ 0.21b	1.23 $\pm$ 0.17b
好气性固氮菌 Nitrogen fixing bacteria	26.58 $\pm$ 2.34a	18.24 $\pm$ 2.16c	23.90 $\pm$ 2.21b	17.15 $\pm$ 1.87c
氨化细菌 Ammon-ificator	2.86 $\pm$ 0.17a	1.90 $\pm$ 0.09b	1.11 $\pm$ 0.04c	0.57 $\pm$ 0.02d
亚硝酸细菌 Nitrosotyng bacteria	0.71 $\pm$ 0.08a	0.33 $\pm$ 0.05b	0.16 $\pm$ 0.04c	0.12 $\pm$ 0.04c

3 讨论

3.1 不同连作模式均将导致杨树人工林地力衰退,但衰退程度不同。地力衰退的表象是林地生产力的持续下降,实质是土壤环境的退化。就杨树人工林培育而言,单一品种连作导致的林地土壤养分下降最为显著,而更替品种连作土壤养分下降幅度相对较小,此结论支持连作导致人工林土壤养分亏缺的观点。此外,单一品种连作导致根际和非根际土壤中的过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性发生较大幅度的下降,而多酚氧化酶和过氧化物酶活性较大幅度的上升。更替连作也将导致土壤酶活性类似的变化趋势,但下降(上升)幅度远小于非更替连作模式。非更替连作和更替连作经营下杨树人工林土壤微生物的数量变化均表明连作将导致土壤微生物数量整体下降,其中有益的土壤细菌比例降低,而有害的真菌比例将有所上升,土壤呈现从细菌型向真菌型转化的特点,这一论点与前人的研究结果是一致的^[13, 25-28]。由于近年来我国杨树育种工作成绩斐然,有大量优良品种(或无性系)储备,实行不同品种逐代或隔代更替连作条件已经具备。更替连作可视为同一树种内不同品种(或无性系)之间的轮作。不同品种由于遗传特性的差异,在养分吸收利用以及对林地土壤养分种类和水平、土壤酶活性、土壤微生物的群落结构和数量等方面,存在着一定的弥补和协调作用。因此,通过更换杨树品种在一定程度上缓解了长期连作对林地养分、微生物和土壤酶的剧烈影响,减缓了地力衰退的进程。但这种同一树种内不同品种之间的细微影响,不会从根本上解决人工林长期连作所面临的地力衰退问题。同一树种实行长期连作,无论哪种连作模式,最终必然导致林地土壤生态环境的退化。

3.2 更替连作和非更替连作根际效应的差异可能是由于不同品种根系分泌物的差异导致。研究表明,根系分泌物对植物根际土壤环境的影响是巨大的。在根系分泌物中存在大量具有化感活性的物质,这些物质对土壤微生物和土壤酶活性产生了深刻影响^[29],从而进一步影响到土壤养分循环。Darrah 等用数学模型模拟了根系分泌物与根际微生物群落的关系,发现根际微生物数量的水平分布与根际可溶性碳的分布距离有关,微生物数量的积累有赖于根分泌物的释放^[30]。Sood 研究发现,根系分泌物中大量存在的柠檬酸和苹果酸对假单胞菌具有很大的促进作用,而固氮菌对根系分泌物中的糖类和氨基酸很敏感,由此导致番茄根际和非根际土壤中固氮菌和荧光假单胞菌的数量显著不同^[31]。Gu 等研究发现在苹果园前茬种植小麦,其根系分泌物能显著促进土壤中荧光假单胞菌的生长^[32]。袁光林等^[33]研究了阿魏酸、4-叔丁基苯甲酸和苯甲醛等酚酸化感物质对土壤脲酶的化感作用,结果发现 3 种化感物质均对土壤脲酶有一定的刺激作用,从而对土壤中的氮素循环产生影响。马瑞霞等研究了阿魏酸、苯甲酸和对羟基苯甲酸对土壤硝酸还原酶的影响规律,发现阿魏酸和苯甲酸在一定浓度范围内有抑制硝酸还原酶活性的作用^[34]。针对杨树连作人工林地力衰退问题,谭秀梅利用 HPLC 测定了连作杨树人工林根际土壤中的化感物质,共检出对羟基苯甲酸、肉桂酸、苯甲酸等 5 种酚酸

物质,外源引入试验表明这些化感物质可对土壤微生物群落结构产生显著影响^[18]。可见,人工林多代连作会导致林地某些化感物质的累积,而这些物质的化感作用可能与人工林地力衰退关系密切^[35-36]。已有的研究表明,杨树不同品种化感效应存在差异^[37],杨树人工林更替连作和非更替连作在根际效应上表现不同,其原因可能与不同杨树品种根系分泌物的差异有关。

4 结论

(1)更替连作和非更替连作均导致杨树人工林土壤发生不同程度的衰退,土壤养分在非更替连作中下降最为显著,土壤有机质的根际效应显著大于更替连作,而土壤速效 N、P、K 的根际效应在更替连作中显著增大。

(2)更替连作和非更替连作导致杨树人工林土壤过氧化氢酶、脲酶和碱性磷酸酶活性下降,多酚氧化酶和过氧化物酶活性上升,更替连作下降(上升)的幅度远小于非更替连作,非更替连作土壤酶活性的根际效应变化幅度强于品种更替连作。

(3)更替连作和非更替连作导致杨树人工林土壤微生物数量整体下降,其中土壤细菌比例有所降低,真菌比例上升,土壤呈现从细菌型向真菌型转化的特点,非更替连作对土壤微生物的根际效应明显大于更替连作。

(4)杨树人工林更替连作和非更替连作在根际效应上的差异可能与不同杨树品种根系分泌物的差异有关。

References:

- [1] Ryan P R, Delhaize E. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Annual Review of Plant Physiology Molecular Biology*, 2001, 52: 527-560.
- [2] Liu Z Y. Study on rhizosphere dynamics and its effect. *World Agriculture*, 1987, 8: 39-41.
- [3] He Y H, Shen D S, Zhu Y M. Root exudates and their rhizospheric effects. *Bulletin of Science and Technology*, 2006, 22(6): 761-766.
- [4] Liu H S, Song Q H, Li F M. The roles of root exudation on rhizosphere nutrient and rhizosphere microorganisms. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2002, 22(3): 693-702.
- [5] Chen L C, Liao L P, Wang S L, Xiao F M. A review for research of root exudates ecology. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(6): 57-62.
- [6] Li C J, Ma W, Zhang F S. Rhizosphere talk and its impacts on plant growth. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(1): 178-183.
- [7] Hu J C, Xue D L, Ma X C, Wang S J. Research advances in plant growth-promoting rhizobacteria and its application prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10): 1963-1966.
- [8] Sun Q, Wang X R, Ding S M. Rhizosphere effects in metal absorption by hyperaccumulators and its research advances. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(1): 30-36.
- [9] Wang J, Zhang Z Z, Su Y M, Wei X F, He F, He W. The rhizosphere effect in phytoremediation of the petroleum polluted soil. *Journal of Petrochemical University*, 2008, 21(2): 36-40.
- [10] Yang Y S, He Z M, Chen G S, Xie J S, Yu X T. PCA of soil fertility under different gaps of continuously planting Chinese fir. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1): 33-38.
- [11] Yu X T, Zhang Q S. Studies on the enzyme activities and Fertilizers of Soils in Chinese-fir repeated plantation woodland. *Journal of Fujian College of Forestry*, 1989, 9(3): 263-271.
- [12] Yang C D, Sun Q W, Jiao R Z, Lu L H. Studies on the relationship between soil property changes and soil degradation under 2ed rotation Masson pine plantation at Da Qing Shan. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(2): 367-273.
- [13] Li Y M, Hu J C, Zhang P, Wang S L, Wang S J. Microbial diversity in continuously planted Chinese-fir soil. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1275-1278.
- [14] Wang Y P, Wang H T. Research advances on allelopathy of continuous cropping plantation. *World Forestry Research*, 2008, 21(4): 25-30.
- [15] Sun C L, Zhu Z X, Wang Z, Tong C R. Study on the soil degradation of the poplar plantation and the technique to preserve and increase soil fertility. *Scientia Silvae Sinicae*, 1995, 31(6): 506-511.
- [16] Liu F D, Liu Y Q, Wang H T, Kong L G, Wang Y. Effect of continuous cropping on poplar plantation. *Journal of Soil Water Conservation*, 2005, 18(2): 102-105.

- [17] Wang H T, Jiang Y Z, Liu F D, Kong L G. The influence of cropping on the microenvironment and wood growth of poplar plantation. Transactions of China Pulp and Paper, 2004, 21: 457-460.
- [18] Tan X M, Wang H T, Kong L G, Wang Y P. Accumulation of phenolic acids in soil of a continuous cropping Poplar plantation and their effects on soil microbes. Journal of Shandong University (Natural Science), 2008, 43(1): 14-19.
- [19] Kong L G, Wang H T, Jiang Y Z, Tan X M, Jiao X J. Effect of alternative continuous cropping of different poplar cultivar on soil biochemical properties. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 25(5): 69-72.
- [20] Liu F D, Jiang Y Z, Wang H T, Wang Y, Kong L G. Soil productivity maintenance technique of poplar plantation under continuous cropping. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(S1): 58-64.
- [21] Bao S D. Analysis on Soil Agricultural Chemistry. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 1-495.
- [22] Guan S Y. Soil Enzyme and its Research Method. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1986: 1-376.
- [23] Xu G H, Zheng H Y. Soil Microbes Analysis Method Manual. Beijing: Chinese Agriculture Press, 1986: 1-314.
- [24] Lin P. The characteristics of soil fertility in continuous Chinese cryptomeria plantation. Journal of Zhejiang Forestry College, 1994, 11(2): 138-142.
- [25] Sun X S, Feng H S, Wan S B, Zuo X Q. Changes of main microbial strains and enzymes activities in peanut continuous cropping soil and their interactions. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(5): 617-621.
- [26] Li C G, Li X M, Wang J G. Effect of soybean continuous cropping on bulk and rhizosphere soil microbial community function. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1144-1150.
- [27] Chen H, Hao H R, Xiong J, Qi X H, Zhang C Y, Lin W X. Effects of successive cropping rehmanna glutinosa on rhizosphere soil microbial flora and enzyme activities. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2755-2759.
- [28] Chen Z Z, Yin Q Y, Wang X M, Zou Y J. Primary study on dynamics of soil microorganisms under soybean continuous cropping. Scientia Agricultura Sinica, 1997, 30: 96.
- [29] Liang W J, Zhang X K, Jiang Y, Kong C H. Allelochemicals from root exudates and their effects on soil biota. Advances in Earth Science, 2005, 20(3): 330-337.
- [30] Darrah P R, Jungk A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. Biology and Fertility of Soils, 1991, 3: 199-204.
- [31] Sood S G. Chemotactic response of plant-growth-promoting bacteria towards roots of vesicular-arbuscular mycorrhizal tomato plants. Fems Microbiology Ecology, 2003, 45: 219-227.
- [32] Gu Y H, Mazzola M. Modification of fluorescent pseudomonad community and control of apple replant disease induced in a wheat cultivar-specific manner. Applied Soil Ecology, 2003, 24(1): 57-72.
- [33] Yuan G L, Ma R X, Liu X F, Sun S E. Effects of allelochemicals on Uricase activity. Chinese Journal of Environmental Science, 1998, 19(3): 55-57.
- [34] Ma R X. Study on influence of allelochemicals on activity of nitrate reductases. Chinese Journal of Environmental Science, 1999, 20(1): 80-83.
- [35] Fisher R F. Allelopathy: a potential cause of forest regeneration failure. Journal of Forestry, 1980, 78(4): 346-348.
- [36] 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.
- [37] Wan K Y, Chen F, Tao Y, Chen S S, Luo Z J. Allelopathy of *Populus* sp. to *Lactuca sativa*. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(1): 21-22.

参考文献:

- [2] 刘芷宇. 根际动态及其效应的研究. 世界农业, 1987, 8: 39-41.
- [3] 贺永华, 沈东升, 朱荫渭. 根系分泌物及其根际效应. 科技通报, 2006, 22(6): 761-766.
- [4] 刘洪升, 宋秋华, 李凤民. 根分泌物对根际矿物营养及根际微生物的效应. 西北植物学报, 2002, 22(3): 693-702.
- [5] 陈龙池, 廖利平, 汪思龙, 肖复明. 根系分泌物生态学研究. 生态学杂志, 2002, 21(6): 57-62.
- [6] 李春俭, 马玮, 张福锁. 根际对话及其对植物生长的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 178-18.
- [7] 胡江春, 薛德林, 马成新, 王书锦. 植物根际促生菌(PGPR)的研究与应用前景. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1963-1966.
- [8] 孙琴, 王晓蓉, 丁士明. 超积累植物吸收重金属的根际效应研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(1): 30-36.
- [9] 王靖, 张忠智, 苏幼明, 魏小芳, 何峰, 贺伟. 石油污染土壤植物修复根际效应研究. 石油化工高等学校学报, 2008, 21(2): 36-40.
- [10] 杨玉盛, 何宗明, 陈光水, 谢锦升, 俞新妥. 杉木多代连栽后土壤肥力变化. 土壤与环境, 2001, 10(1): 33-38.
- [11] 俞新妥, 张其水. 杉木连栽林地土壤生化特性及土壤肥力的研究. 福建林学院学报, 1989, 9(3): 263-271.

- [12] 杨承栋, 孙启武, 焦如珍, 卢立华. 大青山一二代马尾松土壤性质变化与地力衰退关系的研究. 土壤学报, 2003, 40(2): 367-273.
- [13] 李延茂, 胡江春, 张品, 汪思龙, 王书锦. 杉木连栽土壤微生物多样性的比较研究. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1275-1278.
- [14] 王延平, 王华田. 连作人工林化感效应研究综述. 世界林业研究, 2008, 21(4): 25-30.
- [15] 孙翠玲, 朱占学, 王珍, 佟超然. 杨树人工林地力退化及维护与提高土壤肥力技术的研究. 林业科学, 1995, 31(6): 506-511.
- [16] 刘福德, 刘颜泉, 王华田, 孔令刚, 王迎. 杨树人工林连作效应. 水土保持学报, 2005, 18(2): 102-105.
- [17] 王华田, 姜岳忠, 刘富德, 孔令刚. 连作对杨树人工林土壤微生态环境及林木生长影响的研究. 中国造纸学报, 2004, z1: 457-460.
- [18] 谭秀梅, 王华田, 孔令刚, 王延平. 杨树人工林连作土壤中酚酸积累规律及对土壤微生物的影响. 山东大学学报: 理学版, 2008, 43(1): 14-19.
- [19] 孔令刚, 王华田, 姜岳忠, 谭秀梅, 焦绪娟. 杨树不同品种更替连作对林地土壤生化特性的影响. 水土保持学报, 2006, 25(5): 69-72.
- [20] 刘福德, 姜岳忠, 王华田, 王迎, 孔令刚. 杨树人工林连作地力维持技术的探讨. 林业科学, 2007, 43(S1): 58-64.
- [21] 鲍士旦. 土壤农业化学分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 1-495.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法. 北京: 中国农业出版社, 1986: 1-376.
- [23] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京: 中国农业出版社, 1986: 1-314.
- [24] 林平. 柳杉连栽林地土壤肥力特征. 浙江林学院学报, 1994, 11(2): 138-142.
- [25] 孙秀山, 封海胜, 万书波, 左学青. 连作花生田主要微生物类群与土壤酶活性变化及其交互作用. 作物学报, 2001, 27(5): 617-621.
- [26] 李春格, 李晓鸣, 王敬国. 大豆连作对土体和根际微生物群落功能的影响. 生态学报, 2006, 26(4): 1144-1150.
- [27] 陈慧, 郝慧荣, 熊君, 齐晓辉, 张重义, 林文雄. 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2755-2759.
- [28] 陈宗泽, 殷勤燕, 王旭明, 邹永久. 大豆连作土壤微生物区系动态研究初报. 中国农业科学, 1997, 30(4): 96.
- [29] 梁文举, 张晓珂, 姜勇, 孔垂华. 根分泌的化感物质及其对土壤生物产生的影响. 地球科学进展, 2005, 20(3): 330-337.
- [33] 袁光林, 马瑞霞, 刘秀芬, 孙思恩. 化感物质对土壤脲酶活性的影响. 环境科学, 1998, 19(3): 55-57.
- [34] 马瑞霞. 化感物质对硝酸还原酶活性影响的研究. 环境科学, 1999, 20(1): 80-83.
- [36] 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.
- [37] 万开元, 陈防, 陶勇, 陈树森, 罗治建. 杨树对菖蒲的化感作用. 东北林业大学学报, 2009, 37(1): 21-22.