植物营养与肥料学报 2015,21(3):664-674 doi: 10.11674/zwyf.2015.0313
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

氮磷提高华北落叶松人工林地土壤养分和酶活性的作用

马亚娟[1], 徐福利[2,3], 王渭玲[1*], 陈钦程[3], 赵海燕[3], 赵亚芳[2]
(1 西北农林科技大学生命科学学院,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 西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】采用田间试验,研究外源施用氮、磷肥对处于中龄林的20年华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)人工林地土壤养分和酶活性特征的影响,并对土壤肥力水平进行评价,以筛选出最佳施肥方案。**【方法】**2012年4月中旬对处于中龄林的20年华北落叶松人工纯林进行外源施用氮、磷肥,在5月到10月中旬采集0—20 cm土壤样品,测定土壤养分和土壤酶含量,分析其在整个生长期内的动态变化,运用主成分分析法筛选出最佳施肥方案。**【结果】**1)施用氮、磷肥显著增加土壤速效氮和速效磷含量($P<0.05$),降低土壤速效钾含量和pH值。与对照相比,不同施肥处理速效氮增加幅度为N2P > N2 > N1P > N1 > P,速效磷为N1P > P > N2P > N2 > N1,而速效钾降低幅度为N2P > N1P > N2 > P > N1,pH降低幅度为N2P > N2 > P > N1P > N1。2)施肥后,土壤蔗糖酶、磷酸酶和脲酶活性显著增加($P<0.05$),过氧化氢酶活性降低。与对照相比,不同施肥处理蔗糖酶增加幅度是N1P > N2P > N1 > P > N2,磷酸酶是N2P > N1 > N1P > N2 > P,脲酶是N2P > N1P > N1 > N2 > P,而过氧化氢酶降低幅度是N2P > N2 > N1P > P > N1。3)土壤中养分含量对季节变化的响应非常敏感,速效氮、速效磷和速效钾整体呈先降低后增加的趋势,最小值出现在植物生长旺盛的7、8月份。土壤酶活性变化比较复杂,多数最大值出现在7、8月份。4)施氮肥、磷肥和氮磷配施处理均提高了土壤速效氮和速效磷含量,速效氮由21.56 mg/kg上升到35.77 mg/kg,速效磷由1.86 mg/kg上升到3.73 mg/kg,尤以N1P和N2P配施效果最明显。5)氮肥、磷肥和氮磷配施处理,土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性均增加,虽然过氧化氢酶活性小幅下降,但总的来说土壤酶活性增强,以N1P和N2P配施效果最为明显。6)主成分分析表明,施肥提高了土壤肥力水平,提高效果表现为N1P > N2P > P > N1 > N2 > CK。N1P处理土壤肥力水平增加了1.505,N2P增加了1.405。**【结论】**施氮、磷肥可显著增加林地土壤养分,增强土壤酶活性,有效改善华北落叶松人工林地土壤肥力状况,缓解氮、磷亏缺导致的林地地力衰退。供试条件下华北落叶松的最佳施肥方案是N 75 kg/hm^{2}和P_2O_5 75 kg/hm^2(N1P),而N 150 kg/hm^{2}和P_2O_5 75 kg/hm^2(N2P)次之。

关键词: 华北落叶松; 氮磷施肥; 养分; 酶活性; 土壤肥力
中图分类号: S791.22; S718.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0664-11

Increase of soil nutrients and enzymatic activity by adding nitrogen and phosphorus to *Larix principis-rupprechtii* plantation

MA Ya-juan[1], XU Fu-li[2,3], WANG Wei-ling[1*], CHEN Qin-cheng[3], ZHAO Hai-yan[3], ZHAO Ya-fang[2]
(*1 College of Life Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Institute of Soil and Water Conservation of Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China;*
3 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract:【Objectives】 A field experiment was conducted to study effects of exogenous nitrogen and phosphorus fertilization on soil nutrients and enzyme activities, and select proper fertilizer amounts for the half-mature *Larix principis-rupprechtii* plantation in the Qinling Mountains of China. **【Methods】** Nitrogen and phosphate fertilizers were applied individually or together in three levels in a 20-year-old half-mature *Larix principis-rupprechtii*

收稿日期: 2014-07-21 **接受日期:** 2014-11-25 **网络出版日期:** 2015-02-13
基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)2012CB416902资助。
作者简介: 马亚娟(1989—),女,甘肃庆阳人,硕士研究生,主要从事植物生理生态方面的研究。E-mail:yang02410241@163.com
* 通信作者 E-mail:ylwwl@163.com

plantation in mid April 2012. Soil samples in 0-20 cm depth were collected from May to October 2012, and the soil nutrient contents and enzyme activities were measured. The principal components analysis was used to select the optimum fertilization scheme. 【**Results**】1) The application of nitrogen and phosphorus fertilization significantly increases the soil available nitrogen (N) and available phosphorus (P) contents, but decreases soil available potassium (K) content and pH. The increase levels of different treatments in soil available N was in the order of N2P > N2 > N1P > N1 > P, and available P in N1P > P > N2P > N2 > N1, while the soil available K decrease was in the order of N2P > N1P > N2 > P > N1 and pH in order of N2P > N2 > P > N1P > N1. 2) The activities of soil invertase, phosphatase, and urease could be significantly increased, but that of hydrogen peroxidase decreased by the N and P fertilization. The increase levels of the soil enzyme activities for invertase are in the order of N1P > N2P > N1 > P > N2, for phosphatase are N2P > N1 > N1P > N2 > P, and for urease are N2P > N1P > N1 > N2 > P, while the decreased of hydrogen peroxidase are in the order of N2P > N2 > N1P > P > N1. 3) The responses of soil nutrient contents are sensitive to seasons. The available N, P and K contents decrease firstly and then increase during the year, with the minimum values appeared in plants in July and August. The changes of soil enzyme activities are complex, most often the maximum values are also appeared in July and August. 4) Nitrogen and phosphorus fertilizer alone, or their combined application could increase the contents of soil available N and available P. The soil available N is increased from 21.56 mg/kg to 35.77 mg/kg and soil available P from 1.86 mg/kg to 3.73 mg/kg. The soil fertility levels are improved by fertilization, with satisfactory effects with the N1P and N2P treatments. 5) Both the nitrogen and phosphorus fertilization could increase the activities of soil invertase, urease and phosphatase, but decrease hydrogen peroxidase activity slightly. The fertilization generally increases the soil enzyme activities. 6) The principal components analysis indicates that the fertilization could significantly improve soil fertility levels with the order of N1P > N2P > P > N1 > N2 > CK. The highest increase is 1.505 in N1P, then is 1.405 in N2P. 【**Conclusions**】Fertilization is capable of enhancing soil nutrients and enzyme activities, thus improving soil fertility and alleviating the decline in soil fertility caused by nitrogen and phosphorus deficiencies in the *Larix principis-rupprechtii* plantation. The proper fertilization amount is N 75 kg/hm^2 and P_2O_5 75 kg/hm^2 (N1P), followed by N 150 kg/hm^2 and P_2O_5 75 kg/hm^2 (N2P).

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; nitrogen and phosphorus fertilization; nutrient; enzyme activity; soil fertility

华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)为松科落叶松属的落叶乔木,是我国东北、内蒙古林区以及华北、西南地区的高山针叶林的主要森林组成树种,由于造林密度单一,林下植被稀疏,生物多样性匮乏,引起土壤理化性质退化,土壤质量下降,从而导致林地土壤肥力下降。张建国等[1]认为,从本质上说地力衰退的原因是土壤肥力系统的失调或破坏。因此,通过施肥补充土壤营养,调节营养平衡是提高林分生产力的必然途径。氮、磷是植物生长所需矿质元素中最为重要的两种,植物吸收的氮、磷主要来源于土壤。而在自然条件下,土壤中氮、磷元素是有限的,因此,氮、磷营养就不同程度地限制着植物个体的生长、群落的发育乃至整个生态系统的生产力[2-4],为了缓解养分不足导致的华北落叶松人工林地力衰退、土壤肥力下降,本文以立地条件一致,处于植物生长旺盛期(也是植物对养分需求量最大时期)的 20 年树龄的华北落叶松人工纯林为研究对象,探讨在土壤氮、磷亏缺的林地内进行不同氮、磷施肥处理对不同生长季节华北落叶松人工林地土壤养分和土壤酶活性等土壤肥力特性的变化,并采用主成分分析对施用氮、磷肥情况下土壤肥力水平进行评价,初步筛选出最佳施肥方案,以期为通过施肥改善林地土壤质量,缓解华北落叶松人工林地力衰退和长期维持林地生产力提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验布设在陕西省太白县(107°03′～107°46′40″E,33°38′13″～34°09′55″N)南滩试验苗圃,该地属温带大陆性季风气候,年均降水量为 600～1000 mm,多集中在 6～8 月,年均气温 7.7℃,夏季平均气温 19℃,海拔在 1600～1700 m,土壤为壤质棕

壤,土层厚度<65 cm,土壤有机质为20.35 g/kg、土壤pH为6.72、土壤养分0—20 cm土层全氮1.16 g/kg、速效磷1.86 mg/kg、铵态氮6.13 mg/kg、硝态氮15.44 mg/kg、20—40 cm土层全氮0.85 g/kg、速效磷1.40 mg/kg、40—60 cm全氮0.46 g/kg、速效磷1.06 mg/kg,依据全国第二次土壤普查及相关标准[5],本试验区华北落叶松林地土壤(0—20 cm)中度缺氮,极度缺磷。

研究对象为处于中龄林的20年生华北落叶松人工纯林,林分基本情况如下:密度2500 plant/hm^2,平均胸径10.23 cm,平均树高9.8 m,坡度10～15°,西北坡向,下坡位,海拔1620～1700 m。林下木本植物在试验前一年(2011年)全部砍伐,草本植物有大油芒(*Sponiopogon sibiricus*)、披针薹草(*Carex lancifolia*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、黄精属(*Polygonatum*)和菊科(*Compositae*)等多种植物。

1.2 试验设计

2012年4月,在华北落叶松人工纯林地内设置固定样地18块,每块样地面积为20m×20m,样地之间有两排树作为隔离带,树木基本成排成行分布,密度基本一致。试验设6个处理:对照,不施肥(CK);N 75 kg/hm^2(N1);N 150 kg/hm^2(N2);P_2O_5 75 kg/hm^2(P);N 75 kg/hm^{2}和P_2O_5 75 kg/hm^2(N1P);N 150 kg/hm^{2}和P_2O_5 75 kg/hm^2(N2P)。每处理3次重复。

试验用氮肥为尿素(含N≥46%),磷肥为过磷酸钙(含P_2O_5≥12%),2012年4月中旬进行施肥,肥料一次性施入,均匀撒施到样地内。为减少肥料的挥发,施肥是下午17:00以后撒施。

1.3 土壤样品采集与制备

土壤样品分6次采集,分别在2012年5月、6月、7月、8月、9月和10月中旬。采样点选在离标准木50 cm处,每次取样前先铲除土壤表面的植被层及1 cm左右的表层土,再用土钻沿"S"型取0—20 cm的土壤,剔除石砾和植物残根等杂物,每样地设置5个采样点,5个点的土样等比例混合为一个样,每次取土壤样品18个,6次共108个,采集后的土壤样品保存在密封袋中,带回实验室立即风干,并过1 mm筛保存,以备测定。

1.4 土壤pH和养分的测定方法

土壤pH采用DELTA-320 pH计法(水土比为5:1)。土壤养分的测定参考《土壤农化分析》[6]:土壤速效磷的测定采用0.5 mol/L $NaHCO_3$浸提—钼锑抗比色法;土壤速效钾的测定采用1 mol/L NH_4OAc浸提—火焰光度法测定;土壤铵态氮和硝态氮采用1 mol/L KCl浸提后,用AA3型连续流动分析仪测定(德国Bran+Luebbe公司)。

1.5 土壤酶活性的测定方法

土壤酶活性的测定参考《土壤酶及其研究方法》[7]:土壤过氧化氢酶采用高锰酸钾法,其活性以1 g土消耗0.02 mol/L $KMnO_4$的毫升数表示(mL/g);土壤磷酸酶采用磷酸苯二钠比色法,其活性以2 h后1 g土壤P_2O_5毫克数表示(mg/g);土壤蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法,其活性以24 h后1 g土壤葡萄糖毫克数表示(mg/g);土壤脲酶采用靛酚比色法,其活性以24 h后1 g土壤NH_3-N毫克数表示(mg/g)。

1.6 数据处理与分析

采用Excel 2013和SPSS 20.0软件处理数据,进行方差分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理华北落叶松林地土壤养分和pH的动态变化

2.1.1 土壤速效氮 土壤速效氮用土壤硝态氮和土壤铵态氮之和表示。由图1A可以看出施氮肥能显著增加土壤速效氮的含量($P<0.05$),从5月份至10月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P和N2P使土壤速效氮含量分别增加202.1%、592.2%、40.4%、257.4%和746.2%,增加量为N2P>N2>N1P>N1>P,增加40.4%～746.2%,因此施肥效果最明显的处理是N2和N2P。并且,N1P与N1相比施肥效果增加55.3%,N2P与N2相比施肥效果增加154.0%,说明在同一施氮水平下氮磷配施比单施氮肥增加土壤速效氮含量效果更加明显,磷肥促进了氮肥的肥效,使土壤速效氮含量增加。另外,从5月份到10月份土壤速效氮含量整体呈先降低后增加的趋势,最小值出现在9月份,为5.49 mg/kg,而从9月份到10月份土壤速效氮含量又有所增加,从5.49 mg/kg增加到9.04 mg/kg。

2.1.2 土壤速效磷 土壤速效磷是指易被植物吸收利用的磷,是衡量土壤磷素供应水平的指标,经营落叶松人工林时土壤速效磷含量下降特别严重,被认为是其土壤肥力下降的关键因子[8]。由图1B可以看出施肥能显著增加土壤速效磷含量($P<0.05$),从5月份至10月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P和N2P使土壤速效磷含量

分别增加 19.1%、20.5%、47.7%、50.7% 和 45.8%,增加量为 N1P > P > N2P > N2 > N1,增加 19.1%～50.7%,施磷肥或氮磷配施提高土壤速效磷达到了显著水平($P < 0.05$),而施氮肥增加土壤速效磷没有达到显著水平($P > 0.05$)。从对照可以看出,5 月份到 10 月份土壤速效磷含量变化总体趋势是先降低后增加,最小值在 8 月份,为 2.75 mg/kg,说明植物在旺盛生长阶段对速效磷的吸收是增加的,导致土壤速效磷含量逐渐减小,9、10 月份对照和各施肥处理土壤速效磷含量都有所增加,可能是由于植物进入落叶期,枝叶开始凋落养分逐渐回归以及代谢强度降低,对磷的吸收减弱[9]。

2.1.3 土壤速效钾　土壤中钾是以矿质态存在的,没有有机态,是土壤肥力大小的重要考量指标。由图 1C 可以看出,从 5 月份到 10 月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P 和 N2P 使土壤速效钾含量分别降低 4.7%、10.3%、6.7%、11.3% 和 13.0%,降低量为 N2P > N1P > N2 > P > N1,降低 4.7%～11.3%,说明 N2P 施肥处理降低土壤速效钾含量最大,而 N1 处理最小。并且,N1P 处理与 N1 处理相比土壤速效钾含量降低 6.6%,N2P 处理与 N2 处理相比土壤速效钾含量降低 2.7%,说明在同一氮肥水平下,氮磷配施比单施氮肥土壤速效钾含量更低,氮磷配施增加了植物对钾的吸收、利用,使土壤中的钾含量降低,同时无论从单施氮肥的 N1 和 N2 处理还是从同一磷肥水平下 P、N1P 和 N2P 处理来看,都可以发现氮肥含量越高,土壤中速效钾含量越低,说明氮肥量的多少与植物对钾的吸收利用呈正相关。由整体来看,从 5 月份到 10 月份土壤速效钾的变化趋势是先降低后上升,最小值在 8 月份,为 85.37 mg/kg,可能是由于 7、8 月份是植物生长的旺盛期对钾的吸收增大以及该时期降雨集中对养分的淋失加强造成,而到 9、10 月份养分随着凋落物的分解释放又逐渐增加,在该系统内循环以满足植物对钾的需求,同时,5 月份土壤速效钾含量比其他月份高,是因为落叶松从试验前一年的 11 月份到试验当年的 4 月份之间,枝叶枯落被土壤微生物分解,养分回馈到土壤表层而大量

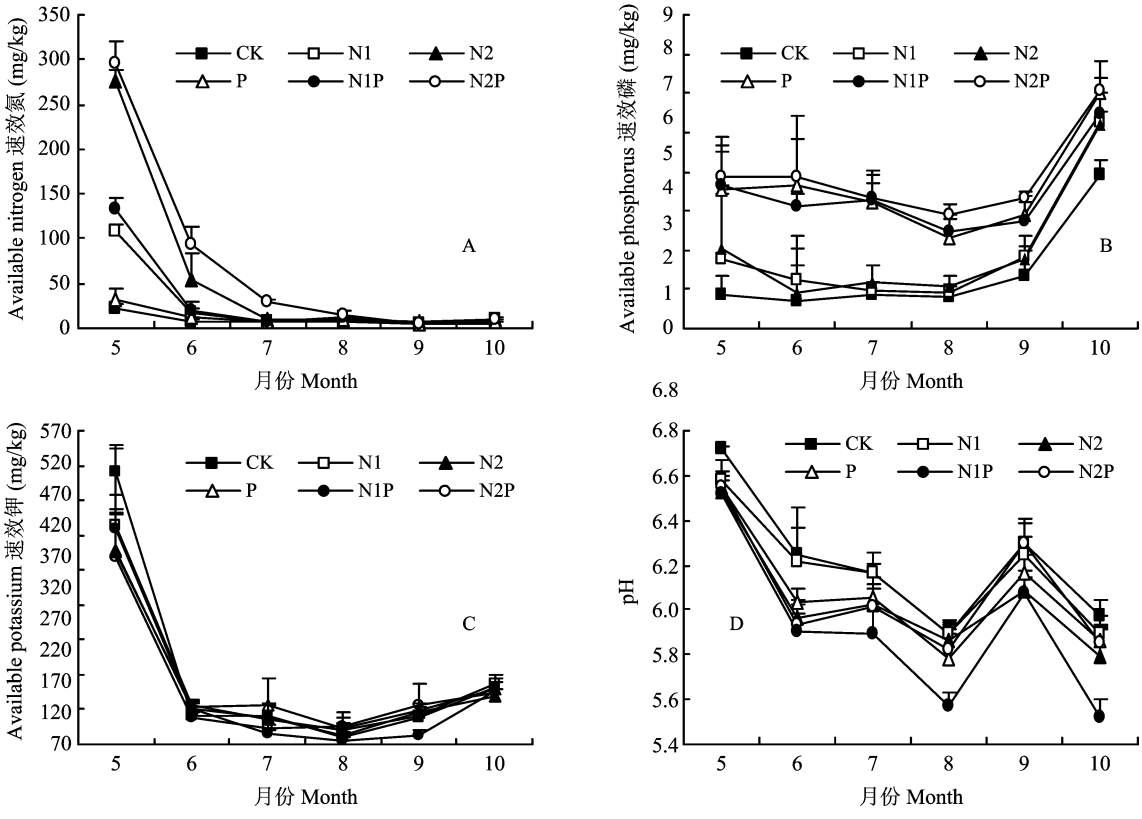

图 1　不同施肥处理土壤速效养分和 pH 值的周年变化

Fig. 1　Annual variation of soil available nutrients and pH values under different fertilizer treatments

[注(Note):误差线表示标准差($n = 6$) Error bars show standard deviation($n = 6$).]

累积所致[9-10]。

2.1.4 土壤pH值　pH可以影响很多土壤生物学性质和化学性质。由图1D可以看出,施肥可以降低土壤pH,表明施肥会导致一定的土壤酸化。从5月份到10月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P和N2P施肥处理分别降低土壤pH值0.05、0.17、0.15、0.14和0.27个单位,pH降低顺序为N2P > N2 > P > N1P > N1,降低了0.05～0.27个单位,说明N2P降低土壤pH最为明显,N1降低最小。在5月份到10月份植物的整个生长期内,土壤pH呈降低—升高—降低的趋势。可能是由于在本研究中施用的肥料是尿素,会导致土壤NH_4^+和NO_3^-的增加,而土壤NH_4^+硝化作用、NO_3^-的积累与淋失、植物对阴阳离子吸收不平衡是导致土壤酸化的重要原因,9月份土壤pH增加的可能原因是施用的肥料逐渐消耗掉,土壤pH逐渐回归到原有状态,而到10月份植物进入落叶期,针叶和树枝开始凋落,其针叶中富含单宁、树脂等成分,分解产生以富里酸等为主的有机酸使土壤的pH又降低。

2.2 不同施肥处理华北落叶松林地土壤酶活性的动态变化

2.2.1 土壤蔗糖酶活性　蔗糖酶以有机质为底物将高分子化合物分解成能被植物和微生物利用的营养物质,在一定范围内,底物越多,酶活性越强,其活性表示土壤熟化程度和肥力水平。由图2A可以看出,施肥能显著增加土壤蔗糖酶的活性($P<0.05$),从5月份到10月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P和N2P提高土壤蔗糖酶活性分别为49.3%、26.1%、48.0%、77.4%和72.3%,增加量为N1P > P > N2P > N2 > N1,增加19.1%～50.7%,说明N1P处理提高土壤蔗糖酶活性最大,而N2最小。另外,N1P处理与N1处理相比,提高土壤蔗糖酶活性28.1%;N2P处理与N2处理相比,提高土壤蔗糖酶活性46.1%,说明氮磷配施比单施氮提高土壤蔗糖酶活性效果更加明显。从对照和各施肥处理来看,土壤蔗糖酶活性从5月份到10月份总体呈先升高后降低的趋势,最大值出现在7月份。

2.2.2 土壤磷酸酶活性　磷酸酶能促使土壤有机磷

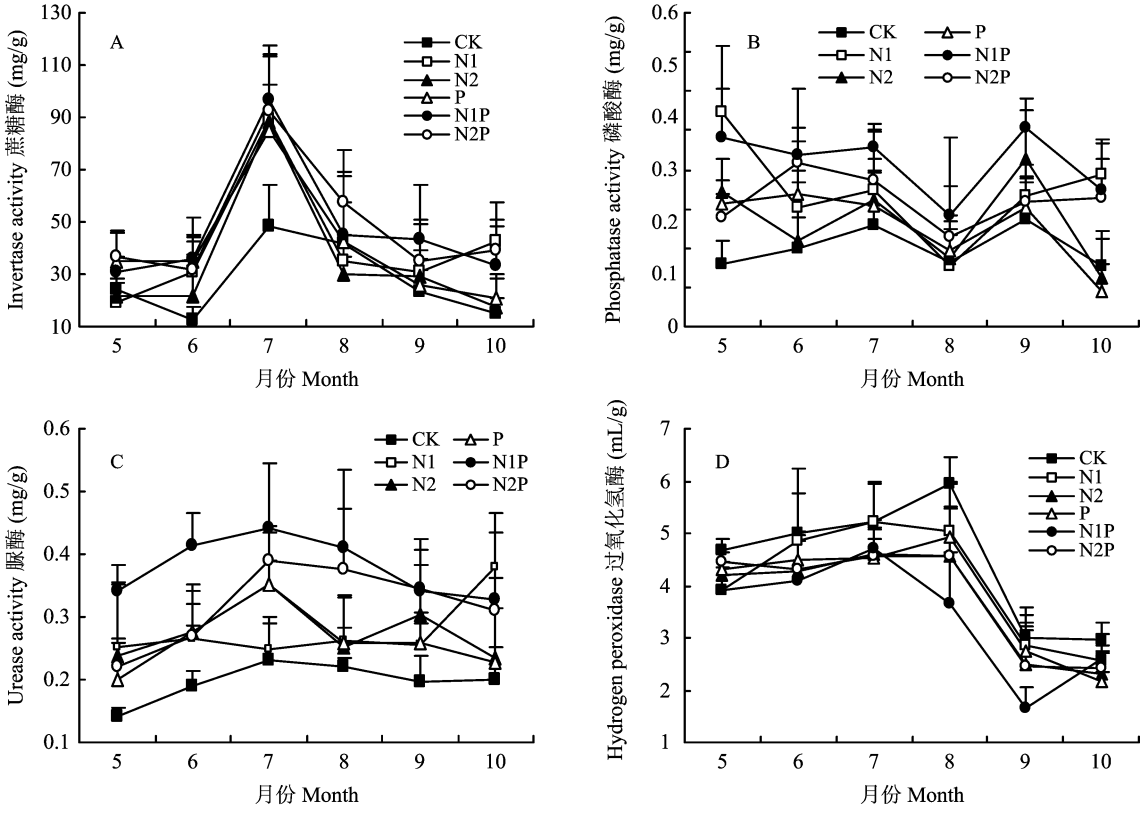

图2　不同施肥处理土壤酶活性的周年变化

Fig. 2　Annual variation of soil enzyme activities under different fertilizer treatments

[注(Note):误差线表示标准差 Error bars show standard deviation($n=6$).]

的矿化,有助于植物对磷的吸收,其活性的高低直接影响土壤有机磷的分解转化及其生物有效性。由图 2B 可以看出,施肥能显著增加土壤磷酸酶的活性($P<0.05$),与对照相比,从 5 月份到 10 月份 N1 施肥处理平均提高土壤磷酸酶活性 45.1%,其中,5 月份变化最明显达 152.7%,N2 和 P 处理对土壤磷酸酶活性影响的趋势基本相同,从 5 月份到 9 月份磷酸酶活性都高于对照,而到 10 月份相比对照二者都有所下降,平均提高土壤磷酸酶活性分别为 15.9% 和 13.9%,从 5 月份到 10 月份整个生长季,N1P 和 N2P 施肥处理平均提高土壤磷酸酶活性分别为 31.5% 和 56.4%,从不同施肥处理来看,增加幅度为 N2P > N1 > N1P > N2 > P,增加 13.9%～56.4%,由以上分析可以看出,N1 和 N2P 处理提高土壤磷酸酶活性最大,而 P 处理最低。另外,还可以看出,从 5 月份到 10 月份磷酸酶整体变化趋势是先降低后上升,最低峰出现在 7、8 月份,但是整体变化幅度不大,平均在 0.21～0.29 mg/g 之间波动。

2.2.3 土壤脲酶活性变化　脲酶是一种酰胺酶,它能分解有机物,水解生成氨、二氧化碳和水,而氨是植物氮素营养的直接来源,其活性能够表征土壤的供氮能力和强度。由图 2C 可以看出,施肥能显著增加土壤脲酶的活性($P<0.05$),从 5 月份到 10 月份整个生长季的均值来看,与对照相比 N1、N2、N1P 和 N2P 施肥处理提高土壤脲酶活性分别为 44.3%、43.3%、63.2% 和 99.3%,而 P 处理提高土壤脲酶活性为 36.0%,增加幅度为 N2P > N1P > N1 > N2 > P,增加 36.0%～99.3%,由以上分析可知施氮肥和氮磷配施对土壤脲酶活性的影响大于单施磷肥,并且 N1P 处理脲酶活性比 N1 处理高 18.9%,N2P 处理脲酶活性比 N2 处理高 56%,说明在同一施氮水平下氮、磷配施脲酶活性大于单施氮肥,氮磷配施提高土壤脲酶活性更显著。另外,从对照和各施肥处理来看,土壤脲酶活性在 5 月份到 10 月份之间变化幅度不是很大,但除 N1 处理脲酶活性基本保持稳定外,其他处理总体趋势是先升高后降低,最大出现在 7、8 月份。

2.2.4 土壤过氧化氢酶活性　过氧化氢酶是一种重要的土壤氧化还原酶,能促进过氧化氢对各种化合物的氧化,催化过氧化氢分解防止其对生物体的毒害作用。由图 2D 可以看出,施肥能降低土壤过氧化氢酶活性,从 5 月份到 10 月份整个生长季的均值来看,与对照相比,N1、N2、P、N1P 和 N2P 施肥处理降低土壤过氧化氢酶活性分别为 9.0%、16.6%、14.0%、15.2%、23.4%,降低幅度为 N2P > N2 > N1P > P > N1,降低 9.0%～23.4%,说明 N2P 处理降低土壤过氧化氢酶活性最大,N1 处理最小。另外,从对照和施肥处理来看,过氧化氢酶总体变化趋势是先升高后降低,最大值出现在 7、8 月份,可能是由于这一时期土壤含水量、通气性和温度状况都比较适宜,植物生长代谢比较旺盛,微生物和根系代谢加强分泌产生更多的过氧化氢酶所致[7]。

2.3　华北落叶松人工林地土壤肥力水平评价

为了更好地评价 6 种施肥处理土壤的肥力状况,从而筛选出适用于华北落叶松人工林地的最佳施肥处理。本研究选用 0—20 cm 这一最能体现植物对外源氮磷肥利用情况的土层来进行试验,将土壤 pH、速效氮、速效磷、速效钾、蔗糖酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶等 8 个指标进行主成分分析(表 1)。结果表明,第一主成分的方差贡献率最大为 41.876%,第二主成分的方差贡献率为 24.721%,第三主成分的方差贡献率为 16.484%,三个主成分的累计方差贡献率为 83.082%,接近 85%,因此,这三个主成分基本能反映林地土壤各指标的相对重要性及各指标之间的关系。

表 1　各主成分的贡献率和累计贡献率(%)

Table 1　Contribution and accumulated contribution of the principal component

项目 Item	第一主成分 1st component	第二主成分 2ed component	第三主成分 3rd component
特征根 Eigenvalue	3.350	1.978	1.319
方差贡献率 Variance contribution	41.876	24.721	16.484
累计方差贡献率 Cumulative variance contribution	41.876	66.597	83.082

对8个土壤质量因子在各主成分上的因子载荷进行分析(表2),结果表明pH、速效氮、速效钾和蔗糖酶对第一主成分影响因子较大,综合了氮、钾利用和运移以及有机碳分解过程的信息,表明它们对土壤系统起着主导作用,即包括蔗糖酶的第一主成分可作为评价林地土壤质量的重要指标,对第二主成分影响较大的是速效磷和脲酶,综合了磷利用和尿素分解过程,且脲酶以较大的因子载荷出现在第二主成分中,表明它对林地土壤系统具有重要作用,第三主成分主要由磷酸酶和过氧化氢酶决定,综合了有机磷转化和过氧化氢的分解过程,且两者出现的因子载荷较大,分别为0.613和0.758,表明磷酸酶和过氧化氢酶在林地土壤综合肥力评价中也具有重要作用。

表2 土壤肥力特征向量分析

Table 2 Principal component eigenvectors of soil fertility

因子 Factor	pH	速效氮 Avail. N	速效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	磷酸酶 Phosphatase	过氧化氢酶 Hydrogen peroxidase
1	0.429	0.462	0.245	0.480	0.512	0.073	0.188	0.088
2	-0.410	0.139	0.486	-0.285	0.101	0.670	0.181	-0.059
3	-0.109	0.011	0.070	0.100	0.029	0.152	-0.613	0.758

将得到的特征向量与标准化后的数据相乘,得到主成分的表达式,最后以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重计算主成分的综合模型,得到不同施肥处理土壤肥力水平的综合得分(表3)。结果表明,各施肥处理能不同程度地增加林地土壤肥力水平,最佳施肥方案是N1P,N2P次之。与对照相比,施肥初步缓解了华北落叶松人工林地力衰退的现象,林地土壤肥力水平提高。

表3 主成分因子及土壤肥力水平综合得分

Table 3 Scores of the principle component factors and the synthetic scores of soil fertility levels

处理 Treatment	*F*1	*F*2	*F*3	综合得分 Synthetic score	综合排名 Ranking
CK	-0.003	-3.453	1.687	-0.694	6
N1	0.149	-0.957	-0.676	-0.344	4
N2	-0.851	0.429	-0.263	-0.353	5
P	-0.629	0.382	0.411	-0.121	3
N1P	0.755	1.289	0.236	0.811	1
N2P	0.597	2.310	-1.396	0.711	2

3 讨论与结论

氮、磷和钾元素作为植物体的营养元素,生长初期在植物体内都有较高的积累,但是经7、8月份植物生长旺盛期的波动变化后,土壤中氮、磷和钾元素含量降低,特别是速效养分消耗较大,土壤中的能量和物质交换都非常强烈[11-12]。本研究发现土壤中养分含量对季节变化的响应非常敏感,速效氮、速效磷和速效钾整体都呈先降低后增加的趋势,即在植物速生期(7、8月份)土壤中速效氮、速效磷和速效钾含量相对减少,而在9、10月份进入落叶期,土壤中的养分含量又相对增加,可能主要是由于5月份到8月份植物逐渐进入生长的旺盛期对氮、磷和钾的吸收增大造成,同时7、8月份进入降雨集中阶段对养分的淋失增大也会对此产生一定的影响,而8月份到10月份植物生长减慢、降雨将少,落叶松枝、叶开始凋落养分回馈到土壤表层引起土壤养分小幅增加,与前人研究结果一致[9,13-14]。pH可以影响很多土壤生物学性质和化学性质,刘勇等[15]对华北落叶松中、幼林土壤肥力变化的研究结果表明,pH季

节变化较速效氮、速效磷和速效钾缓和。本研究发现土壤 pH 在植物整个生长阶段平均下降 0.05 ～ 0.27 个单位,变化比养分缓和,说明施肥会导致林地一定程度的土壤酸化,但是影响并不大。许翠清等[13]研究表明,不同施肥处理对土壤养分含量影响有一定差异,硝态氮和铵态氮作为一种可被植物直接吸收利用的有效态氮素,其含量的变化直接对土壤氮素的迁移转化过程和植物生产力产生影响。本研究发现,与对照相比,土壤中速效氮对不同施肥处理的响应为 N2P > N2 > N1P > N1 > P,可能是施氮肥越多,土壤速效氮增量越大,并且在同一氮肥水平下氮磷配施比单施氮肥增加土壤速效氮含量更加明显,磷肥促进了氮肥的肥效,使土壤速效氮含量增加所致,这与马红亮[16]等人的研究结果一致, 土壤速效氮由原来的 21.56 mg/kg 上升到 35.77 mg/kg,说明土壤速效氮增加,林地土壤肥力增强。植物缺磷时,蛋白质的合成受阻,细胞分裂受到限制,植物生长缓慢[17],本研究中的土壤速效磷含量极低,处于严重缺乏状态,土壤磷缺乏会导致植物吸收不到充足的磷素。本研究发现,施肥可以显著提高土壤速效磷含量,其中 N1P 处理增加最大,N1 处理最小,且施磷肥或氮磷配施平均提高土壤速效磷含量一倍多,施肥能有效缓解土壤养分不足的状况,这与 Bolland 等[18]、Mercik 等[19]和李银水等[20]的研究结果一致,土壤速效磷由原来的 1.86 mg/kg 上升到 3.73 mg/kg,根据土壤养分分级标准[5],土壤养分由原来的 6 级上升到 5 级,施肥初步缓解了林地土壤对磷素的极度亏缺状态,使得林地土壤肥力提高。土壤中钾完全以矿质态存在,没有有机态,是土壤肥力大小的重要衡量指标之一[21],本研究发现施氮、磷肥后土壤速效钾含量都不同程度下降,与对照相比下降幅度为 N2P > N1P > N2 > P > N1,说明 N2P 降低土壤速效钾量最大,促进植物对钾的吸收效果最明显,而 N1 最小,且在同一氮肥水平下,氮磷配施比单施氮肥土壤速效钾含量更低,可能是由于氮磷配施增加了植物对钾的利用,使土壤中的钾含量降低。同时无论从单施氮肥的 N1 和 N2 还是从同一磷肥水平下 P、N1P 和 N2P 都可以发现氮肥含量越高,植物对速效钾的吸收越快。因此,施氮、磷肥在一定程度促进了植物对钾的吸收。施氮肥、磷肥和氮磷配施均提高了土壤速效氮和速效磷的含量,参考土壤养分分级标准,土壤养分级别上升,尤其是 N1P 和 N2P 配施效果最明显,说明施肥能够从根本上提高林地土壤肥力。

土壤酶是土壤生物活性的一个重要指标,林地土壤中一切生物化学活动都是在土壤酶作用下完成的,土壤酶活性大小与土壤肥力密切相关,可以反应土壤养分(尤其是氮、磷)转化的强度和方向,施肥增加土壤养分含量而导致土壤酶活性增强[15,22-23]。蔗糖酶、脲酶和磷酸酶是土壤中常见的 3 种水解酶,分别是土壤有机质、氮、磷代谢的专一酶,而过氧化氢酶是一种重要的土壤氧化还原酶,可反映土壤中总的生物呼吸强度,表征土壤微生物活性强度。本研究表明,从季节动态变化来看,土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性,从 5 月份到 10 月份总体趋势是先升高后降低,最大值出现在 7、8 月份,可能是由于植物在这一时期新陈代谢旺盛,土壤含水量、通气性和温度状况都比较适宜,土壤生物化学作用和微生物活动旺盛,微生物和根系代谢加强,分泌产生更多的酶[[7, 24-25]。而土壤磷酸酶从 5 月份到 10 月份总体变化趋势是先降低后上升,但是变化幅度不大,最小值出现在 7、8 月份,平均在 0.21 ～ 0.29 mg/g 之间波动,这与杨成德等[26]研究结果一致,但大多数研究结果表明, 7、8 月份土壤磷酸酶增加[7, 27]可能与土壤类型、微生物活动的复杂性有关,具体原因有待进一步探究。从不同施肥处理来看,施肥显著提高了土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶的活性,与对照相比,蔗糖酶活性大小为 N1P > N2P > N1 > P > N2,磷酸酶为 N2P > N1 > N1P > N2 > P,脲酶为 N2P > N1P > N1 > N2 > P,而过氧化氢酶却表现为降低,降低幅度为 N2P > N2 > N1P > P > N1,则酶活性为 N1 > P > N1P > N2 > N2P,但是降幅不是很大。施肥可以提高土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶的活性,其原因可能是施肥可以促进根系代谢,使根系分泌物增多,微生物繁殖加快,从而有利于提高土壤酶活性,与王渭玲等[28]、张长华等[29]的研究结果一致,而土壤过氧化氢酶活性施肥后反而降低,说明施肥不能增强土壤过氧化氢酶活性,有小幅下降,这与孙瑞莲等[30]研究结果一致,但也有很多文献报道施肥可以提高土壤过氧化氢酶活性[31-32],可能是由于研究的土壤类型、施肥方式和肥料用量不同所致,具体原因有待进一步探究。同时,施肥也会对土壤微生物产生影响,因为土壤养分和土壤微生物主要集中在 0—20 cm 土层,本研究所选取的 20 年华北落叶松林地处于地力衰退阶段,通过施肥提高了林地土壤肥力,则土壤微生物数量也可能会相应地提高[33-34],但是土壤微生物数量与研究地的土壤环境、施肥种类和施肥量有关[35],因此,土壤中细菌、

放线菌和真菌数量具体是如何变化以及它们在不同施肥处理间有什么差异,有待后续试验进一步探究。但总的来说施肥使土壤蔗糖酶、脲酶和磷酸酶活性增强,其中以 N1P 和 N2P 配施效果最明显,林地土壤肥力提高,对缓解华北落叶松人工林地力衰退具有重要作用。

土壤肥力状况与林木生长相互影响,土壤肥力是影响林木生长的重要因素,而林木生长反过来也可以影响土壤肥力状况。虽然外源施入的氮、磷肥一部分由于淋失、挥发以及被土壤固定成为不可利用的形态而不能被植物完全吸收、利用[36],但从土壤综合肥力水平的分析来看,施肥能有效改善林地土壤肥力,并且 N1P > N2P > P > N1 > N2 > CK,说明不同处理肥效有所差异,N1P 和 N2P 能大幅提高土壤肥力,尤其是 N1P,与对照相比土壤肥力水平增加 1.505,确定为最佳施肥方案,而 N2P 次之。另外,虽然该地土壤(0—20 cm)中度缺氮,极度缺磷,但是各施肥处理使土壤速效氮增加 40.4% ~ 746.2%,而使土壤速效磷增加 19.1% ~ 50.7%,土壤的供氮能力较供磷能力提升大,与前人关于磷肥当季利用率低于氮肥的结果一致[37]

施肥使林地土壤养分增加,土壤酶活性增强,土壤肥力水平不同程度地提高,初步缓解了华北落叶松人工林地氮、磷亏缺导致的土壤质量下降、地力衰退等问题,但土壤养分和酶活性之间存在着复杂的联系,受光照、水分和地理位置等多种因素的影响,本研究所得结论能初步反映施肥对林地土壤肥力的改善效果,但具有一定的局限性。今后的研究工作中,仍需重点开展土壤养分、酶活性季节变化特征以及后续监测其年变化特征,可以为长期维持华北落叶松人工林地生产力、恢复地力提供科学依据。

参考文献:

[1] 张建国, 盛炜彤, 熊有强, 万细瑞. 施肥对盆栽杉木苗土壤养分含量的影响[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 44-50.
Zhang J G, Sheng W T, Xiong Y Q, Wan X R. Effect of fertilization on soil nutrient content of potted Chinese fir seedling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(4): 44-50.

[2] Vitousek P. M, Howarth R. W. Nitrogen limitation on land and in the Sea: How can it occur? [J]. Biogeochemistry, 1991, 13(2): 87-115.

[3] Cassman K G, Kropff M J, Gaunt J, Peng S. Nitrogen use efficiency of rice reconsidered: what are the key constraints? [J]. Plant and Soil, 1993, 155-156(1): 359-362.

[4] Crawford N. M, Glass D M A. Molecular and physiological aspects of nitrate uptake in plants[J]. Trends in Plant Science, 1998, 3(10): 389-395.

[5] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1992.
National Soil Survey Office. Soil survey and technology of China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1992.

[6] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
Bao S D. Soil agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 34-110.

[7] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzyme and its research methods [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1986: 57-323.

[8] 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[J]. 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 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998, 9(6): 581-586.

[9] Rennenberg H, Wildhagen H, Ehlting B. Nitrogen nutrition of poplar trees[J]. Plant Biology, 2010, 12(2): 275-291.

[10] 陈钦程, 徐福利, 王渭玲, 程治文. 秦岭北麓不同林龄华北落叶松土壤速效钾变化规律[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, (25): 1244-1250.
Chen Q C, Xu F L, Wang W L, Cheng Z W. Seasonal dynamics in soil content of available K for different ages of Larix Principis-rupprechtii in the northern foot of the Qinling[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2014, (25): 1244-1250.

[11] 李俊清, 宫伟光. 东北主要造林树种的营养元素含量特征分析[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1991, 15(4): 380-385.
Li J Q, Gong W G. Characteristic analysis of nutrient contents of major tree species in Northeast China[J]. Acta Phytoecologica Et Geobotanica Sinica, 1991, 15(4): 380-385.

[12] 郭蓓, 刘勇, 李国雷, 等. 飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的响应[J]. 林业科学, 2007, 43(07): 128-133.
Guo B, Liu Y, Li G L, et al. Response of soil enzyme activity to thinning intensity of aerial seeding *Pinus tabulaeformis* stands [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(07): 128-133.

[13] 许翠清, 陈立新, 颜永强, 纪萱. 温带森林土壤铵态氮、硝态氮季节动态特征[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(10): 19-21.
Xu C Q, Chen L X, Yan Y Q, Ji X. Seasonal dynamic characteristics of ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen contents in soils in temperate forests[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2008, 36(10): 19-21.

[14] 杨振安, 宋双飞, 李靖, 等. 不同龄林华北落叶松人工林根系特征和氮磷养分研究[J]. 西北植物学报, 2014, 34(7): 1432-1442.
Yang Z A, Song S F, Li J *et al*. A study on root characteristics and nutrients of different aged *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantations [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia sinica, 2014, 34(7): 1432-1442.

[15] 刘勇, 李国雷, 林平, 等. 华北落叶松人工幼、中龄林土壤肥

力变化[J]. 北京林业大学学报，2009，(3)：17-23.
Liu Y, Li G L, Lin P *et al*. Changes of soil fertility in young and middle aged *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2009, (3): 17-23.

[16] 马红亮，王杰，高人，等. 施用铵态氮对森林土壤硝态氮和铵态氮的影响[J]. 土壤，2011，43(6)：910-916.
Ma H L, Wang J, Gao R *et al*. Effect of ammonium application on contents of nitrate and ammonium nitrogen in forest soil[J]. Soils, 2011, 43(6): 910-916.

[17] 潘瑞炽. 植物生理学(第六版)[M]. 北京：高等教育出版社，2008.
Pan R C. Plant physiology(Sixth edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[18] Bolland M D A, Weatherley A J, Gilkes R J. The long-term residual value of rock phosphate and superphosphate fertilizers for various plant species under field conditions[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1989, 20(2): 89-100.

[19] Mercik S, Nemeth K. Effects of 60-year N, P, K and Ca fertilization on EUF-nutrient fractions in the soil and on yields of rye and potato crops[J]. Plant and Soil, 1985, 83(1): 151-159.

[20] 李银水，鲁剑巍，廖星，等. 磷肥用量对油菜产量及磷素利用效率的影响[J]. 中国油料作物学报，2011，33(1)：52-56.
Li Y S, Lu J W, Liao X et al. Effect of phosphorus application rate on yield and fertilizer-phosphorus utilization efficiency in rape seed[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2011, 33(1): 52-56.

[21] 张秀娟，吴楚，梅莉，等. 水曲柳和落叶松人工林根系分解与养分释放[J]. 应用生态学报，2006，17(8)：1370-1376.
Zhang X J, Wu C, Mei L *et al*. Root decomposition and nutrient release of *Fraxinus manshurica* and *Larix gmelinii* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8): 1370-1376.

[22] 袁玲，杨邦俊，郑兰君，刘学成. 长期施肥对土壤酶活性和氮磷养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报，1997，3(4)：300-306.
Yuan L, Yang B J, Zheng L J, Liu X C. Effects of long-term fertilization on enzymatic activities and transformation of nitrogen and phosphorus in soil[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 1997, 3(4): 300-306.

[23] 齐高强，耿增超，周锋利. 秦岭南坡火地塘林区华北落叶松人工林土壤酶活性研究[J]. 西北农林科技大学学报，2005，33(3)：81-84.
Qi G Q, Gen Z C, Zhou F L. Study on the activity of soil enzymes in *Larix pincipis-rupprechtii* stands at Huo Di Tang on the south slope of the Qinling mountains[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2005, 33(3): 81-84.

[24] 彭小兰，王德建，王灿，等. 长期不同施肥处理对麦季土壤酶活性的影响[J]. 中国农学通报，2013，29(33)：200-206.
Peng X L, Wang D J, Wang C *et al*. Effect of long-term different fertilizations on soil enzyme activities at panicle and harvest stage of wheat[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(33): 200-206,

[25] 李娟，赵秉强，李秀英，So Hwat Bing. 长期不同施肥条件下土壤微生物量及土壤酶活性的季节变化特征[J]. 植物营养与肥料学报，2009，15(5)：1093-1099.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, Bing S H. Seasonal Variation of soil microbial and soil enzyme activities in different long-term fertilizer regimes[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2009, 15(5): 1093-1099.

[26] 杨成德，龙瑞军，薛莉，等. 东祁连山高寒草本草地土壤微生物量及酶的季节动态[J]. 中国草地学报，2014，36(2)：78-84.
Yang C D, Long R J, Xue L *et al*. Seasonal dynamic of soil microbial biomass and enzymatic activities in alpine grasslands of the Eastern Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(2): 78-84.

[27] 王艮梅，罗琳琳，郑聚锋. 苏北不同代次和林龄杨树人工林土壤酶活性季节变化特征[J]. 南京林业大学学报，2014，38(4)：45-50.
Wang G M, Luo L L, Zheng J F. Seasonal dynamics characteristics of soil enzyme activities of poplar plantation with different stand ages and rotations[J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2014, 38(4): 45-50.

[28] 王渭玲，杜俊波，徐福利，张晓虎. 不同施肥水平对桔梗土壤微生物和土壤酶活性的影响[J]. 中国中药杂志，2013，38(22)：3851-3856.
Wang W L, Du J B, Xu F L, Zhang X H. Effect of fertilization levels on soil microorganism amount and soil enzyme activities [J]. China Journal of Chinese Material, 2013, 38(22): 3851-3856.

[29] 张长华，蒋卫，蒋玉梅，等. 施肥对烤烟产量、品质及土壤养分、酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料，2012，(3)：77-80.
Zhang C H, Jiang W, Jiang Y M *et al*. Influence of fertilization on the yield and quality of flue-cured tobacco, soil nutrient and enzyme activity[J]. Soil and Fertilizer Sciences in china, 2012, (3): 77-80.

[30] 孙瑞莲，赵秉强，朱鲁生，等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(4)：406-410.
Sun R L, Zhao B Q, Zhu L S *et al*. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2003, 9(4): 406-410.

[31] 李慧杰，徐福利，林云，栾晓波. 施用氮磷钾对黄土丘陵区山地红枣林土壤酶与土壤肥力的影响[J]. 干旱地区农业研究，2012，30(4)：53-59.
Li H J, Xu F L, Lin Y, Luan X B. Effects of N, P and K fertilization on soil enzyme activities and soil fertility in mintane Jujube forest of hilly loess region[J]. Agriculture Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 53-59.

[32] 王才斌，郑亚萍，梁晓艳，等. 施肥对旱地花生主要土壤肥

力指标及产量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1300-1307.

Wang C B, Zheng Y P, Liang X Y *et al*. Effects of fertilization on soil fertility indices and yield of dry-land peanut[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(4): 1300-1307.

[33] 余晓章, 杨正菊, 李贤伟, 等. 施肥对川中丘陵杨树人工林土壤生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(3): 618-624.

Yu X Z, Yang Z J, Li X W *et al*. Effects of fertilization on soil biological activity for polar plantation in Sichuan Hilly Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(3): 618-624.

[34] Zhong W H, Gu T, Wang W *et al*. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. Plant and Soil, 2010, 326(1): 511-522.

[35] 樊晓刚, 金轲, 李兆君, 荣向农. 不同施肥和耕作制度下土壤微生物多样性研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 744-751.

Fan X G, Jin K, Li Z J, Rong X N. Soil microbial diversity under different fertilization and tillage practices: A review[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 744-751.

[36] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 450-459.

Yan X, Jin J Y, He P, Liang M Z. Recent advance in technology of increasing fertilizer use efficiency[J]. Scientia Agriculture Sinica, 2008, 41(2): 450-459.

[37] 朱兆良. 我国土壤供氮和化肥氮去向研究的进展[J]. 土壤, 1985, 17(1): 2-91.

Zhu Z L. Research progresses on the fate of soil N supply and applied fertilizer N in China[J]. Soils, 1985, 17(1): 2-91.

[38] 杨宁, 邹冬生, 杨满元, 等. 衡阳紫色土壤土丘陵坡地不同植被恢复阶段土壤酶活性特征研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1516-1524.

Yang N, Zou D S, Yang M Y *et al*. Soil enzyme activities in different re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in Hengyang of Hunan Province, China[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2013, 19(6): 1516-1524.

[39] 叶协锋, 杨超, 李正, 敬海霞. 绿肥对植烟土壤酶活性及其土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料报, 2013, 19(2): 445-454.

Ye X F, Yang C, Li Z, Jing H X. Effects of green manure in corporation on soil enzyme activities and fertility in tobacco-planting soils[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 445-454.