

不同土地利用类型对火烧迹地土壤养分的影响*

李季芳¹, 段红平², 阮桢媛³, 乔璐^{3**}, 谭少清⁴

(1. 中国科学院西双版纳热带植物园 生物地球化学实验室, 云南 昆明 650223;

2. 云南农业大学 资源与环境学院, 云南 昆明 650201;

3. 云南林业职业技术学院 林下经济创新重点实验室, 云南 昆明 650224;

4. 云南未济农业有限公司, 云南 昆明 650000)

摘要:【目的】揭示不同土地利用类型对次生林火烧迹地的土壤养分的影响。【方法】以核桃林、桉树林和撂荒的火烧迹地 3 种不同土地利用类型为研究对象, 测定土壤 pH 值、有机质、全氮、水解氮、全磷、有效磷等 15 个特性指标, 并对各土壤指标进行统计分析。同时, 根据养分分级标准对 3 种土地类型的土壤肥力进行评估。【结果】3 种土地利用类型之间, Cu 的含量无显著差异 ($P>0.05$), 水解氮和速效钾的含量差异显著 ($P<0.05$), 其他土壤养分含量以及 pH 值、C/N 的差异达到了极显著 ($P<0.01$)。按土壤养分分级标准, 除撂荒地有效磷含量处于“最缺乏”的等级外, 3 种土地类型的各项土壤养分指标均可归到适宜及以上级别。【结论】森林火烧后, 核桃林、桉树林和撂荒对土壤养分的恢复有显著差异。

关键词: 土地利用类型; 土壤养分; 火烧迹地; 核桃林; 桉树林

中图分类号: S 714.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 04-0725-06

Effects of Different Land Use Types on the Surface Soil Nutrients in Burned Area

LI Jifang¹, DUAN Hongping², RUAN Zhenyuan³, QIAO Lu³, TAN Shaoqing⁴

(1. Biogeochemical Cycling Laboratory, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden,

Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China;

2. Resource and Environment Faculty, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

3. Key Creative Laboratory for Agroforestry, Yunnan Forestry & Technological College, Kunming 650224, China;

4. Yunnan Germinating and Vigorous Agricultural Limited Company, Kunming 650000, China)

Abstract: [Purpose] For the sake of discovering the effects of different land use types on soil nutrient characters in burned area. [Methods] Three different land use types which consisted of walnut plantation, eucalyptus plantation and abandoned burned area were selected, then 15 traits of soil samples from three land use types were assayed and statistically analyzed, which are pH value (pH), organic matter (OM), total nitrogen (TN), hydrolyzable nitrogen (HN), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), total potassium (TK), available potassium (AK), total calcium (TCa), total magnesium (TMg), total manganese (TMn), total sulfur (TS), total copper (TCu), total zinc (TZn), ra-

收稿日期: 2018-04-26

修回日期: 2019-01-21

网络首发时间: 2019-07-18 15:19:26

*基金项目: 云南林业职业技术学院科研项目[KY(BS)201403]; 林业行业职业教育教学指导委员会科研项目(201602)。

作者简介: 李季芳(1982—), 女, 云南西双版纳人, 硕士, 高级实验师, 主要从事森林养分循环等研究工作。E-mail: 327510497@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 乔璐(1979—), 女, 河北邢台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态学、森林生态学研究。E-mail: qiaoqiaotantan@163.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20190718.0922.001.html>



tio of carbon to nitrogen(C/N). Meanwhile, soil fertility of three land use types was evaluated according to nutrients rank standards. [**Results**] Only soil TCu contents were not significantly different among three land use types. The significant level of soil HN and AK contents were 0.05, and the significant level of the other soil element contents, pH and C/N even reached 0.01. Most soil nutrient contents of all three land use types can be attributed to suitable or higher rank except for soil AP contents in abandoned area which can only be attributed to extremely scarce. [**Conclusion**] The present results demonstrated that restoration effects on burned area differed significantly among these three land use types.

Keywords: land use types; soil nutrients; burned area; walnut plantation; eucalyptus plantation

土壤提供了许多重要的生态系统服务, 例如提供食物和木材、调节气候、控制洪水、改善空气和水质量、减少土壤侵蚀以及保护生物多样性^[1]。然而由于地球人口急剧增加, 人类对土地的干扰加剧, 有研究表明: 人类直接改变的土地面积超过地球上半数的非冰雪覆盖面积^[2]。土地利用是人类最直接干预自然的活动^[3], 是影响土壤肥力变化最普遍、最直接、最深刻的因素^[4]。在不同土地利用类型下, 地面覆被不同, 对土壤养分的富集、再分配流失的作用也不同: 一方面不合理耕作、滥用肥料、刀耕火种及各种因素引起的森林火灾等, 会造成土壤中酸沉降、重金属释放^[5]、土地盐渍化等生态环境恶化; 另一方面人类对植被的快速恢复也有利于改善土壤养分^[6]。

林火可对土壤的物理、化学、矿物学、生物学等性质造成影响, 严重的火灾会导致土壤养分大量流失, 并引起土壤结构退化及土壤侵蚀, 使得土壤无脊椎动物和微生物的数量及结构都发生显著变化^[7]。若火灾后植被能较快恢复, 则有利于改善土壤养分状况^[6]。因此, 对火灾后的撂荒地进行植被恢复对减少水土流失、重建生态系统及其功能至关重要。重建的植被类型不同, 对土壤的影响也截然不同^[5, 8-11]。例如森林及草原转化为农田和牧场, 会导致土壤碳及养分流失以及生物多样性变化^[5]; 而牧场转换为森林 15 年后, 土壤微生物含量增加, 真菌/细菌比值升高, 蚯蚓减少^[8]。森林、草原转化为生产生物燃料的农田时, 温室气体排放至少增加了 50%^[10]。不同树种对土壤的影响在海拔梯度的协同作用下也存在很大差异^[10]。本文研究了火烧后撂荒地种植核桃林、桉树林之后的土壤养分状况, 旨在探讨火烧后不同土地利用类型对土壤性质的影响, 为森林火灾后

的土地利用规划管理提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于云南省祥云县东郊, 距离祥云县城 12 km, 地处 E100°68', N25°49', 海拔 1 980 m。属北亚热带偏北高原季风气候区, 常年平均气温 14.7 ℃, 1 月平均气温 8.1 ℃, 7 月平均气温 19.7 ℃, 年均降雨量 810.8 mm。该区域于 2004 年发生火灾, 灾前植被主要为云南松次生林, 土壤类型主要为红壤和棕壤; 灾后有部分地块种植了桉树 (*Eucalyptus uraphylla*) 和核桃 (*Juglans regia* Linn.)。研究取样时, 桉树人工林林龄约 9 年, 核桃人工林林龄为 8 年。桉树林与核桃林的种植密度为 15~20 株/667 m²。桉树和核桃种植前都为撂荒地。火烧后的撂荒地有极为稀疏的草本生长, 盖度不超过 5%。

1.2 土壤取样样地的设置

在核桃林、桉树林及撂荒火烧迹地的典型地块设置土壤取样的样地, 每个土地类型设置 3 个 20 m×20 m 的标准样地, 在每个样地的四角及中心分别取样, 则每块样地共 5 个土样, 每个土地类型共 15 个土样; 每个取样点大小为 1 m², 将取样点的四角和中心点的土壤混合为 1 个样品。土壤取样的土层为矿质土层 0~20 cm, 即显著受到火灾影响的土层。

1.3 土壤样品的处理及测定^[12]

土壤取样完成后, 尽快带回实验室, 在阴凉通风处风干。风干后捡去土样中的石块、动植物残体, 研磨后分别过 2 mm 和 0.125 mm 的土壤筛。过 2 mm 土壤筛的土样用于测定水解氮、有效磷和速效钾; 过 0.125 mm 土壤筛的土样用于

测定全量养分。本研究测定的大量元素包括有机质、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷和速效钾;中量元素包括全钙、全镁;微量元素养分包括全量的锰、硫、铜、锌。测定方法如下:pH用电位法测定;水解氮用碱解—扩散法测定;有效磷用盐酸氟化铵浸提—连续流动分析仪测定;速效钾用乙酸铵浸提—电感耦合等离子体发射光谱仪测定;有机质用重铬酸钾氧化—外加加热法测定;全氮用元素分析仪(Elementer VARIO Macro, Germany)测定;全量的钾、钙、镁、铁、锌、铜、硫等用酸溶法—电感耦合等离子体发射光谱仪测定。

1.4 土壤肥力分级

采用第二次全国土壤普查的养分分级标准^[13](表1)进行分级。

表1 第二次全国土壤普查的养分分级标准

Tab. 1 Nutrients rank standards of the second national soil extensive investigation

有机质/(g·kg ⁻¹) OM	全氮/(g·kg ⁻¹) TN	全磷/(g·kg ⁻¹) TP	全钾/(g·kg ⁻¹) TK	水解氮/(mg·kg ⁻¹) HN	有效磷/(mg·kg ⁻¹) AP	速效钾/(mg·kg ⁻¹) AK	分级 rank	计分 score
>40	>2	>1	>25	>150	>40	>200	极丰富 extremely abundant	6
30~40	1.5~2	0.8~1	20~25	120~150	20~40	150~200	丰富 abundant	5
20~30	1~1.5	0.6~0.8	15~20	90~120	10~20	100~150	最适宜 most suitable	4
10~20	0.75~1	0.4~0.6	10~15	60~90	5~10	50~100	适宜 suitable	3
6~10	0.5~0.75	0.2~0.4	5~10	30~60	3~5	30~50	缺乏 scarce	2
<6	<0.5	<0.2	<5	<30	<3	<30	极缺乏 extremely scarce	1

表2 3种土地利用类型土壤养分含量(w)、pH及C/N(mean±SD)

Tab. 2 Soil nutrient contents (w), pH value and ratio of carbon to nitrogen in all three land use types

土壤特征 soil traits	核桃林 walnut plantation	桉树林 eucalyptus plantation	撂荒地 abandoned burned area
有机质/(g·kg ⁻¹) OM	25.62±6.44 B	40.34±9.56 A	36.37±5.07 A
全氮/(g·kg ⁻¹) TN	1.61±0.16 B	1.89±0.32 A	2.02±0.18 A
全磷/(g·kg ⁻¹) TP	0.70±0.13 B	0.83±0.10 A	0.61±0.07 C
全钾/(g·kg ⁻¹) TK	17.51±3.25 B	13.07±2.02 C	20.60±1.06 A
水解氮/(mg·kg ⁻¹) HN	92.86±42.02 a	64.61±18.90 b	71.87±19.15 ab
有效磷/(mg·kg ⁻¹) AP	6.19±10.25 AB	15.23±10.97 A	1.41±0.66 B
速效钾/(mg·kg ⁻¹) AK	116.02±79.78 b	181.20±73.83 a	120.53±43.13 b
全钙/(g·kg ⁻¹) TCa	0.90±0.35 B	2.09±1.36 A	0.52±0.14 C
全镁/(g·kg ⁻¹) TMg	3.47±0.25 A	2.18±0.19 C	3.05±0.14 B
全锰/(mg·kg ⁻¹) TMn	498.92±368.11 A	697.77±199.05 A	167.31±65.91 B
全硫/(mg·kg ⁻¹) TS	148.63±33.08 A	165.95±55.14 A	90.69±17.93 B
全铜/(mg·kg ⁻¹) TCu	45.63±11.10	49.81±19.75	45.71±3.59
全锌/(mg·kg ⁻¹) TZn	78.67±6.60 A	84.35±30.71 A	53.66±3.80 B
pH	4.90±0.41 B	6.07±0.64 A	5.04±0.11 B
碳氮比 C/N	9.13±2.30 B	12.14±1.59 A	10.40±0.66 B

注:同一行的不同小写字母表示差异达5%显著水平,不同大写字母表示差异达1%显著水平。

Note: Different lowercase letters in the same lines indicate significant difference at 5% level and capital letters indicate significant difference at 1% level.

1.5 统计分析方法

应用 Excel 2007 进行数据整理,运用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析及多重比较。

2 结果与分析

2.1 各土地利用类型的土壤养分

由表1、2可知:除撂荒地有效磷处于“极缺乏”等级外,3种土地类型的全氮、全磷、全钾、有机质、水解氮及速效钾均可达到“适宜”及以上级别,说明研究区整体的养分状况较好,有利于后期的植被恢复。将3种土地利用类型土壤养分的得分进行整理(表3)可知:桉树林的综合得分最高,核桃林的得分虽然与撂荒地相同,但标准差和变异系数不同,撂荒地得分的变异程度大于

核桃林。撂荒地有效磷的得分为 1，处于养分分级中的“最缺乏”等级，而全氮含量却达到“极丰富”级别，养分供给极不均衡；核桃林的 7 个养分指标中，有 5 个处于“最适宜”级别，全氮含量为“丰富”，有效磷含量为“适宜”，仍处于养分供给较好的层级。

表 3 3 种土地利用类型土壤养分得分

Tab. 3 Scores of soil nutrients among three land use types

指标 index	核桃林 walnut plantation	桉树林 eucalyptus plantation	撂荒地 abandoned burned area
有机质 OM	4.00	6.00	5.00
全氮 TN	5.00	5.00	6.00
全磷 TP	4.00	5.00	4.00
全钾 TK	4.00	3.00	5.00
水解氮 HN	4.00	3.00	3.00
有效磷 AP	3.00	4.00	1.00
速效钾 AK	4.00	5.00	4.00
总分 total score	28.00	31.00	28.00
平均分 average score	4.00	4.43	4.00
标准差 SD	0.58	1.13	1.63
变异系数 CV	0.14	0.26	0.41

2.2 不同土地利用类型土壤 pH

不同土地利用类型的土壤 pH 为桉树林>撂荒地>核桃林 (表 2)。由表 4 可知：pH 与土壤养分存在着显著或极显著的相关关系，说明土壤有机质的分解、土壤养分状态的释放、转化、迁移与土壤 pH 有关。

2.3 不同土地利用类型大量元素

由表 2 可知：有机质、全氮、全磷、全钾、水解氮、有效磷和速效钾等 7 种大量元素的含量在 3 种土地利用类型之间存在差异。

有机质含量为桉树林>撂荒地>核桃林，桉树林与撂荒地之间无显著差异。本研究中桉树林及核桃林栽培的时间均不长，地表凋落物层薄，有机质积累少；且核桃林经历过翻耕等管理措施，对表层的养分扰动较大，有机质未能得到一定的

积累，故造成林地的有机质积累并未显著高于撂荒地的现象。

全氮含量为撂荒地>桉树林>核桃林，撂荒地与桉树林之间无显著差异。核桃和桉树栽植后，对土壤氮的大量吸收，降低了土壤氮的含量。

全磷含量为桉树林>核桃林>撂荒地。在桉树林及核桃林栽植后，两者凋落物的回归对于磷含量的维持起到一定作用；同时，由于两类人工林栽培时间不长，仍以营养生长为主，未进入盛果期，对磷元素的需求量也未达到峰值，因而这两个土地利用类型磷含量极显著高于撂荒地。

全钾含量为撂荒地>核桃林>桉树林。火烧后土壤钾会大量流失，且虽然桉树林及核桃林已种植一段时间，但植株的生长本身会消耗一定的钾元素，因而对土壤钾元素的恢复并未表现出积极作用。

就速效养分而言，撂荒地的土壤水解氮含量与核桃林和桉树林都无显著差异，但桉树林显著低于核桃林 ($P<0.05$)。桉树为速生树种，种植后快速吸收利用土壤中的有效氮，造成桉树林的水解氮含量在 3 种土地类型中最低。桉树林的土壤有效磷高于核桃林并极显著高于撂荒地 ($P<0.01$)，含量高低与土壤全磷含量相似。桉树林的速效钾含量显著高于核桃林和撂荒地 ($P<0.05$)，核桃林虽高于撂荒地，但两者间无显著差异。撂荒地的全磷含量在 3 种土地利用类型中最低，因而有效态含量也较低。桉树林中速效钾含量高，有利于桉树生长；桉树的迅速生长使得土壤钾含量减少，加之未得到及时补充，所以造成速效钾含量虽位居最高，但全钾含量在 3 种土地利用类型中最低。

2.4 不同土地利用类型 C/N 比较

由表 2 可知：桉树林的土壤 C/N 极显著高于核桃林和撂荒地 ($P<0.01$)，后两者之间没有显著差异。3 种土地利用类型的 C/N 在 9~13 之间，高于亚热带地区红、黄壤的一般水平，接近湿润温带土壤 10~12 的比值范围。

表 4 pH 与土壤养分的相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of pH value with soil nutrient contents

指标 index	有机质 OM	全磷 TP	全钾 TK	全钙 TCa	全镁 TMg	水解氮 HN	有效磷 AP	速效钾 AK	全锰 TMn	全硫 TS
pH	0.445**	0.481**	-0.653**	0.743**	-0.661**	-0.376*	0.587**	0.406**	0.503**	0.375*

注：“*”表示显著相关 ($P<0.05$)，“**”表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: “*” indicates statistically significant correlation ($P<0.05$), “**” indicate statistically extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.5 不同土地利用类型土壤中量及微量元素特征比较

除铜的含量在3种土地利用类型之间没有显著差异($P=0.606$)外,其他土壤中量及微量元素养分含量的差异都达到了极显著(表2)。中量元素中,全钙含量为桉树林>核桃林>撂荒地,全镁含量为核桃林>撂荒地>桉树林;微量元素锰、硫、锌的含量,均表现出核桃林和桉树林显著高于撂荒地,核桃林和桉树林之间没有显著差异。说明火灾后钙、镁元素及微量元素可能会随雨水淋失,在恢复过程中不同植被的生长需求使得3种土地利用方式之间土壤养分存在差异,所以植被恢复对于土壤钙、镁元素及微量元素含量的恢复有积极作用。

3 讨论

研究表明:火烧后不同土地利用类型对土壤的影响存在着显著差异。本研究中,桉树林的土壤有机质、全氮、全磷、速效钾、全钙含量及C/N显著或极显著高于核桃林,而核桃林的土壤全钾、水解氮、全镁含量显著或极显著高于桉树林,说明火灾后采用不同的恢复植被,土壤养分存在着不同的变化趋势。C/N是重要的生态化学计量特征,土壤有机质C/N与其分解速度成反比关系^[14]。桉树林较高的土壤C/N意味着有机质分解速率慢于其他2个土壤利用类型,这可能是桉树林有机质、全氮、全磷等含量高于核桃林的内在因素。其他研究中也存在着不同植被或不同恢复时期其恢复效果不同的情况,例如:在大兴安岭林区严重火烧迹地,樟子松林的土壤有机质含量显著低于兴安落叶松林、白桦林和山杨林,山杨林的土壤全氮含量显著高于樟子松林,白桦林的土壤有效磷显著高于樟子松林与山杨林^[15];同样在大兴安岭林区,不同火烧年限后,地上植被处于不同的演替阶段,针阔混交时期的矿质土壤碳、氮、磷含量都相应地高于针叶纯林时期^[16]。同一植被在不同的恢复时期,土壤养分也处于动态变化中。孙毓鑫等^[17]研究发现:火烧后初期(3年)桉树林的土壤有机质、氮、磷等养分都显著降低,这是由于火烧养分损失和桉树快速生长造成的。与之相比,本研究中桉树林已栽种10年,土壤养分得到一定程度的恢复,桉树林的土壤全磷、有效磷、速效钾含量均显著或极显著

高于撂荒地,有机质、全氮、水解氮含量在两者之间没有显著差异,仅桉树林的土壤全钾含量低于撂荒地。

3种土地利用类型中,撂荒地的13种土壤养分含量并非最低,这可能由于本研究取样时,该区域已经历火灾逾10年,土壤养分状况与刚经历火灾时已发生较大改变,整体可能表现出恢复的趋势^[18]。与有林地(整合桉树林和核桃林)相比,撂荒地的土壤全磷、有效磷、速效钾、全钙、全镁、全锰、全硫、全锌的含量较低。有植被的土地利用类型与裸地相比,土壤孔隙度、含水量都能有所增加,并显著降低地表径流和土壤侵蚀^[19-20],减少了养分在径流和侵蚀中的损失。核桃林的土壤养分含量总体来说低于桉树林,可能以下几点原因:一是核桃林土层近期内受到人为管理措施的扰动;二是核桃林已开始挂果,养分的需求量很大,从而导致养分含量快速消耗。因此,采用核桃林对火烧后的撂荒山地进行植被恢复,须加强水肥管理,或间作其他作物如牧草等;前者可使土壤养分保持在比较稳定的状态,而后者对于减少水土和养分流失有积极意义。桉树植被增强了土壤的斥水性^[21],导致土壤含水量下降、土壤孔隙度下降、持水能力降低^[22]。同时桉树对有机质的消耗往往高于针阔叶树^[23],因此,造林时对桉树的选择仍需慎重。如果考虑桉树的经济收益,同样也需考虑补充由于桉树快速生长而引起的养分耗损,另外一方面可考虑与其他林木混种(如豆科植物),可有利于氮素的供应;或发展林下植被,减少雨水对表土的冲刷。

此外,由于土壤微量元素含量低,对植物生长的重要性不及大量元素,目前有关火烧后土壤微量元素变化的研究较少^[24],故火烧对其时空动态的影响尚不清楚。由于不同物种对微量元素有其特定需求,今后的研究中可根据所选的恢复物种有针对性地进行微量元素的监测与研究。

综上所述,火灾后的植被恢复和生态系统重建,须考虑火烧对土壤理化性质造成的影响,掌握其时空动态变化,并进行合理的人为管理,在兼顾经济效益的前提下,依据不同的功能要求,选择较为适宜的物种和方式进行植被恢复,避免土壤肥力下降,确保健康的土壤生态系统,以期达到生态和经济效益的整合。

[参考文献]

- [1] SMITH P, COTRUFO M F, RUMPEL C, et al. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils[J]. *Soil Discussions*, 2015, 1(2): 537. DOI: [10.5194/soil-1-665-2015](https://doi.org/10.5194/soil-1-665-2015).
- [2] HOOKE R L, MARTÍN-DUQUE J F, PEDRAZA J. Land transformation by humans: a review[J]. *GSA Today*, 2012, 22(12): 4. DOI: [10.1130/GSAT151A.1](https://doi.org/10.1130/GSAT151A.1).
- [3] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 255. DOI: [10.3321/j.issn:0564-3929.2009.02.010](https://doi.org/10.3321/j.issn:0564-3929.2009.02.010).
- [4] 朱祖祥. 土壤学[M]. 北京: 农业出版社, 1983.
- [5] SMITH P, HOUSE J I, BUSTAMANTE M, et al. Global change pressures on soils from land use and management[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1008. DOI: [10.1111/gcb.13068](https://doi.org/10.1111/gcb.13068).
- [6] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1. DOI: [10.1007/s00442-004-1788-8](https://doi.org/10.1007/s00442-004-1788-8).
- [7] 张敏. 林火对土壤环境影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002.
- [8] CAVAGNARO T R. Life at the interface: above- and below-ground responses of a grazed pasture soil to reforestation[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 27. DOI: [10.1016/j.apsoil.2015.12.002](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.12.002).
- [9] SEARCHINGER T, HEIMLICH R, HOUGHTON R A, et al. Use of U.S. croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change[J]. *Science*, 2008, 319(5867): 1238. DOI: [10.1126/science.1151861](https://doi.org/10.1126/science.1151861).
- [10] ANTISARI L V, FALSONE G, CARBONE S, et al. Douglas-fir reforestation in North Apennine (Italy): performance on soil carbon sequestration, nutrients stock and microbial activity[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 86: 82. DOI: [10.1016/j.apsoil.2014.09.009](https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.09.009).
- [11] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] LY/T 12101275—1999. 森林土壤分析方法[S].
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [14] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054).
- [15] 辛颖, 赵雨森, 陈强. 大兴安岭火烧迹地植被恢复后土壤理化性质[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 41(8): 65. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2013.08.017](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2013.08.017).
- [16] 杨新芳, 鲍雪莲, 胡国庆, 等. 大兴安岭不同火烧年限森林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(5): 1359. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2016.05.030](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2016.05.030).
- [17] 孙毓鑫, 吴建平, 周丽霞, 等. 广鹤山火烧迹地植被恢复后土壤养分含量变化[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 513. DOI: [10.13287/j.1001-9332.2009.0104](https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.2009.0104).
- [18] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响[J]. *林业科学*, 2011, 47(2): 103. DOI: [10.3969/j.issn.1006-1126.2011.02.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-1126.2011.02.006).
- [19] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 5183. DOI: [10.5846/stxb201312253030](https://doi.org/10.5846/stxb201312253030).
- [20] ZHENG H, CHEN F L, OUYANG Z Y, et al. Impacts of reforestation approaches on runoff control in the hilly red soil region of Southern China[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1/2): 174. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2008.04.007](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.007).
- [21] WALDEN L L, HARPER R J, MENDHAM D S, et al. Eucalyptus reforestation induces soil water repellency[J]. *Soil Reserach*, 2015, 53(2): 168. DOI: [10.1071/SR13339](https://doi.org/10.1071/SR13339).
- [22] 赵筱青, 和春兰, 许新惠. 云南山地尾叶桉类林引种对土壤物理性质的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(11): 1810. DOI: [10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.11.006](https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2012.11.006).
- [23] 李国平, 张卫强, 张卫华, 等. 桉树林和针阔混交林对土壤理化性质的影响比较[J]. *广东农业科学*, 2014(20): 67. DOI: [10.16768/j.issn.1004-874x.2014.20.004](https://doi.org/10.16768/j.issn.1004-874x.2014.20.004).
- [24] 许鹏波, 屈明, 薛立. 火对森林土壤的影响[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(6): 1596. DOI: [10.13292/j.1000-4890.2013.0256](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.2013.0256).

责任编辑: 何馨成