

黄石铁尾矿废弃地刺槐人工林土壤肥力研究

杨振意¹, 许建新², 薛立¹, 许鹏波¹, 吴彩琼², 刘斌¹

(1 华南农业大学 林学院, 广东 广州 510642; 2 深圳市铁汉生态环境股份有限公司, 广东 深圳 518040)

摘要:用常规方法测定了覆盖混合基质的黄石铁尾矿废弃地的刺槐 *Robinia pseudoacacia* 人工林土壤的 pH 以及有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷和速效钾含量,用稀释平板法测定土壤固氮菌和解磷菌数量,分别用比色法、磷酸苯二钠比色法和高锰酸钾滴定法测定脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性. 结果表明,刺槐人工林下土壤 pH 比未种植植物的铁尾矿废弃地低 4.7%,土壤的有机质、全氮、全磷质量分数分别为 101.5、2.8 和 1.5 g · kg⁻¹,碱解氮、速效磷和速效钾质量分数分别为 130.7、16.2 和 201.8 mg · kg⁻¹,均极显著高于对照,而土壤的全钾含量比对照低 13.7%. 刺槐人工林土壤的自生固氮菌数量与解磷菌数量分别为 75.0 × 10⁵ 和 85.7 × 10⁵ cfu · g⁻¹,土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性分别为 2.7 g · kg⁻¹ · d⁻¹、317.6 mg · kg⁻¹ · h⁻¹ 和 4.6 mL · g⁻¹ · h⁻¹,均极显著高于对照. 可见,覆盖混合基质能够提高养分含量,促进刺槐的定居,而刺槐的生长进一步改善了土壤性质,促进了铁尾矿废弃地的生态恢复.

关键词:铁尾矿渣; 刺槐人工林; 土壤肥力; 生态恢复
中图分类号:S157 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-411X(2013)02-0219-05

Study on Soil Fertility of a *Robinia pseudoacacia* Plantation in an Abandoned Iron Tailing Area in Huangshi

YANG Zhenyi¹, XU Jianxin², XUE Li¹, XU Pengbo¹, WU Caiqiong², LIU Bin¹

(1 College of Forestry, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Shenzhen Techand Ecology & Environment Co. Ltd., Shenzhen 518040, China)

Abstract: Soil characteristics of a *Robinia pseudoacacia* plantation was investigated in an abandoned iron tailing area in Huangshi City to provide guidance for soil remediation of abandoned mine lands. Soil pH, organic matter, total N, total P, total K, alkali-hydrolyzable N, available P, and available K were determined by routine method, the number of diazotrophs and the phosphate-solubilizing bacteria number were determined by dilution plate method, and activities of soil urease, phosphatase and catalase were determined by colorimetry, disodium phenyl phosphate colorimetric method and titration with potassium permanganate, respectively. The contents of soil organic matter, total N, total P were 101.5, 2.8, 1.5 g · kg⁻¹, and alkali-hydrolyzable N, available P, and available K were 130.7, 16.2, 201.8 mg · kg⁻¹ respectively in the soil of the *R. pseudoacacia* plantation, which were significantly greater than those of the abandoned iron tailing without vegetation, while total K was lower by 13.7% compared with the control. The number of diazotrophs and phosphate-solubilizing bacteria were 75.0 × 10⁵ and 85.7 × 10⁵ cfu · g⁻¹ respectively, and activities of urease, phosphatase and catalase were 2.7 g · kg⁻¹ · d⁻¹, 317.6 mg · kg⁻¹ · h⁻¹ and 4.6 mL · g⁻¹ · h⁻¹, respectively, which were significantly greater than those of the controls. Soil structure of the abandoned iron tailing was improved and nutrient content was increased because of covering

mixed substrate, which facilitated the colonization of *R. pseudoacacia*, and the growth of *R. pseudoacacia* further improved soil properties and facilitated the ecological restoration of abandoned iron tailing.

Key words: iron tailing; *Robinia pseudoacacia* plantation; soil fertility; ecology restoration

尾矿砂是矿石经磨碎、精选后被遗弃的矿石提取残余物,主要成分以沙粒和粉粒为主,其基质不稳定,重金属含量高^[1]. 矿业尾矿占用了土地,所含有的矿物造成了资源浪费,并会污染周边环境,威胁着生态环境安全和居民健康^[2]. 植被重建不仅能够控制尾矿的危害,而且可以增加绿地面积,美化环境,被广泛应用于矿业废弃地的生态重建. 铁尾矿具有基质松散、粘结性差、养分贫瘠和保水保肥性能差的特点^[2],限制植物的定居. 因此,用于铁尾矿植被重建的植物需要耐贫瘠和较强的抗性. 刺槐 *Robinia pseudoacacia* 是豆科乔木,具有较强的适应性与抗逆性,被广泛应用于退化生态系统的生态恢复,例如,闫晗等^[1]、郝蓉等^[3]、张静雯等^[4]将刺槐用于煤矿废弃地的生态恢复,薛蕙等^[5]、胡婵娟等^[6]、王征等^[7]将刺槐用于黄土丘陵的植被重建,但是罕见刺槐应用于铁尾矿植被重建的报道. 土壤是植物生长的载体,土壤恢复是生态系统重建的关键步骤. 在采矿废弃地引种植物,能够提高土壤质量,进而推动重建生态系统的恢复演替. 本研究以生长在铁尾矿上的刺槐人工林土壤为研究对象,探讨刺槐人工林的营造对改善土壤生态环境的作用机制,以期今后矿山废弃地的土壤修复提供参考.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于黄石国家矿山公园景区(黄石市铁山景区),地理位置为 30°12'N, 114°55'E,属亚热带季风气候. 从 1958 年起,大冶铁矿累计在此排放废石 3 539 亿 t,占地 300 hm². 20 世纪 80 年代中期开始,大冶铁矿陆续投资几千万元,在矿业废渣堆积成的台地表面覆盖混合基质(混合基质由占比分别为 20% 的污泥、20% 的生活垃圾及 60% 的棕红壤组成),营造了 247 hm² 的刺槐林. 本研究调查的刺槐人工林林龄为 10 年,现存密度约为 2 000 株·hm⁻²,平均胸径 12.4 cm,树高 13.1 m,郁闭度为 85% 左右,生长状况良好. 同时另选一块相邻的铁尾矿废弃地覆盖相同的混合基质,但没有种植植物的裸露铁尾矿废弃地作为对照.

1.2 试验材料

于 2011 年 4 月在刺槐人工林样地(编号为 Rp)

和对照样地(编号为 CK)分别建立 3 块 20 m × 20 m 样地,用五点样点法对 0 ~ 20 cm 土壤进行混合取样,将土样分为两部分:一部分土样阴干后土壤化学性质和土壤酶活性分析^[8-9];另一部分装入无菌袋,放置于 4 °C 冰箱保鲜,用于微生物数量分析^[10].

1.3 试验方法

1.3.1 土壤化学性质测定 将水土以质量比 2.5:1.0 混合后用电位法测定土壤 pH,用重铬酸钾氧化-外加加热法测定土壤有机质,半微量凯氏法测定全氮. 用氢氧化钠碱熔法将土壤样品熔融后提取待测液,用钼蓝比色法测定全磷,火焰光度法测定全钾. 用碱解-扩散法对碱解氮、碳酸氢钠法对速效磷和乙酸铵-火焰光度法对速效钾进行测定^[8].

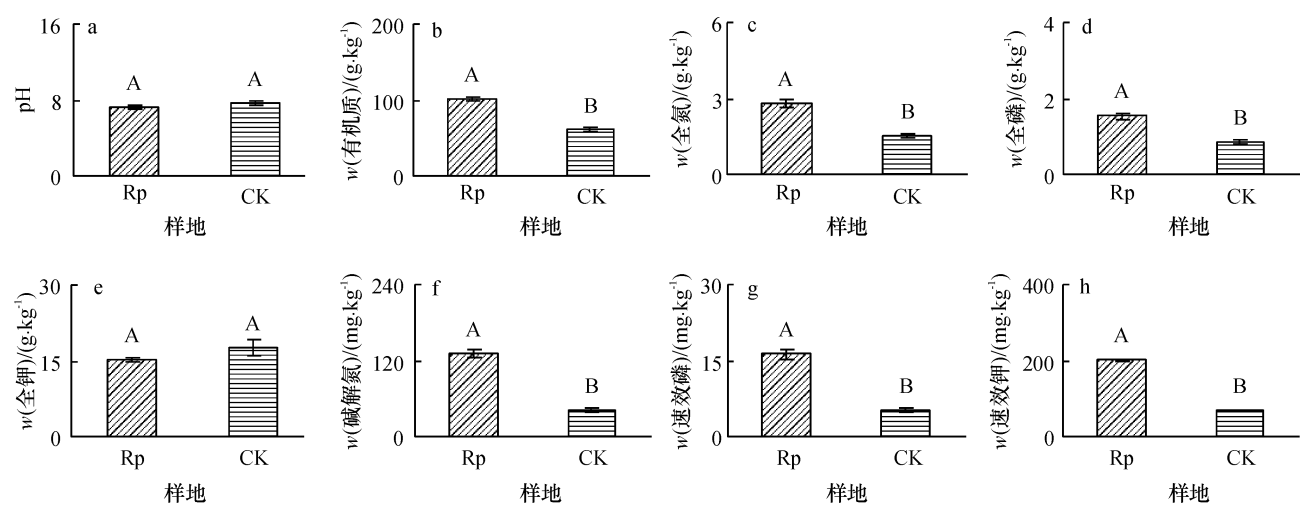
1.3.2 土壤微生物计数及酶活性分析 土壤微生物计数用稀释平板法,固氮菌用改良阿须贝无氮琼脂培养基,解磷菌用有机磷细菌培养基^[10]. 脲酶采用比色法测定,酶活性以 37 °C 下培养 24 h 后 1 kg 土释放的 NH₃-N 的质量表示;酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以 37 °C 下培养 2 h 后 100 g 土消耗五氧化二磷的质量表示;过氧化氢酶活性采用 0.1 mol/L 高锰酸钾滴定法测定,酶活性以常温条件培养 1 h 后 1 g 土消耗 0.1 mol/L KMnO₄ 的体积表示^[9]. 每个样品做 3 次重复测定,结果取重复测定的算术平均值.

1.3.3 数据分析 运用 Microsoft excel 软件对样地的土壤养分、微生物和酶活性进行统计分析,运用 SAS 软件进行 *t* 检验.

2 结果与分析

2.1 铁尾矿土壤的化学性质

铁尾矿土壤中,刺槐人工林下土壤的 pH 比对照低 4.7%,二者无显著差异(图 1a);刺槐人工林下土壤的有机质、全氮和全磷质量分数分别为 101.5、2.791 和 1.526 g·kg⁻¹,极显著高于对照,分别为对照的 1.7、1.8 和 1.8 倍(图 1b~1d);碱解氮、速效磷和速效钾质量分数分别为 130.7、16.24 和 201.8 mg·kg⁻¹,极显著高于对照,分别为对照的 3.1、3.1 和 2.9 倍(图 1f~1h);刺槐人工林下土壤的全钾质量分数为 15.21 g·kg⁻¹,比对照低 13.7%,二者无显著差异(图 1e).



每小图中柱子上方凡有不同大写英文字母者表示差异极显著(t 检验, $P < 0.001$)

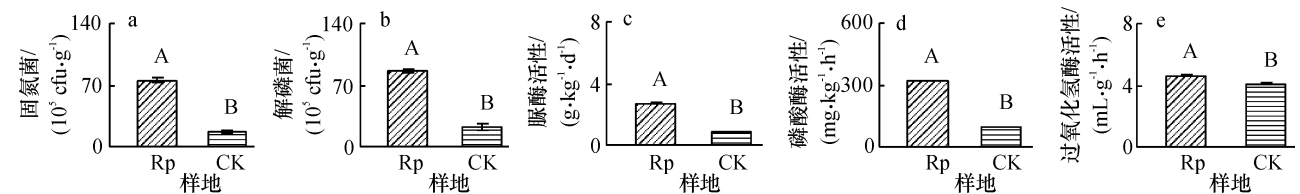
图 1 土壤化学性质

Fig. 1 Soil chemical properties

2.2 铁尾矿土壤的微生物数量

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,推动土壤中有机的分解、土壤养分的转化与循环^[1, 11-12]. 而具有固氮作用或解磷作用的微生物是土壤微生物生态功能的关键部分之一^[12]. 研究结果表

明,刺槐人工林对铁尾矿土壤的微生物的自生固氮活性与解磷活性具有极显著影响. 铁尾矿土壤中,刺槐人工林下土壤的自生固氮菌数量与解磷菌数量分别为 75.0×10^5 和 $85.7 \times 10^5 \text{ cfu} \cdot \text{g}^{-1}$,极显著高于对照 ($P < 0.001$),分别是对照的 4.6 和 3.8 倍(图 2a、2b).



每小图中柱子上方凡有不同大写英文字母者表示差异极显著(t 检验, $P < 0.001$)

图 2 土壤微生物和酶活性

Fig. 2 Soil microorganism and enzyme activities

2.3 铁尾矿土壤的酶活性

土壤酶是土壤的重要组成部分之一,参与了土壤中许多生物化学过程,在土壤养分循环和土壤肥力形成及维持中起着重要的作用,是评价土壤肥力的重要指标之一^[11]. 刺槐人工林对重建土壤中土壤酶的活性有显著影响. 铁尾矿土壤中,刺槐人工林下土壤的脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性分别为 $2.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $317.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $4.6 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$,极显著高于对照 ($P < 0.001$),分别是对照的 3.1、3.2 和 1.1 倍(图 2c ~ 2e),表明刺槐人工林土壤中的生化反应强度大于对照,其土壤对植物根系供应养分的潜在能力大^[13].

3 讨论

矿山废弃地生态恢复是在人为干预下,消除废弃地对周围环境的危害,并重新利用土地的过

程^[14-15]. 废弃的铁尾矿废弃地主要由矿渣构成,基质松散、粘结性差、养分贫瘠和保水保肥性能差,极端的土壤条件和小气候限制了植被恢复. 本研究通过覆盖污泥、生活垃圾等有机废物于铁尾矿废弃地上,改善了土壤结构,有机废物中的微生物起源的碳水化合物可以维持并提高土壤微生物生物量,提高了铁尾矿基质中有机质含量,促进采石场废弃地上刺槐的定居和养分的循环^[15].

刺槐种植 10 年后,林分基本郁闭,平均胸径超过 12 cm,形成了森林环境. 刺槐人工林和对照样地的土壤分别为弱碱性和碱性,这可能是由于在恢复初期覆盖基质的添加提高了铁尾矿土壤的 pH 所致. 植被的发育吸收阴离子基团,并将其在土壤中重新分配,能够酸化土壤^[16],有机质的积累过程也促进了土壤酸化^[17]. 所以,在刺槐人工林定居后,土壤 pH 随着刺槐的生长和土壤有机质的提高而下降. 刺槐

人工林下土壤的全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾、微生物和土壤酶的活性都极显著高于对照样地,说明刺槐人工林促进了土壤的发育. 土壤发育与植物群落演替关系密切^[18],许多研究者报道了植被定植后能够逐渐改善矿山废弃地的土壤化学性质^[19]. 洪坚平等^[20]对矿区煤矸石、刘鸿雁等^[21]对铅锌矿渣场的研究,以及王友保等^[22]、李影等^[23]、尚文勤等^[24]对铜尾矿的研究表明,植物定居后,矿山废弃地的有机质和氮含量增加,有效养分增多,pH相应得到了改善. 原因是植物定植后凋落物和根系分泌物数量增加,导致有机质的增多^[18, 23]. 另外,随着植被的恢复,地表覆盖度增大,重建植被能够有效地防止或减轻水蚀和风蚀的形成和程度,减少土壤养分的流失,进而对养分有效地增源节流,改善土壤特性^[5].

微生物参与土壤养分转化与循环^[1, 11-12],对土壤改良作用巨大. 在矿山废弃地有植物定植后,基质结构及养分状况逐渐得到改善,保持水肥的能力逐渐增强^[24],微生物数量便会增加^[25],土壤微生物参与土壤中有有机质的分解、腐殖质的形成、土壤养分转化和循环等过程^[26-27],直接影响土壤养分的组成与转化^[13]. 作为植物重要组成成分的氮、磷是植物生长发育与新陈代谢必不可少的大量元素^[28],而自生固氮与解磷是微生物重要功能之一. 自生固氮微生物是土壤微生物重要组成成分之一,他们不需要与特定的植物配合,可以将大气中的氮气通过生物固氮作用供给植物生长,在氮素贫瘠的土壤中对氮的持续供给起重要作用^[12, 25]. 本研究中,刺槐与固氮菌共生,将大气中的氮素固定到土壤中,使土壤肥力不断得到改善^[5]. 土壤中磷往往以难溶性矿质磷酸盐及卵磷脂、核酸、植素等有机态存在,都不能被植物直接利用. 研究表明,土壤中存在很多具有解磷能力的微生物,能够通过其生理活动将土壤难溶性矿质磷酸盐及含磷有机化合物分解,并将磷释放出来以满足植物生长需要^[25, 28-29]. 本研究中刺槐人工林重建土壤中微生物的自生固氮和解磷活性极显著高于对照样地,这在一定程度上提高了重建土壤中的速效养分含量. 另外,改善后的土壤又能为植被恢复提供更多的营养物质,促进植被恢复,二者相互促进,互为动力^[5].

土壤酶是土壤的重要组成部分之一,其活性大小可较敏感地反映土壤中生化反应的方向和强度^[30],能表征土壤对植物根系供应养分的潜在能力^[13]. 在矿山废弃地的生态重建中,植物定植后,土壤酶活性也相应提高^[26-27],这主要是由于植物通过

根系不断地向土壤中分泌各种有机物、无机物、生长激素等活性物质,有助于微生物的生长,从而直接或间接地影响着土壤酶的活性^[23, 31]. 所以本研究中,刺槐人工林铁尾矿土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶的活性极显著高于对照样地.

参考文献:

- [1] 闫晗,吴祥云,黄静,等. 生态恢复措施对土壤微生物数量特征的影响:以阜新海州露天矿排土场为例[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1359-1363
- [2] 许永利,李富平,张俊英,等. 铁尾矿直接植被恢复中丛枝菌根真菌的应用[J]. 金属矿山, 2010, 39(9): 126-129.
- [3] 郝蓉,白中科,赵景逵,等. 黄土区大型露天煤矿废弃地植被恢复过程中的植被动态[J]. 生态学报, 2003, 23(8): 1470-1476.
- [4] 张静雯,张成梁,宋楠,等. 煤矸石渣土改良及其效果研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(4): 227-231.
- [5] 薛 蕙,刘国彬,戴全厚,等. 侵蚀环境生态恢复过程中人工刺槐林(*Robinia pseudoacacia*)土壤微生物量演变特征[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 909-917.
- [6] 胡婵娟,傅伯杰,靳甜甜,等. 黄土丘陵区沟壑区植被恢复对土壤微生物生物量碳和氮的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 45-50.
- [7] 王征,刘国彬,许明祥. 黄土丘陵区植被恢复对深层土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3947-3952.
- [8] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京:科学出版社, 1985.
- [11] 薛立,陈红跃,杨振意,等. 火灾对马尾松林地土壤特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(22): 6825-6831.
- [12] 钟熙敏,宫渊波,陈林武,等. 岷江上游山地森林/干旱河谷交错带不同植被恢复模式对根际土壤微生物量碳氮及固氮菌群落结构的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 208-213.
- [13] 方晰,田大伦,武丽花,等. 植被修复对锰矿渣废弃地土壤微生物数量与酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 221-226.
- [14] TAMAR M. Environmental aspects of rehabilitating abandoned quarries: Israel as a case study[J]. Landscape and Urban Planning, 2008, 87(3): 172-179.
- [15] 杨振意,薛立,许建新. 采石场废弃地的生态重建研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5264-5274.
- [16] DUAN Lei, HUANG Yongmei, HAO Jiming, et al. Vegetation uptake of nitrogen and base cations in China and its

role in soil acidification[J]. *Sci Total Environ*,2004, 330 (1/3): 187-198.

[17] SYKORA K V, VAN DEN BOGERT J C J M, BERENDSE F. Changes in soil and vegetation during dune slack succession[J]. *J Veg Sci*,2004, 15(2): 209-218.

[18] 安宗胜,詹婧,孙庆业. 自然植物群落形成过程中铜尾矿废弃地氮素组分的变化[J]. *生态学报*,2010, 30 (21): 5958-5966.

[19] DANA E D, MOTA J F. Vegetation and soil recovery on gypsum outcrops in semi-arid Spain[J]. *J Arid Environ*, 2006, 65(3): 444-459.

[20] 洪坚平,谢英荷,孔令节,等. 矿山复垦区土壤微生物及其生化特性研究[J]. *生态学报*, 2000, 20(4): 669-672.

[21] 刘鸿雁,邢丹,肖玖军,等. 铅锌矿渣场植被自然演替与基质的交互效应[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3217-3224.

[22] 王友保,黄永杰,甄泉,等. 铜尾矿库区狗牙根根际土壤铜的形态变化[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(6): 1341-1345.

[23] 李影,陈明林. 节节草生长对铜尾矿砂重金属形态转化和土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(21): 5949-5957.

[24] 尚文勤,朱利平,孙庆业,等. 自然生态恢复过程中尾矿废弃地土壤微生物变化[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 713-717.

[25] 王莉晶,高晓蓉,吕军,等. 解磷真菌 C2' 的分离鉴定及其在土壤中实际解磷效果的研究[J]. *土壤通报*, 2009, 40(4): 771-775.

[26] 张崇邦,王江,柯世省,等. 五节芒定居对尾矿砂重金属形态、微生物群落功能及多样性的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(4): 629-637.

[27] MUMMEY D L, STAHL P D, BUYER J S. Microbial bio-markers as an indicator of ecosystem recovery following surface mine reclamation[J]. *Applied Soil Ecol*, 2002, 21(3): 251-259.

[28] 郑红丽,周晓荣,樊明寿. 燕麦根际有机磷细菌的分离及其有关生理特性的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(5): 1-6.

[29] MOLLA M A Z, CHOWDHURY A A, ISLAM A, et al. Microbial mineralization of organic phosphate in soil[J]. *Plant and Soil*,1984, 3(78): 393-399.

[30] 龙健,黄昌勇,滕应,等. 矿区废弃地土壤微生物及其生化活性[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 496-503.

[31] CHEN C L, LIAO N M, HUANG C Y. Effect of combined pollution by heavy metals on soil enzymatic activities in areas polluted by tailings from Pb-Zn-Ag mine[J]. *J Environ Sci*, 2005, 17(4): 637-640.

【责任编辑 李晓卉】

(上接第218页)

[26] ZHAO Min, ZHOU Guangsheng. Estimation of biomass and net primary productivity of major planted forests in China based on forest inventory data[J]. *Forest Ecol Management*, 2005, 207(3): 295-313.

[27] ZHOU Guangsheng, WANG Yuhui, JIANG Yanling, et al. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's *Larix* forests[J]. *Forest Ecol Management*, 2002, 169(1/2): 149-157.

[28] 罗云建,张小全,王效科,等. 森林生物量的估算方法及其研究进展[J]. *林业科学*, 2009, 45(8): 129-134.

[29] 张乐勤. 安徽池州森林植被碳储量调查及分析[J]. *植物学报*, 2011, 46(5): 544-551.

[30] 林义辉,张苏峻. 广东省蕉岭长潭省级自然保护区森林土壤持水性的垂直空间格局研究[J]. *华南农业大学学报*, 2011, 32(4): 78-81.

[31] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究[J]. *中南林业调查规划*, 2005, 24(4): 3-5.

[32] FANG Jingyun, CHEN Anping, PENG Changhui, et al. Changes in forest biomass storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.

[33] 平井信二. 木の大百科[M]. 东京:朝书店,1996: 34-67.

[34] 白石则彦. 东京大学千叶演习林における炭素蓄積量の推定[J]. 东京大学农学部演习林报告, 2004, 112: 11-34.

[35] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京:中国林业出版社, 2010: 12-48.

【责任编辑 李晓卉】