南方稀土矿区植物根际与非根际土壤碳氮含量与 pH 值变化

张青青[1,2]，陈志强[1,2,3]，陈志彪[1,2,3]，马秀丽[1,2]

(1. 福建师范大学 地理科学学院，福建 福州 350007；2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地，福建 福州 350007；3. 福建师范大学地理研究所，福建 福州 350007)

摘　要：[目的] 揭示南方稀土矿区根际与非根际养分含量变化，为南方稀土矿区的生态恢复和侵蚀退化区的水土保持提供科学依据。[方法] 以福建省长汀县稀土矿治理区为研究对象，采用野外调查与室内分析相结合的方法，选取 3 个稀土矿开采区进行植物样方调查及土壤取样，对研究区的主要水土保持植物(芒萁、枫香)根际与非根际土壤碳氮含量、pH 值变化以及根际与非根际间土壤碳氮含量、pH 值的差异性进行研究分析。[结果] (1) 随着治理年限的增加，芒萁根际土壤的有机碳、全氮含量逐渐升高，硝态氮含量逐渐减少，pH 值先增加后减少，铵态氮含量无显著性差异；枫香根际土壤的硝态氮随着治理年限的增加而减少，而有机碳、全氮、铵态氮含量和 pH 值均无显著性差异。(2) 随着治理年限的增加，芒萁非根际土壤的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮均无显著性差异，pH 值先增加后减少；枫香非根际土壤的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、pH 值均无显著性差异。(3) 芒萁根际土壤的有机碳含量显著高于非根际土壤的有机碳含量，全氮、铵态氮、硝态氮和 pH 值均无显著性差异；而枫香根际与非根际土壤养分含量均无显著性差异。[结论] 植被能够改善土壤，但土壤肥力恢复却是一个长期的过程。

关键词：稀土矿区；根际；非根际；养分含量

文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2017)03-0102-05　　**中图分类号**：S154.1，S153

文献参数：张青青，陈志强，陈志彪，等. 南方稀土矿区植物根际与非根际土壤碳氮含量与 pH 值变化[J]. 水土保持通报，2017，37(3)：102-106. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.018；Zhang Qingqing，Chen Zhiqiang，Chen Zhibiao，et al. Variations of carbon，nitrogen and pH value in rhizosphere and non rhizosphere soil in rare earth mining area in Southern China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2017，37(3)：102-106. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.018

Variations of Carbon，Nitrogen and pH Value in Rhizosphere and Non Rhizosphere Soil in Rare Earth Mining Area in Southern China

ZHANG Qingqing[1,2]，CHEN Zhiqiang[1,2,3]，CHEN Zhibiao[1,2,3]，MA Xiuli[1,2]

(1. *College of Geographical Sciences，Fujian Normal University，Fuzhou，Fujian* 350007，*China*；2. *Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology，Ministry of Science and Technology and Fujian Province，Fuzhou，Fujian* 350007，*China*；3. *Institute of Geography，Fujian Normal University，Fuzhou，Fujian* 350007，*China*)

Abstract：[Objective] To reveal the variations of nutrients in rhizosphere and non-rhizosphere soil in rare earth mining area in Southern China，and to provide scientific basis and data support for local ecological restoration and soil and water conservation in erosive area. [Methods] Sample survey of rare mine in Changting County of Fujian Province was conducted and soil samples were assayed indoor to obtain carbon and nitrogen contents，pH values of two main soil and water conservation plants (*Dicranopteris dichotoma* and *Liquidambar formosana*) in three mines with different rehabilitation ages，and their values in the rhizosphere and the non-rhizosphere were compared among the three mines. [Results] (1) With the prolongation of mine harness，nutrients in *D. dichotoma* rhizosphere soil exhibited different changes：the contents of organic carbon and total nitrogen both increased，nitrate nitrogen content gradually reduced，pH value increased first and then decreased，ammonium nitrogen had no obvious change. In Liquidambar rhizosphere，the nitrate nitrogen con-

收稿日期：2016-09-12　　**修回日期**：2016-10-15

资助项目：国家自然科学基金面上项目“南方离子型稀土矿区芒萁的蔓延格局与稀土迁聚响应”(41371512)

第一作者：张青青(1992—)，女(汉族)，江西省九江市人，硕士研究生，研究方向为水土保持。E-mail：15390825072@163.com。

通讯作者：陈志强(1978—)，男(汉族)，福建省莆田市人，博士，教授，主要从事生态恢复以及水土保持等方面的研究。E-mail：soiltuqiang061@163.com。

tent decreased, organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, pH value had no significant differences. (2) With the prolongation of harness, items of organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen in *D. dichotoma* non-rhizosphere soil all had no significant difference; pH value increased first and then decreased. In *L. formosana* non rhizosphere soil, no significant differences of organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, pH value among the three mines were observed. (3) The organic carbon content of *D. dichotoma* rhizosphere soil was significantly higher than that of non-rhizosphere soil. The contents of total nitrogen and ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and pH value all had no significant differences; the soil nutrient content had no significant difference between *L. formosana* rhizosphere and non-rhizosphere. [Conclusions] Vegetation can improve soil, but the soil fertility restoration is a long-term process.

Keywords: rare earth mining area; rhizosphere; non-rhizosphere; nutrient contents

根际(rhizosphere)是指受植物根系生长影响,在物理、化学和生物特性上不同于原土体的土壤微域,是植物、土壤和微生物三者相互作用的场所,也是各种养分、水分和有益或有害物质进入根系参与食物链物质循环的门户,是一个特殊的生态系统[1]。在 20 世纪 60 年代末、70 年代初,Riley 等[1]根据在根系表面抖落和粘着的程度来区分根际土与非根际土,松散粘附在根系表面,约距根面 0～4 mm 的土壤为根际土(rhizosphere soil),抖落下的为非根际土(原土体,non-rhizosphere soil)。通过研究根际与非根际,可以间接了解植物生活环境的变化,因而受到很多学者的重视,早在 1998 年,刘建军等[2]就对秦岭火地塘林区主要树种根际微生态系统土壤性状进行了研究,研究表明根际土壤的全氮含量和水解性氮含量均大于非根际土壤;董兆佳等[3]在 2010 年对海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征进行研究分析,认为根际土壤各种形态氮素均高于非根际土壤;孟令军等[4]在 2012 年对秦岭太白山区 6 种中草药根际与非根际土壤的化学性质及酶活性进行了研究,结果表明根际土壤有机质比非根际土壤的有机质含量高,富集现象明显;Erktan A 等[5]在 2014 年对地中海地区严重侵蚀的沟床生态系统中植物演替与土壤团聚体的关系进行研究,结果表明植物根际是其主要的驱动因子。目前根际与非根际土壤的研究日益增多,但在南方红壤区稀土矿区中的研究鲜见报道。

南方红壤区面积达 2.035×10^6 km^2,水土流失面积占 6.00×10^5 km^2,是南方水土流失最严重的地区之一[6];离子型稀土矿是中国实施保护性开采的特定稀土矿种,也是世界上稀缺的矿种,广泛分布于中国南方的福建、广东、江西、湖南、云南、广西、浙江等 7 省区,具有稀土元素配分齐全、富含中重稀土元素、放射性元素含量低等特点,其中,中重稀土储量占世界的 80% 以上[7]。其因切沟、冲沟和崩塌广泛分布,导致土壤养分大量流失,形成大面积严重退化的生态系统。

本文拟以南方红壤区长汀县稀土矿区为研究区,通过实地调查、植物采样及土壤取样,对 3 个不同治理年限的稀土矿区(牛屎塘、下坑和三洲桐坝)中的芒萁和枫香进行研究分析,通过对其根际与非根际土壤有机碳含量、不同形态的氮素以及 pH 值进行方差分析,来揭示南方稀土矿区根际与非根际养分含量变化,以期为南方稀土矿区的生态恢复和侵蚀退化区的水土保持提供科学依据和数据支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

长汀县地处福建省的西南部(25°38′15″—25°42′55″N,116°23′30″—116°30′30″E),属中亚热带季风性湿润气候,年均相对湿度 80%,年均气温 18.5 ℃,年均蒸发量 1 403 mm,年均降雨量 1 710 mm,降水主要集中在 3—8 月;地貌以丘陵为主;土壤类型以红壤为主。该地区人类活动剧烈,水土流失极为严重,原生植被破坏殆尽,以马尾松、灌丛等次生植被为主,由于地面植被遭到破坏,红色风化壳直接受到流水的强烈侵蚀,坡面呈现千沟万壑的景象,近几年来,经过植被恢复措施,已经取得了一定的成效,水土流失也得到了一定程度的遏制。但与全省平均值相比,长汀县仍属福建省水土流失严重地区[8]。1940 年福建省研究院即在此设立土壤保肥试验区,开展土壤侵蚀治理的试验研究[9]。

选取不同植被盖度但立地条件基本一致的 3 个不同治理年限的稀土矿区作为研究区。牛屎塘稀土矿区治理时间为 2006 年,植被覆盖度较高,主要的植被类型有芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、木荷(*Schima superba*)、宽叶雀稗(*Paspalum wetsfeteini*)、马尾松(*Pinus massoniana*)5 种植物,芒萁长势较好,覆盖度达到了 73% 左右,野外调查显示,芒萁呈蔓延扩张的态势;下坑稀土矿区治理时间为 2008 年,主要的植被类型有

芒萁、枫香、宽叶雀稗、木荷等，宽叶雀稗盖度达到了69%左右，而芒萁的长势较牛屎塘差，土壤采样过程中发现有明显的黏层，水土流失现象较为严重；三洲桐坝稀土矿区治理时间为 2011 年，裸露地表比例较大，植被覆盖度不高，植被类型主要是宽叶雀稗，芒萁比下坑的更为矮小。芒萁为中国亚热带地区广泛分布的古老蕨类植物，耐旱、喜酸性土、耐瘠薄，繁殖力极强，是侵蚀劣地的先锋草种植物[10]；枫香属金缕梅科，抗风力强，具有耐干旱、耐贫瘠，是稀土矿区恢复过程中分布最广的植物，所以本文以芒萁和枫香为各稀土矿区的代表植物，以分析 3 个矿区根际与非根际土壤养分含量的时间变化。

1.2 野外调查与采样

根据典型性和代表性的原则，在实地勘察的基础上，于 2013 年 11 月对牛屎塘、下坑和三洲桐坝进行植物群落样方调查。为避免植树造林措施所挖沟穴对试验数据的干扰，在采样中我们避开了沟穴的位置，分别在牛屎塘、下坑和三洲桐坝这 3 个稀土矿区选取植被长势基本相近的区域构建 3 个 5 m×5 m 的灌木样方，在每个灌木样方内沿对角线构建 2 个 2 m×2 m的草本样方。采用抖落分离法获取根际土壤与非根际土壤，取土前先将土壤表面枯枝落叶清除，然后用土壤刀从植物底部开始逐段、逐层挖去 0—10 cm 的上层覆土，沿着直径大于 2 mm 根系的生长方向，找到植株的须根部分，用剪刀剪下分枝，将抖动后掉下的土壤作为非根际土壤，收到自封袋中标记保存，仍然附着在根系上并距根围 0—5 mm 为根际土壤，用毛刷收集到土壤袋保存，供分析用[11-13]。

1.3 样品处理与测定

将所采集的土壤样品迅速带回实验室，自然风干后，挑去植物根系、残体等，采用四分法将其混合均匀，将混合土样研磨，过 2 mm 筛用于样品铵态氮、硝态氮和 pH 值的测定，过 0.149 mm 筛用于样品有机碳、全氮的测定。测定方法如下：有机碳和全氮采用德国 Elemantar vario MAX 碳氮元素分析仪测定；铵态氮和硝态氮采用 2 mol/L KCl 溶液浸提，用连续流动分析仪（Skalar san^{++}，荷兰）测定；pH 值采用水∶土=1∶2.5 水浸—电位测定。

1.4 数据分析

本文的全部试验数据均是在 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件下处理完成。应用 SPSS 19.0 分别对根际与非根际土壤养分含量进行单因素方差分析，对根际与非根际的土壤养分含量进行独立样本 t 检验，分别探讨各土壤养分含量在根际与非根际土壤中的时间变化，以及各土壤养分含量在根际与非根际土壤中的差异性。

2 结果与分析

2.1 不同植物根际土壤养分含量变化

由图 1 可知，随着稀土矿区治理年限的增加，芒萁根际土壤的有机碳、全氮含量趋于升高（$p<0.05$），铵态氮含量无显著性差异，硝态氮含量趋于减少（$p<0.05$），pH 值先增加后减少（$p<0.05$）；枫香根际土壤的硝态氮含量随着治理年限的增加而减少（$p<0.05$），而有机碳、全氮、铵态氮含量和 pH 值均无显著性差异。牛屎塘稀土矿区芒萁根际土壤的有机碳、全氮含量分别比三洲桐坝稀土矿区芒萁根际土壤的有机碳、全氮含量高 62%和 48%，硝态氮含量比三洲桐坝稀土矿区芒萁根际土壤的硝态氮含量低 92%；三洲桐坝稀土矿区枫香根际土壤的硝态氮含量分别比下坑和牛屎塘稀土矿区枫香根际土壤的硝态氮含量高 75%和 85%。

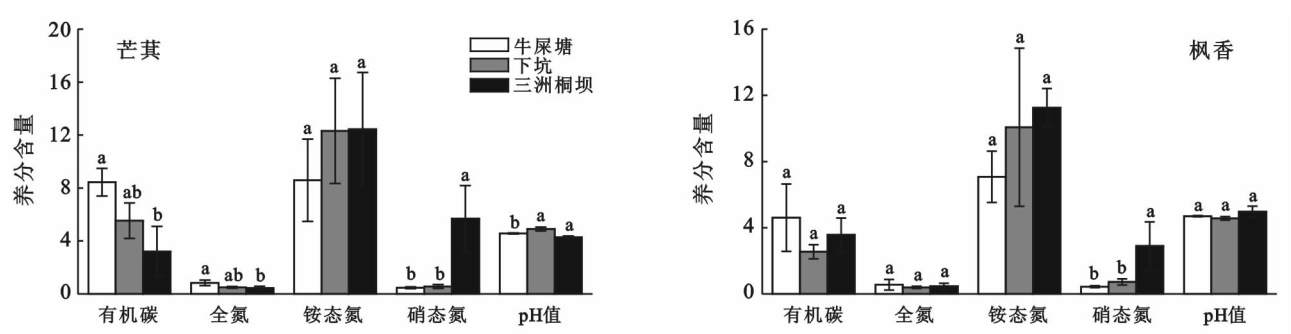


图 1 芒萁和枫香在不同稀土矿区的根际土壤养分含量

注：不同字母表示同一土壤养分在不同样区具有显著性差异（$p<0.05$），反之，则无显著性差异，其中，有机碳和全氮（g/kg），硝态氮和铵态氮（mg/kg）。下同。

2.2 不同植物非根际土壤养分含量变化

由图 2 可知，芒萁非根际土壤的 pH 值存在显著性差异（$p<0.05$），随着治理年限的增加，芒萁非根际土壤的 pH 值先增加后减少，有机碳、全氮、铵态氮、

硝态氮含量均无显著性差异;而枫香非根际土壤的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮含量和 pH 值均无显著性差异。

2.3　不同植物根际与非根际土壤养分含量的差异性

由图 3 可知,在芒萁根际土壤与非根际土壤之间,有机碳含量呈现出了显著的差异($p<0.05$),芒萁根际土壤的有机碳含量比非根际土壤的有机碳含量高 46%,而全氮、铵态氮、硝态氮和 pH 值均无显著性差异;在枫香根际土壤与非根际土壤之间,有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮含量和 pH 值均无显著性差异。

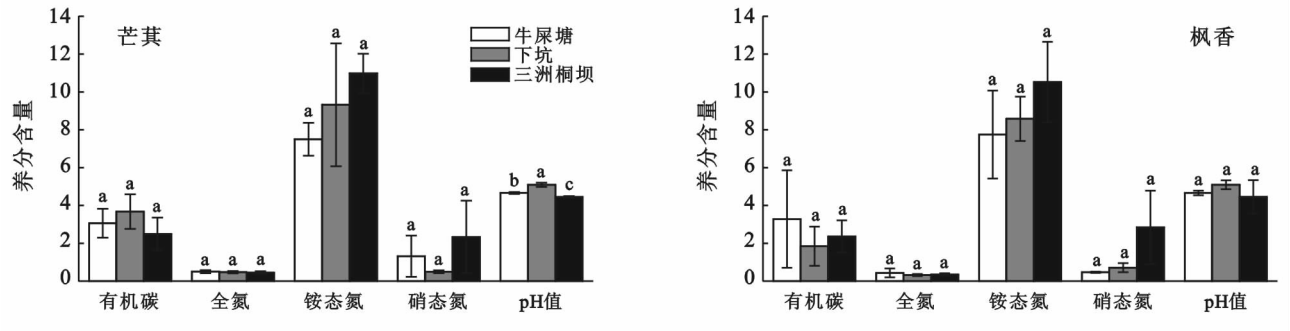


图 2　芒萁和枫香在不同稀土矿区的非根际土壤养分含量

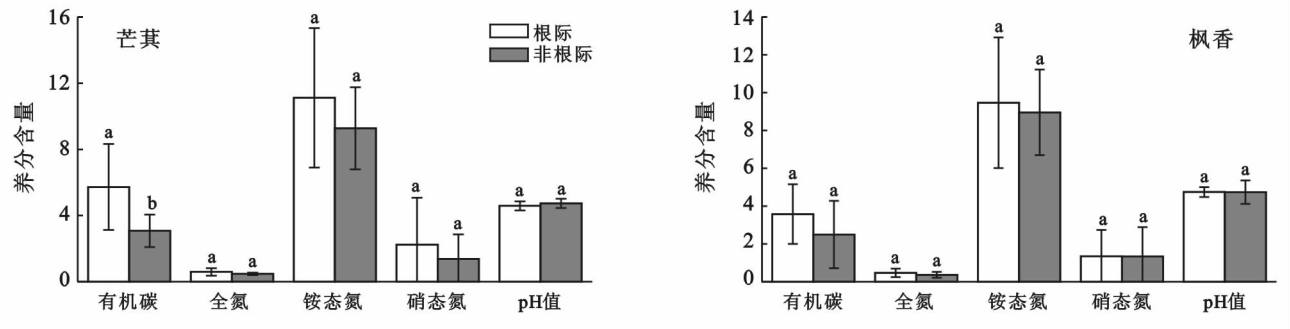


图 3　芒萁和枫香根际与非根际土壤养分含量

3　讨 论

3.1　植被能有效改善根际土壤的养分状况

本研究表明,随着稀土矿区治理年限的增加,芒萁根际土壤的有机碳含量、全氮含量逐渐升高,铵态氮含量无显著差异,硝态氮含量逐渐减少,pH 值先增加后减少;芒萁非根际土壤的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮均无显著性差异,pH 值先增加后减少。枫香根际土壤的硝态氮含量随着治理年限的增加而减少,而有机碳、全氮、铵态氮含量和 pH 值均无显著性差异;枫香非根际土壤的有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮含量和 pH 值均无显著性差异。根际土壤是植物生长过程中形成的复杂的、动态的微型生态系统[14];它的性质与植物的生长有着直接的联系,植物在生长过程中吸收的养分主要来自根际土壤,根际微区的养分状况很大程度上决定了植物的生长状况[15]。相较于根际土壤,非根际土壤养分含量的年际变化不大,未达到显著性差异,这主要是因为根系的影响范围有限,只能影响到根际的土壤,对非根际的土壤影响不大,因此随着治理年限的增加,部分根际土壤的养分含量达到了显著性差异,而非根际土壤的养分含量变化不大。

相关研究表明,根系分泌物或溢泌产物、根组织的脱落物等根产物是土壤有机碳的重要来源之一[16]。土壤有机碳不仅能够增强土壤的保肥和供肥能力,提高土壤养分的有效性,而且可促进团粒结构的形成,改善土壤的透水性、蓄水能力及通气性,增强土壤的缓冲性等[17]。随着治理年限的增加,芒萁根际土壤的有机碳含量也随着增加,这与芒萁的生理学特征不无关系,芒萁作为一种草本植物,具有庞大的根系,枯枝落叶多,其凋落物可以更多归还到土壤中去,从而增加了土壤中的有机碳含量,且植被恢复程度越高,土壤有机碳含量也就越高。

土壤全氮是衡量土壤肥力的重要指标,多项研究表明:植物的残体以及根系脱落物等根的产物是土壤中全氮含量的重要来源之一,随着治理年限的增加,芒萁根际土壤中的全氮含量随之增加,这可能是由于芒萁具有较庞大的根系,根系的活动能够更多地聚集氮素,同时植物根系产生了大量含氮分泌物,死亡的根系、根毛组织表皮的脱落物和大量根际微生物等有

机物质在根际的聚集使得全氮含量逐渐增加。

土壤中的氮素形态包括无机态氮和有机态氮,铵态氮和硝态氮是土壤无机态氮的主要组成成分,这 2 种形态的氮素是土壤氨化与硝化作用的结果,它们是能够直接被植物吸收利用的生物有效氮[18]。研究结果表明,芒萁和枫香根际土壤硝态氮含量随着治理年限的增加逐渐减少,铵态氮含量无显著性差异,一方面,这与两者的物理性质有关,硝态氮随水移动,易向土壤深层淋失,而铵态氮容易挥发损失[19];另一方面也可能与大部分硝态氮被植物吸收,而铵态氮需求量不高有关。长汀县是福建省稀土资源储量最多,稀土产业发展最早的省份,但在最近几年,随着稀土矿区大规模的开采,地表植被及表层土壤遭到严重破坏,降低了抗侵蚀的能力,加上强降雨及地表径流,造成严重的水土流失,硝态氮随着水土流失的加剧而大量流失;植被盖度下降,土壤氮素的氨挥发和反硝化损失提高,从而导致了铵态氮的流失加剧[20];铵态氮和硝态氮是能被植物直接吸收利用的无机态氮,詹媛媛等[1]对阿拉善荒漠区的旱生灌木进行了研究分析,根际对铵态氮、硝态氮均有很强的富集作用,说明植物对硝态氮和铵态氮的需求量较高,且富集作用越强,植物越能适应贫瘠的生活环境,因此随着治理年限的增加,硝态氮的含量逐渐减少,而铵态氮也有减少的趋势。

根际 pH 值的变化,会很大程度影响根际土壤中养分的化学性质和有效性,对根系的生长、离子吸收、重金属元素毒害作用的忍耐、分泌物的组成和数量以及微生物的种类数量和酶的活性都有重要影响[21]。研究结果表明:芒萁根际土壤的 pH 值与非根际土壤的 pH 值均随着治理年限的增加先增加后减少,由此可知,根际土壤的 pH 值与非根际土壤的 pH 值具有相同的规律性,其变化规律的原因仍需进一步研究。

3.2 土壤肥力恢复是一个长期的过程

本研究表明,芒萁根际土壤的有机碳含量大于非根际土壤的有机碳含量,并达到了显著性水平;在根际土壤与非根际土壤之间,全氮、铵态氮、硝态氮含量和 pH 值未表现出差异性。在枫香的根际土壤与非根际土壤之间,有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮含量和 pH 值均未表现出显著的差异性。

经过多年的自然恢复,只有芒萁根际土壤与非根际土壤的有机碳含量表现出显著性差异,而根际土壤与非根际土壤的全氮、硝态氮和铵态氮没有显著差异性,说明南方离子型稀土矿区的土壤肥力恢复十分缓慢且困难。长汀县地处中国福建省西部,是中国南方亚热带水土流失典型区域,在亚热带高温多雨的气候条件下,花岗岩发育的风化壳残积物深厚,加之长期以来不合理的开山砍树以及开矿开荒等大量人为活动影响,使得地表植被遭受严重破坏,水土流失极其严重,土壤肥力恢复极慢;特别是南方离子型稀土矿区,由于多年的开采,矿区内冲沟、切沟和崩塌广布,水土流失严重,环境非常恶劣,土壤养分大量流失,土壤肥力需要漫长时间恢复;根据长汀县的生态恢复研究,森林生态系统的恢复约需 40 a,土壤肥力的恢复则约需 140 a[9]。我们认为,芒萁的持续生长将促使植物群落转向灌丛或森林,今后可能会形成森林,随着植物因子提高,土壤肥力也会随之提高。

4 结 论

研究表明,随着治理年限的增加,芒萁根际土壤中的全氮含量和有机碳含量随之增加,说明根际土壤的养分状况会随着治理年限的增加而得到改善;芒萁根际土壤中的有机碳含量显著高于非根际土壤中的有机碳含量,而全氮、铵态氮、硝态氮含量无显著性差异,这间接证实了生态恢复的长期性,土壤肥力恢复的艰巨性。通过研究不同植物根际与非根际土壤性质的差异性,可以阐明典型植物根际对土壤化学性质和土壤肥力的影响,揭示植物根际对土壤质量作用的机理,为改善土壤质量、提高土壤养分资源利用效率和保护生态环境等提供重要科学依据。

[参 考 文 献]

[1] Riley D, Barber S A. Bicarbonate accumulation and pH changes at the soybean root-soil interface[J]. Proceedings of Soil Science Society of America, 1969,33:905-908.

[2] 刘建军,陈海滨,田呈明,等.秦岭火地塘林区主要树种根际微生态系统土壤性状研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(3):53-57.

[3] 董兆佳,孟磊.海南蕉园根际与非根际土壤氮素含量特征[J].中国农学通报,2010,26(6):309-312.

[4] 孟令军,耿增超,殷金岩,等.秦岭太白山区 6 种中草药根际与非根际土壤化学性质及酶活性[J].应用生态学报,2012,23(10):2685-2692.

[5] Erktan A, Cécillon L, Graf F, et al. Increase in soil aggregate stability along a Mediterranean successional gradient in severely eroded gully bed ecosystems: Combined effects of soil, root traits and plant community characteristics[J]. Plant and Soil, 2016,398(1/2):121-137.

[6] 叶春,于海婵,宋祥甫,等.底泥对沉水植物生长和群落结构的影响[J].环境科学研究,2008,21(5):178-183.

[7] 罗才贵,罗仙平,周娜娜,等.南方废弃稀土矿区生态失衡状况及其成因[J].中国矿业,2014,23(10):65-70.

(下转第 112 页)

[9] 吴小节,彭韵妍,汪秀琼.中国生态文明发展状况的时空演变与驱动因素[J].干旱区资源与环境,2016,30(8):1-9.
[10] 袁晓玲,景行军,李政大.中国生态文明及其区域差异研究[J].审计与经济研究,2016(1):92-101.
[11] 宋洪远,金书秦,张灿强.强化农业资源环境保护 推进农村生态文明建设[J].湖南农业大学学报:社会科学版,2016,17(5):33-41.
[12] 刘海涛.我国农村生态文明建设问题研究[D].济南:山东师范大学,2014.
[13] 赵明霞,包景岭.农村生态文明建设的评价指标体系构建研究[J].环境科学与管理,2015,40(2):131-135.
[14] 刘晓光,侯晓菁.中国农村生态文明建设政策的制度分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(11):105-112.
[15] 郑华伟,张锐,孟展,等.基于 PSR 模型与集对分析的耕地生态安全诊断[J].中国土地科学,2015,29(12):42-50.
[16] 曲衍波,朱伟亚,郧文聚,等.基于压力—状态—响应模型的土地整治空间格局及障碍诊断[J].农业工程学报,2017,33(3):241-249.
[17] 张锐,刘友兆,丑建立.中国土地利用系统健康动态评价[J].水土保持通报,2014,34(2):197-203.
[18] 李自琼,李向东,陈晓雪.基于灰色关联度的开发区创新转型能力综合评价研究[J].宏观经济研究,2015(12):115-120.
[19] 高春泥,程金花,陈晓冰.基于灰色关联法的北京山区水土保持生态安全评价[J].自然灾害学报,2016,25(2):69-77.
[20] 江苏省统计局.江苏统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2014.
[21] 王波,吴子玉.基于范数灰关联度确定权重的江苏省文化产业竞争力综合评价研究[J].江苏社会科学,2016(3):244-251.
[22] 郑华伟,夏梦蕾,张锐,等.基于熵值法和灰色预测模型的耕地生态安全诊断[J].水土保持通报,2016,36(3):284-289.

(上接第 106 页)

[8] 陈志强,陈志彪.南方红壤侵蚀区土壤肥力质量的突变:以福建省长汀县为例[J].生态学报,2013,33(10):3002-3010.
[9] 李小飞,陈志彪,陈志强,等.南方红壤侵蚀区芒萁生长特征及其对环境因子的响应[J].水土保持通报,2013,33(3):33-37.
[10] 张明如,何明,温国胜,等.芒萁种群特征及其对森林更新影响评述[J].内蒙古农业大学学报:自然科学版,2010,31(4):303-308.
[11] 厉婉华.栓皮栎、杉木和火炬松根际与非根际土壤氮素及 pH 差异的研究[J].南京林业大学学报,1996,20(2):50-53.
[12] 曾曙才,苏志尧,陈北光,等.植物根际营养研究进展[J].南京林业大学学报:自然科学版,2003,27(6):79-83.
[13] 黄刚,赵学勇,张铜会,等.科尔沁沙地 3 种灌木根际土壤 pH 值及其养分状况[J].林业科学,2007,43(8):138-142.
[14] 朱秋莲,邢肖毅,程曼,等.宁南山区典型植物根际与非根际土壤碳、氮形态[J].应用生态学报,2013,24(4):983-988.
[15] 张学利,杨树军,张百习.我国林木根际土壤研究进展[J].沈阳农业大学学报,2002,33(6):461-465.
[16] 张学利,杨树军,刘亚萍,等.章古台固沙林主要树种根际土壤性质研究[J].中国沙漠,2004,24(1):72-76.
[17] 孔祥斌,张凤荣,齐伟,等.集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响:以河北省曲周县为例[J].地理学报,2003,58(3):333-342.
[18] 李菊梅,王朝辉,李生秀.有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义[J].土壤学报,2003,40(2):232-238.
[19] 谢林毅.植物氮素营养与氮肥施用[J].农村实用技术,2004(12):37-38.
[20] 杜明新,张丽静,梁坤伦,等.高寒沙化草地不同灌木根际与非根际土壤氮素、有机碳含量特征[J].中国草地学报,2011,33(4):18-23.
[21] 张福锁.植物根引起的根际 pH 值改变的原因及效应[J].土壤通报,1993,24(1):43-45.