

DOI: 10.11766/trxb201601050560

# 南方稀土矿区水土保持植物根际土壤碳氮及pH特征\*

陈海滨<sup>1, 2, 3</sup> 马秀丽<sup>1, 2</sup> 陈志彪<sup>1, 2†</sup> 陈志强<sup>1, 2</sup>

(1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

(2 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007)

(3 闽南师范大学, 漳州 363000)

**摘要** 选取南方稀土矿区芒萁、宽叶雀稗、枫香和木荷四种典型水土保持植物, 研究其根际与非根际土壤各种形态氮素和有机碳含量特征以及pH的变化。研究表明, 根际较非根际土壤全氮、铵态氮和硝态氮平均分别高出79.7%、34.2%和30.7%, 土壤有机碳平均高出164.9%, pH平均高出0.13个单位。除pH外, 根际土壤与非根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳之间均差异显著 ( $p < 0.05$ )。四种植物根际土壤全氮、硝态氮、铵态氮和有机碳的含量均较非根际土壤含量高。宽叶雀稗的根际土壤pH大于非根际土壤, 而木荷、芒萁和枫香的根际土壤pH与非根际土壤无显著差异。在根际与非根际土壤中, 土壤全氮与土壤有机碳之间呈显著正相关, 而土壤全氮与土壤铵态氮、土壤全氮与土壤硝态氮之间均无相关性。即稀土矿区四种植物对碳氮主要养分均具有较强的截存效应, 可作为稀土矿区生态恢复的主要植物。

**关键词** 南方; 稀土矿; 根际土壤; 非根际土壤; 氮素; 土壤有机碳

**中图分类号** S154.1 **文献标识码** A

南方红壤区面积达 $2.035 \times 10^6 \text{ km}^2$ , 水土流失面积占 $6.0 \times 10^5 \text{ km}^2$ , 是南方水土流失最严重的地区<sup>[1]</sup>。特别是南方稀土矿区, 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, 土壤养分大量流失, 形成大面积严重退化生态系统。植被重建是治理南方红壤区水土流失和改善土壤质量的重要措施之一。根际是植物的重要组成部分, 是植物与外界养分流通的纽带, 在土壤与植物之间不断进行着物质循环与能量流动。矿区植被的恢复离不开土壤对植被生长贡献的大量营养物质, 同时植被生长对恢复土壤结构以及养分状况也起到了至关重要的作用<sup>[2-3]</sup>。根际微域内能被根系吸收的有效养分被称为“实际有效养分”, 决定着植物实际吸收的养分量<sup>[4-5]</sup>。目前, 国内外学者对各种

不同自然生态系统中根际与非根际土壤进行了大量的研究<sup>[3-4, 6-9]</sup>, 但在南方稀土矿治理区的研究鲜见报道。南方稀土矿治理区种植宽叶雀稗、枫香和木荷为主的本土物种; 芒萁也是南方地带性草本植物, 它不易人工种植, 但一旦环境条件具备, 能靠孢子迅速侵入与繁殖, 并通过其纵横交错的地下茎和不定根, 快速覆盖地表, 遏制水土流失, 改善南方稀土矿区恶劣的生境。本文以南方稀土矿-下坑治理区作为研究实验地, 选择长势和分布较为均匀的四种植物为供试材料, 对其根际与非根际土壤不同形态的氮素、有机碳含量以及pH进行差异性分析及相关分析, 以期揭示南方稀土矿不同水土保持植被下土壤碳氮的变化特征, 为南方稀土矿区的生态恢复和水土保持提供数据支持和理论依据。

\* 国家自然科学基金项目(41171232, 41371512)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41171232 and 41371512)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenzhib408@vip.163.com

作者简介: 陈海滨(1986—), 男, 福建省南安市人, 博士研究生, 主要从事生态恢复、水土保持与GIS应用等方面的研究。E-mail: chenhb13@163.com

收稿日期: 2016-01-05; 收到修改稿日期: 2016-03-04; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-03-25

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

下坑稀土矿区地理坐标为25°36'33.0"N, 116°24'57.1"E, 地处福建省长汀县河田镇, 海拔319 m, 属于中亚热带季风性湿润气候, 多年平均气温为18.4℃, 1月平均气温8.0℃, 7月平均气温27.2℃, 11月平均气温14.6℃, 无霜期265 d。年降水量1 700~2 000 mm, 降水年内变化大, 多集中于3~8月份, 占全年降水量的76%<sup>[10]</sup>。土壤主要为花岗岩在湿热气候条件下风化淋溶形成的红壤和侵蚀红壤, 抗蚀性极差, 保水保肥能力低; 水热同季, 有利于植被的生长<sup>[10]</sup>。该研究区20世纪80年代为稀土矿开采废弃地, 地表裸露, 土壤抗蚀能力减弱, 水土流失现象严重。近几年来, 经过植被恢复措施, 已经取得了一定的成效, 水土流失也得到了遏制。

### 1.2 供试材料及样地设置

在下坑稀土矿治理区选择典型植物芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)、宽叶雀稗 (*Paspalum wetsfeteini*)、枫香 (*Liquidambar formosana*) 和木荷 (*Schima superba*), 以四种植物的根际与非根际土壤作为供试土壤。其中, 芒萁为里白科多年生草本植物, 根状茎横走, 叶柄褐棕色, 大量生长于酸性红壤的山坡上, 是酸性土壤指示植物, 水土保持能力强; 宽叶雀稗为禾本科多年生草本植物, 具短根状茎, 着地部分节上可长出不定根, 须根发达, 耐热不耐寒, 较耐旱、耐瘠、耐酸, 且在肥沃湿润的土壤上生长最好; 枫香为金缕梅科落叶乔木植物, 深根性, 主根粗长, 抗风力强, 耐干旱贫瘠土壤, 不耐水涝; 木荷属山茶科常绿乔木, 好生于气候温暖湿润、土壤肥沃、排水良好之酸性土类。采样植物的形态特征和生长状况见表1。

表1 四种植物形态特征和生长状况

Table 1 Morphological traits and growth of the four species of plants

植物种 Plant species	科 Family	高度 Height (cm)	盖度 Coverage (%)	冠幅 Crown diameter (cm × cm)	地径 Ground diameter (cm)	生长状况 Growth condition
芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	里白科 Gleicheniaceae	13	6	—	—	良好 Good
宽叶雀稗 <i>Paspalum wetsfeteini</i>	禾本科 Gramineae	75	80	—	—	旺盛 Exuberant
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	180	3	40 × 50	4	良好 Good
木荷 <i>Schima superba</i>	山茶科 Theaceae	210	5	120 × 110	6	良好 Good

注: —代表无, 下同 Note: —representative none, the same below

### 1.3 土样采集

2013年11月进入初冬季节, 采集根际与非根际土壤。选取3处典型植物集中的位置分别设置面积为5 m × 5 m的样方, 均匀布点, 每个样方内对每种植物各采集3个重复样。采样点避开田边、路边、沟边等特殊部位地形以及堆过肥料的地方。先用铁锹将土壤表面枯枝落叶除去, 然后用工具刀从植物最底部开始逐段、逐层挖去上层覆土, 沿着根系的生长方向, 找到植株的须根部分, 用剪刀剪下分枝, 牛皮纸铺平于地面, 将轻轻抖动后掉下的

大块不含根系的土壤作为非根际土壤, 收到自封袋中标记保存, 仍然附着在根系上的为根际土壤, 用毛刷收集到土壤袋保存, 供分析用<sup>[9, 11-12]</sup>。

### 1.4 土壤理化性质分析

将采回的部分新鲜土壤样品过10目(2 mm)尼龙筛, 装于3号自封袋放置在4℃冰箱内保鲜待测铵态氮和硝态氮。剩余土壤样品置于牛皮纸上, 放阴凉通风处自然风干, 在风干过程中用镊子挑拣石块和根系等杂质。将风干后的土壤样品取少量用研钵进行研磨, 并且过100目(0.149 mm)尼龙筛,

装于3号自封袋,待测其他指标。全氮采用半微量凯氏法测定;铵态氮和硝态氮采用 $2\text{ mol L}^{-1}$  KCl溶液浸提,用连续流动分析仪(SKALAR SAN++,荷兰)测定;土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法测定;土壤pH采用电位法(土:水=1:2.5)测定<sup>[13]</sup>。

### 1.5 数据分析

用“富集率(enrichment rate,  $E$ )”表示根际对土壤养分的富集程度, $E$ 值的大小反映根际效应的强弱。 $E = [(\text{根际土壤含量} - \text{非根际土壤含量}) / \text{非根际土壤含量}] \times 100\%$ <sup>[4]</sup>。

全部实验数据均在Microsoft Excel 2003和SPSS 16.0软件下处理完成的。应用SPSS 16.0进行根际土壤与非根际土壤之间差异性分析( $t$ -检验),并采用相关分析探讨不同养分之间的关系。

## 2 结果

### 2.1 不同植物根际与非根际土壤养分含量特征

由表2可以看出,除pH外,下坑稀土矿治理区根际土壤与非根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮、有机碳均呈现出显著差异( $p < 0.05$ , 总体均值),相对于非根际土壤,根际土壤全氮、铵态氮、硝态氮、有机碳分别平均高出79.7%、34.2%、30.7%、164.9%,而pH平均高出0.13个单位。根际土壤对养分表现出明显的截存效应。四种植物根际与非根际土壤养分含量特征的比较可以看出,土壤全氮含量四种植物的根际土壤均高于非根际土壤,但只有宽叶雀稗、枫香差异性显著( $p < 0.05$ ),而其他两种植物芒萁和木荷无差异性。根际土壤全氮含量宽叶雀稗最高,枫香最低,四种植物均表现出一定的富集程度,其中宽叶雀稗最大,富集率为334.9%,芒萁最小,为5.9%。铵态氮含量四种植物的根际土壤均高于非根际土壤,但只有芒萁差异性显著( $p < 0.05$ ),根际土壤铵态氮含量大小排序为芒萁>木荷>枫香>宽叶雀稗,其中芒萁的含量为 $12.32\text{ mg kg}^{-1}$ ;富集程度宽叶雀稗最高达53.8%,枫香最小,为17.3%。硝态氮含量四种植物的根际土壤均高于非根际土壤,但只有宽叶雀稗差异性显著( $p < 0.05$ ),其含量大小排序为木荷>宽叶雀稗>枫香>芒萁;富集程度大小依次为木荷>宽叶雀稗>芒萁>枫香。有机碳含量四种植物根际土壤均高于非根际土壤,但只有宽叶雀稗差异

性显著( $p < 0.05$ ),根际土壤有机碳含量的排序为宽叶雀稗>芒萁>木荷>枫香;富集程度大小依次为宽叶雀稗>木荷>芒萁>枫香。pH方面,宽叶雀稗的根际pH大于非根际,而其余三种植物根际与非根际土壤pH无显著差异。不同植物pH变化幅度在0.17~0.72个单位之间,根际土壤pH大小顺序为宽叶雀稗>芒萁>枫香>木荷。

### 2.2 根际与非根际土壤养分相关性

对根际和非根际土壤各自养分含量的相关性进行分析,从Person相关系数可以看出根际土壤全氮与有机碳含量呈显著相关( $\alpha=0.01$ ),非根际土壤全氮与有机碳含量也呈显著相关( $\alpha=0.01$ )(表3),而无论根际还是非根际土壤,全氮含量与铵态氮、硝态氮含量之间无相关性,有机碳与铵态氮、硝态氮含量之间无相关性,铵态氮与硝态氮之间也无相关性。

## 3 讨论

根际是植物生长过程中形成的复杂的、动态的微型生态系统,植物根际所释放的能量能够有效促进土壤微生物和土壤的作用过程,更好地提高植物对土壤养分的吸收,对植物的生长发育起重要作用<sup>[2, 14-16]</sup>。本研究的四种植物根际对全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳表现出不同程度的富集作用。由于南方稀土矿区破坏比较严重,土壤养分含量极低,通过治理措施,植物的根际效应更为明显,这可能是在恶劣的环境下,植物为了能够正常生长,根际需要聚集更多的养分<sup>[11, 16]</sup>。詹媛媛等<sup>[4]</sup>研究了阿拉善荒漠区7种不同的旱生灌木,灌木的根际对全氮、铵态氮、硝态氮和有机碳均有很强的富集作用,根际硝态氮富集率最高,这与本研究的结果相吻合。植物对氮素和有机碳的富集程度,取决于不同的植物种类及土壤的有效养分<sup>[17]</sup>,提高养分的富集程度有利于植物更好地应对贫瘠的生活环境<sup>[16]</sup>,养分更多地植物和土壤间循环,也有利于减少土壤养分的流失。

土壤全氮作为衡量土壤肥力的重要指标,综合了所有形式的有机和无机氮素,是标志土壤氮素总量和供应植物有效氮素的源和库,具有一定的稳定性,综合反映了土壤的氮素状况<sup>[18-19]</sup>。研究区四种植物根际与非根际土壤全氮含量只有宽叶雀稗和枫香差异性显著,芒萁和木荷全氮含量无差异。

表2 下坑不同种类植物根际与非根际土壤碳氮与pH

Table 2 Carbon, nitrogen and pH in rhizosphere and bulk soils relative to type of plant in Xiakeng

植物种 Plant species	部位 Position	全氮 Total nitrogen (g kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 Ammonium nitrogen (mg kg <sup>-1</sup> )	硝态氮Nitrate nitrogen (mg kg <sup>-1</sup> )	有机碳 Organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	pH
芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	根际Rhizosphere	0.50 ± 0.05a	12.32 ± 2.81a	0.57 ± 0.10a	5.54 ± 0.95a	4.87 ± 0.14a
	非根际Bulk soil	0.47 ± 0.04a	9.32 ± 2.30b	0.50 ± 0.05a	3.67 ± 0.65a	5.10 ± 0.09a
	富集率Enrichment rate (%)	5.9	32.1	14.1	50.7	—
宽叶雀稗 <i>Paspalum wetsfeteini</i>	根际Rhizosphere	0.89 ± 0.10a	9.80 ± 0.34a	1.67 ± 0.79a	11.37 ± 1.04a	4.95 ± 0.65a
	非根际Bulk soil	0.21 ± 0.05b	6.37 ± 1.75a	1.32 ± 0.78b	1.52 ± 0.41b	4.23 ± 0.15b
	富集率Enrichment rate (%)	334.9	53.8	26.4	646.7	—
枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	根际Rhizosphere	0.39 ± 0.05a	10.07 ± 3.38a	0.73 ± 0.13a	2.55 ± 0.30a	4.62 ± 0.18a
	非根际Bulk soil	0.32 ± 0.04b	8.59 ± 0.83a	0.71 ± 0.17a	1.85 ± 0.73a	4.78 ± 0.08a
	富集率Enrichment rate (%)	22.6	17.3	2.1	38	—
木荷 <i>Schima superba</i>	根际Rhizosphere	0.46 ± 0.08a	10.63 ± 2.72a	2.12 ± 0.80a	3.85 ± 1.29a	4.52 ± 0.17a
	非根际Bulk soil	0.26 ± 0.03a	7.62 ± 1.30a	1.36 ± 0.66a	1.76 ± 0.62a	4.34 ± 0.01a
	富集率Enrichment rate (%)	83.9	39.6	55.8	119.2	—
总体均值 Total average	根际Rhizosphere	0.56 ± 0.07a	10.70 ± 1.14a	1.27 ± 0.31a	5.83 ± 1.10a	4.72 ± 0.15a
	非根际Bulk soil	0.32 ± 0.03b	7.97 ± 0.78b	0.97 ± 0.25b	2.20 ± 0.37b	4.59 ± 0.12a
	富集率Enrichment rate (%)	79.7	34.2	30.7	164.9	—

注：同种植物根际与非根际土壤若字母相同表示差异不显著， $p > 0.05$  Note: The same letters in the same lines of rhizosphere soil and bulk soil indicate no significant difference,  $p > 0.05$

表3 根际与非根际土壤养分的Person相关系数

Table 3 Person's correlation coefficients of soil nutrients in rhizosphere and bulk soils

	全氮 Total nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	硝态氮 Nitrate nitrogen	有机碳 Organic carbon
全氮Total nitrogen	—	0.165	0.273	0.939**
铵态氮Ammonium nitrogen	0.063	—	0.291	0.133
硝态氮Nitrate nitrogen	-0.445	0.392	—	0.196
有机碳Organic carbon	0.876**	-0.154	0.476	—

注：\*\*表示在0.01水平显著相关。右上方为根际土壤养分间相互关系，左下方为非根际土壤养分间相互关系 Note: \*\* means significant correlation at 0.01 level. When it is on the top right, it stands for the relationships between soil nutrients in the rhizosphere soil, and on the bottom left, it does for the relationships between soil nutrients in the bulk soil

而从根际土壤全氮含量上看，宽叶雀稗最高，芒萁次之，这可能是由于宽叶雀稗和芒萁均具有较庞大的根系，根系的活动能够更多地聚集氮素，周媛媛等<sup>[20]</sup>的研究结论认为是根毛组织表皮的脱落物、根系分泌物、根的死亡以及微生物在根际聚集使得根际土壤全氮含量提高。不同的植物具有不同的生理特征<sup>[2, 16]</sup>，所以不同的植物根际土壤对全氮的

富集程度不同。

铵态氮与硝态氮是土壤无机态氮的主要组成成分，这两种形态的氮素是土壤氨化与硝化作用的结果，它们能够直接被植物吸收利用<sup>[19]</sup>。由于所带电荷不同，氨化与硝化的作用机理也不相同<sup>[21]</sup>。相对于非根际土壤铵态氮和硝态氮的含量，研究区四种典型植物根际土壤的铵态氮和硝态氮含量

较高,说明根际土壤对无机氮素具有一定的富集作用,这与大多数的研究一致<sup>[16-17]</sup>,Herman等<sup>[22]</sup>的研究也表明根际氮的矿化速率大约为非根际土的10倍,微生物与根系相互作用有可能加速有机氮转变为植物可吸收的铵态氮,铵态氮通过硝化作用最后转化成硝态氮。铵态氮和硝态氮作为无机氮中两个重要的成分,其含量与温度和降水量等有关<sup>[21]</sup>,低温会使得硝化作用减弱。而本研究采样时间刚进入初冬季节,气温相对较高,而硝态氮的含量非常低,可能还受到其他因素的影响。有研究表明,在酸性较强的红壤中硝化作用较弱<sup>[21]</sup>,四种植物根际土壤与非根际土壤铵态氮的含量均高于硝态氮含量,说明研究区土壤可能由于强酸性的影响造成氨化作用强于硝化作用,在离子型稀土矿区植物能直接吸收利用的氮素养分主要是铵态氮。

土壤有机碳不仅是衡量土壤肥力的标志,而且是土壤碳库的主要来源,对根际土壤产生重大影响。实验结果表明,四种典型植物根际土壤有机碳含量均高于非根际土壤,这与大多数研究结果一致<sup>[2, 16-19]</sup>。根际土壤方面宽叶雀稗有机碳含量最高,芒萁次之,这可能与宽叶雀稗和芒萁是草本植物,其凋落物以及组织脱落物较多地归还到土壤当中,植物碳有效地归还到根际是植物为了适应土壤环境而建立一种更有利自身发展的环境<sup>[23]</sup>;从非根际土壤方面比较可以看出,只有芒萁的非根际土壤有机碳含量较高,陈志彪<sup>[10]</sup>的研究也发现芒萁作为一种先锋植物,在水土流失区只要能有效侵入很快就能覆盖整个地表,有效改善贫瘠的立地条件。说明在南方稀土矿区,为了有效地实现植被的恢复,草本植物在前期能够有效地提高土壤的肥力条件。

目前,大多数研究揭示不同形态的氮源( $\text{NH}_4^+$ 或 $\text{NO}_3^-$ )对根际pH影响很大<sup>[24]</sup>。阴阳离子吸收不平衡、根系分泌有机酸、根系呼吸产生的 $\text{CO}_2$ 、根系微生物活动产生的有机酸和 $\text{CO}_2$ 等因素均会引起土壤pH的变化<sup>[25]</sup>。已有的报道表明根际土壤pH高于或低于非根际土壤可达2个单位<sup>[26]</sup>,本实验结果表明四种植物中芒萁和枫香的根际土壤pH略低于非根际土壤,这与大多数的研究一致<sup>[12, 16]</sup>,出现一定的酸化现象,从而提高养分的有效性;而宽叶雀稗的根际土壤pH显著高于非根际土壤,木荷的根际土壤pH略高于非根际,这可能是植物根际为了克服强酸性环境而与土壤发生相互作用。这

两种植物的非根际土壤pH低于4.5,处于极强酸性的水平,有研究表明在酸性较强条件下微生物以真菌为主的植物会产生一定的异养硝化作用,虽然异养硝化的作用很弱<sup>[27]</sup>,本研究中宽叶雀稗和木荷根际的硝态氮含量恰好较其他两种植物高,可能存在一定的异养硝化现象。根际对硝态氮的吸收利用,总吸收量中阳离子量大于阴离子量,为了维持生理酸碱平衡释放阴离子 $\text{HCO}_3^-$ 或 $\text{OH}^-$ ,从而提高根际土壤pH<sup>[27]</sup>,以更好地克服不利的生存环境。

在稀土矿区,土壤有机碳主要来源于植物的凋落物,而土壤全氮含量取决于氮累积和消耗的相对强弱,尤其是土壤中有有机碳的生物积累和分解的相对强弱<sup>[21, 27]</sup>,因此,根际与非根际土壤全氮与有机碳之间表现为极好的相关性,这与大部分的研究相一致<sup>[2, 12, 14]</sup>。无论根际土壤还是非根际土壤,土壤全氮与铵态氮、硝态氮之间的均无相关性,而部分的研究表明根际全氮与铵态氮、硝态氮具有显著相关性<sup>[16, 20]</sup>,这可能是由于强酸性环境的影响。在旱地土壤中硝化作用一般会强于氨化作用<sup>[27]</sup>,研究区养分贫瘠的强酸性环境使得其出现相反的情况,植物为了更有效地吸收养分,通过根际微生物分解提高对有机氮的氨化作用。由于整个研究区全氮的含量很低,铵态氮和硝态氮的含量主要受土壤微生物的影响,造成与全氮含量的相关性并不显著。微生物类群及数量指标也可作为退化地土壤生态恢复效果的重要指标,本研究中还未涉及,是今后探索的一个方向,以更好地探明土壤与植物养分利用之间的关系。

## 4 结论

南方稀土矿区水土保持植物根际土壤与非根际土壤的全氮、硝态氮、铵态氮和有机碳均呈显著差异( $p < 0.05$ ),并且根际土壤分别高出非根际土壤79.7%、34.2%、30.7%、164.9%,说明根际土壤对各种氮素和有机碳具有明显的截存效应,对养分具有一定的富集作用,有利于减轻土壤养分的流失。宽叶雀稗的根际土壤pH大于非根际土壤,以克服强酸性的不利生存环境。在根际土壤与非根际土壤中,土壤全氮与土壤有机碳之间呈显著相关,而土壤全氮与土壤铵态氮、土壤全氮与土壤硝态氮之间均无相关性。四种水土保持植物为了克服稀土矿区养分贫瘠的强酸性环境,对养分有较强的富集

作用,有利于减轻水土流失区养分的流失,改善稀土矿区的生态环境。

### 参考文献

- [ 1 ] 陈志强, 陈志彪, 陈海滨, 等. 南方红壤侵蚀区土壤肥力质量与人为活动可达性的空间关系——以福建长汀县朱溪流域为例. 中国水土保持科学, 2012, 10 ( 1 ): 103—107  
Chen Z Q, Chen Z B, Chen H B, et al. Spatial relationship between soil fertility quality and human activities accessibility in the red eroded area of southern China: A case study in Zhuxi Watershed, Changting County, Fujian Province ( In Chinese ). Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10 ( 1 ): 103—107
- [ 2 ] 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. 应用生态学报, 2013, 24 ( 4 ): 983—988  
Zhu Q L, Xing X Y, Cheng M, et al. Concentrations of different carbon and nitrogen fractions in rhizosphere and non-rhizosphere soils of plant species of typical plant species in mountainous area of southern Ningxia, Northwest China ( In Chinese ). Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 ( 4 ): 983—988
- [ 3 ] 褚洪龙, 李莎, 唐明. 黄土高原油松根际土壤酶活性及真菌群落多样性研究——以黄龙山林场为例. 土壤学报, 2015, 52 ( 1 ): 154—161  
Chu H L, Li S, Tang M. Soil enzyme activity and fungal community diversity in rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* carr. growing on Loess Plateau—A case study of Huanglongshan forest farm ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 ( 1 ): 154—161
- [ 4 ] 詹媛媛, 薛梓瑜, 任伟, 等. 干旱荒漠区不同灌木根际与非根际土壤氮素的含量特征. 生态学报, 2009, 29 ( 1 ): 59—66  
Zhan Y Y, Xue Z Y, Ren W, et al. Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil under seven shrubs in arid desert area of China ( In Chinese ). Acta Ecologica Sinica, 2009, 29 ( 1 ): 59—66
- [ 5 ] 孙波, 廖红, 苏彦华, 等. 土壤—根系—微生物系统中影响氮磷利用的一些关键协同机制的研究进展. 土壤, 2015, 47 ( 2 ): 210—219  
Sun B, Liao H, Su Y H, et al. Advances in key coordinative mechanisms in soil-root-microbe systems to affect nitrogen and phosphorus utilization ( In Chinese ). Soils, 2015, 47 ( 2 ): 210—219
- [ 6 ] 朱丹, 张磊, 韦泽秀, 等. 菌肥对青稞根际土壤理化性质以及微生物群落的影响. 土壤学报, 2014, 51 ( 3 ): 627—637  
Zhu D, Zhang L, Wei Z X, et al. Effects of bacterial manure on soil physicochemical properties and microbial community diversity in rhizosphere of highland barley ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2014, 51 ( 3 ): 627—637
- [ 7 ] 高艳红, 张志山, 刘立超, 等. 腾格里沙漠植被重建对土壤呼吸的影响. 土壤学报, 2009, 46 ( 4 ): 626—633  
Gao Y H, Zhang Z S, Liu L C, et al. Effects of revegetation on soil respiration in the Tengger Desert ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 ( 4 ): 626—633
- [ 8 ] 刘少坤, 周卫军, 苗霄霖, 等. 茶树根际土壤铝形态演变规律及其影响因素. 土壤, 2014, 46 ( 5 ): 881—885  
Liu S K, Zhou W J, Miao X L, et al. Evolvement of aluminum forms and its effect factors in tea rhizospheric soil ( In Chinese ). Soils, 2014, 46 ( 5 ): 881—885
- [ 9 ] Turpault M P, Uterano C, Boudot J P, et al. Influence of mature Douglas fir roots on the solid soil phase of the rhizosphere and its solution chemistry. Plant and Soil, 2005, 275 ( 1/2 ): 327—336
- [ 10 ] 陈志彪. 花岗岩侵蚀山地生态重建及其生态环境效应. 福州: 福建师范大学, 2005  
Chen Z B. Rehabilitation of eroded granite mountainous region and its eco-environmental effects ( In Chinese ). Fuzhou: Fujian Normal University, 2005
- [ 11 ] 曾曙才, 苏志尧, 陈北光, 等. 植物根际营养研究进展. 南京林业大学学报 ( 自然科学版 ), 2003, 27 ( 6 ): 79—83  
Zeng S C, Su Z Y, Chen B G, et al. A review on the rhizosphere nutrition ecology research ( In Chinese ). Journal of Nanjing Forestry University ( Natural Sciences Edition ), 2003, 27 ( 6 ): 79—83
- [ 12 ] 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. 林业科学, 2007, 43 ( 8 ): 138—142  
Huang G, Zhao X Y, Zhang T H, et al. pH and nutrition properties of rhizosphere soils of three shrub species in Horqin Sandy Land ( In Chinese ). Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43 ( 8 ): 138—142
- [ 13 ] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000  
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry ( In Chinese ). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [ 14 ] Ciccazzo S, Esposito A, Rolli E, et al. Different pioneer plant species select specific rhizosphere

- bacterial communities in a high mountain environment. Springer Plus, 2014, 3 (1): 391
- [ 15 ] Jorquera M A, Martínez O A, Marileo L G, et al. Effect of nitrogen and phosphorus fertilization on the composition of rhizobacterial communities of two Chilean Andisol pastures. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2014, 30 (1): 99—107
- [ 16 ] Massaccesi L, Benucci G M N, Gigliotti G, et al. Rhizosphere effect of three plant species of environment under periglacial conditions (Majella Massif, central Italy). Soil Biology & Biochemistry, 2015, 89: 184—195
- [ 17 ] Wookey P A, Arets R, Bardgett R D, et al. Ecosystem feedbacks and cascade processes: Understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change. Global Change Biology, 2009, 15 (5): 1153—1172
- [ 18 ] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and soil, 2002, 241 (2): 155—176
- [ 19 ] 李菊梅, 王朝辉. 有机质、全氮和可矿化氮在反映土壤供氮能力方面的意义. 土壤学报, 2003, 40 (2): 232—238
- Li J M, Wang C H. Significance of soil organic matter, total N and mineralizable nitrogen in reflecting soil N supplying capacity (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2003, 40 (2): 232—238
- [ 20 ] 周媛媛, 杜明新, 周向睿, 等. 毛乌素沙漠南缘紫穗槐根际与非根际氮素含量特征. 草业科学, 2013, 30 (4): 515—520
- Zhou Y Y, Du M X, Zhou X R, et al. Characteristics of nitrogen content between rhizosphere and bulk soil of *amorpha fruticosa* with different plant ages in southern ridge of Mu Us Desert (In Chinese). Prataccultural Science, 2013, 30 (4): 515—520
- [ 21 ] 陆景陵. 植物营养学. 北京: 中国农业大学出版社, 2000
- Lu J L. Plant nutrition (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2000
- [ 22 ] Herman D J, Johnson K K, Jaeger C H, et al. Root influence on nitrogen mineralization and nitrification in *Arena barbat* rhizosphere soil. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70 (5): 1504—1511
- [ 23 ] Boddy E, Robetsa P, Hilla P W, et al. Turnover of low molecular weight dissolved organic C (DOC) and microbial C exhibit different temperature sensitivities in Arctic tundra soils. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40 (7): 1557—1566
- [ 24 ] Chen Y L, Han S J, Zhou Y M. The rhizosphere pH change of *Pinus koraiensis* seedlings as affected by N sources of different levels and its effect on the availability and uptake of Fe, Mn, Cu and Zn. Journal of Forestry Research, 2002, 13 (1): 37—40
- [ 25 ] Hinsinger P, Plassard C, Tang C, et al. Origins of root mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: A review. Plant and soil, 2003, 248 (1/2): 43—59
- [ 26 ] Hinsinger P, Bengough G, Vetterlein D, et al. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance. Plant and Soil, 2009, 321 (1/2): 117—152
- [ 27 ] 陈怀满. 环境土壤学. 北京: 科学出版社, 2010
- Chen H M. Environmental soil science (In Chinese). Beijing: Science Press, 2010

## Carbon, Nitrogen and pH in Rhizosphere of Soil-Water Conserving Plants in Rare Earth Mining Area in South China

CHEN Haibin<sup>1, 2, 3</sup> MA Xiuli<sup>1, 2</sup> CHEN Zhibiao<sup>1, 2†</sup> CHEN Zhiqiang<sup>1, 2</sup>

(1 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

(2 State Key Laboratory Breeding Base of Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China)

(3 Minnan Normal University, Zhangzhou, Fujian 363000, China)

**Abstract** *Dicranopteris dichotoma*, *Paspalum wetsfeteini*, *Liquidambar formosana* and *Schima superba* are four typical species of plants used for soil and water conservation in a rare earth mining area in South China, and were selected as subjects in this study to investigate changes in contents of various forms of nitrogen and organic carbon and pH in the rhizospheres of the plants and in the bulk soil as well. Results show that on average, total nitrogen, ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was 79.7%, 34.2% and 30.7%,

respectively, higher in the rhizosphere soil than in the bulk soil; soil organic carbon was 164.9% higher and soil pH was 0.13 unit lower. The difference between the rhizosphere soil and the bulk soil was quite obvious except in soil pH. The content of total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and organic carbon was higher in the rhizosphere soil, regardless of plant type, than in the bulk soil. The soil pH in the rhizosphere soil of *Paspalum wetsfeteini* was higher than that in the bulk soil, but no significant difference was found between soil pH in the rhizosphere and bulk soil of *Dicranopteris dichotoma*, *Liquidambar formosanas* and *Schima superbas*. Soil total nitrogen was positively related to organic carbon both in the rhizosphere soil and the bulk soil, but neither to ammonium nitrogen nor to nitrate nitrogen. All the findings in this study indicate that the all the four types of plants in the rare earth mining area have strong sequestration effects on both carbon and nitrogen, and can be used as main pioneer plants to restore vegetation and ecology of the rare earth mining areas in South China.

**Key words** South China; Rare earth mining area; Rhizosphere soil; Bulk soil; Nitrogen; Soil organic carbon

(责任编辑：陈荣府)