

武夷山不同海拔植被土壤微生物量 N 时空变异*

王国兵¹ 王 丰^{1,2} 金裕华¹ 汪家社³ 阮宏华^{1**}

(¹ 南京林业大学森林资源与环境学院江苏省林业生态工程重点实验室, 南京 210037; ² 上海泽泉科技有限公司, 上海 200333; ³ 福建省武夷山国家级自然保护区管理局, 福建武夷山 354315)

摘 要 为了阐明我国中亚热带森林区土壤微生物量 N 的时空变异特征及其主要影响因子, 在福建省武夷山国家自然保护区选择了常绿阔叶林 (EBF, 500 m)、针叶林 (CF, 1200 m)、亚高山矮林 (SDF, 1800 m) 和高山草甸 (AM, 2100 m) 4 种不同海拔植被类型土壤 (0 ~ 10、10 ~ 25、25 ~ 40 cm) 进行研究。结果表明, 土壤微生物量 N 随着海拔高度的增加显著增加, 在 0 ~ 10 cm 土层中 EBF、CF、SDF、AM 土壤微生物量 N 分别为 106.7、140.8、254.9 和 355.8 mg · kg⁻¹, 不同海拔之间土壤微生物量 N 差异显著 ($P < 0.05$)。土壤微生物量 N 在 0 ~ 10 cm 土壤表层最高, 随着土壤深度的增加而逐渐减小。4 种不同植被类型的 3 个土壤层次中土壤微生物量 N 均具有明显的季节动态变化, 且变化规律一致, 均表现为冬季最高, 秋季次之, 夏季最低。相关分析表明, 在 0 ~ 10 cm 土层影响土壤微生物量 N 沿海拔梯度空间变异的主要因子是土壤湿度、土壤有机质及全 N 含量, 而影响土壤微生物量 N 季节性变异的主要因子是土壤水分与土壤温度。

关键词 武夷山; 土壤微生物量 N; 时空变异

中图分类号 S154.38 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)4-0784-06

Spatiotemporal variation of soil microbial biomass N under different vegetations along an altitude gradient in Wuyi Mountains of Southeast China. WANG Guo-bing¹, WANG Feng^{1,2}, JIN Yu-hua¹, WANG Jia-she³, RUAN Hong-hua^{1**} (¹Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering of Jiangsu Province, College of Forest Resources and Environmental Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; ²Zequan Technology Co., Ltd., Shanghai 200333, China; ³The National Natural Preserve of Wuyi Mountains in Fujian Province, Wuyishan 354315, Fujian, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, **30**(4): 784–789.

Abstract: In order to understand the spatiotemporal variation of soil microbial biomass N and its main controlling factors in subtropical forest regions in China, 0–10, 10–25, and 25–40 cm soil samples were collected from the evergreen broadleaf forest (EBF, 500 m a. s. l.), coniferous forest (CF, 1200 m a. s. l.), subalpine dwarf forest (DF, 1800 m a. s. l.), and alpine meadow (AM, 2100 m a. s. l.) along an altitude gradient in the Wuyi Mountains National Nature Reserve, Fujian Province from April 2006 to January 2007. With increasing altitude, the soil microbial biomass N increased significantly, being 106.7, 140.8, 254.9 and 355.8 mg · kg⁻¹ in 0–10 cm soil layer under EBF, CF, SDF, and AM, respectively, and there was a significant difference ($P < 0.05$) among different altitudes. Soil microbial biomass N was the highest in 0–10 cm layer, and decreased gradually with soil depth. In the four ecosystems, there was a consistent seasonal variation of soil microbial biomass N, i. e., the highest in winter, tended to decrease in spring, and the lowest in summer. Correlation analysis showed that in 0–10 cm soil layer, the main factors controlling the spatial variation of soil microbial biomass N along the altitude gradient were soil moisture, organic matter, and total N, while the main factors regulating the temporal variation of soil microbial biomass N were soil moisture and temperature.

Key words: Wuyi Mountains; soil microbial biomass N; spatiotemporal variation.

* 国家自然科学基金项目(30670313)和南京林业大学高学历人才基金项目(163010063)资助。

** 通讯作者 E-mail: hruan1690@yahoo.com

收稿日期: 2010-10-21 接受日期: 2010-12-30

土壤微生物生物量 N 是指土壤中体积 $< 5000 \mu\text{m}^3$ 活的和死的微生物体内氮的总和,其化学组成大部分是蛋白质和多肽类物质,C/N 值一般为 5 ~ 6 (唐玉霞等,2002)。土壤微生物生物量 N 是土壤 N 素的一个重要储备库,并且具有较快的周转速率,因此在调控土壤氮对植物有效性和 N 素循环方面起着重要的调节作用(周建斌等,2001;王淑平和周广胜,2003;张电学等,2005)。土壤微生物生物量 N 的消长是土壤 N 素内循环的本质性内容,研究土壤微生物生物量 N 的消长有助于揭示进入土壤的 N 素的生物固持和释放的本质,对于提高氮肥利用效率和减少氮肥损失具有实际意义,同时研究微生物生物量 N 也有利于研究生物脱硝过程中释放的 N_2O 对温室效应的影响。

目前,对土壤微生物生物量 N 的研究主要集中在季节动态(王淑平和周广胜,2003;Barbhuiya *et al.*, 2004;Devi & Yadava,2006;Soh *et al.*, 2010)、植物利用有效性(周建斌等,2001,2003;Kushwaha *et al.*, 2000;Zhou *et al.*, 2010)及其影响因素等方面(Singh *et al.*, 2007;Wang *et al.*, 2009;徐华勤等,2009;罗兰芳等,2010;焦晓光等,2010),但是在我国中亚热带地区关于土壤微生物生物量 N 的研究还鲜有报道。本文以武夷山不同海拔植被带为研究对象,探讨土壤微生物生物量 N 沿海拔梯度的时空变异规律及主要影响因子,旨在为进一步探明中亚热带森林生态系统养分循环规律及调控机理提供数据支撑。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

福建省武夷山国家级自然保护区位于福建省西北部,地理位置为 $27^{\circ}33'N$ — $27^{\circ}54'N$, $117^{\circ}27'E$ — $117^{\circ}51'E$;年均气温 12°C ~ 18°C ,年均相对湿度 82% ~ 85%,年均雾日 100 d 以上,年均降水量 2000 mm 左右。拥有世界同纬度带现存面积最大、保存最完整的中亚热带常绿阔叶林生态系统。境内以黄岗山为主峰,海拔高 2158 m,植被垂直带谱分布完整,依次为常绿阔叶林(海拔 200 ~ 1000 m)、针阔混交林(1000 ~ 1350 m)、针叶林(1350 ~ 1750 m)、亚高山矮林(1750 ~ 1900 m)以及高山草甸(1750 ~ 2158 m)等不同的植物群落。设置固定样地的代表性植物群落的基本情况如下:

常绿阔叶林(EBF)。海拔 500 m 左右,复层林

结构,种类组成复杂,乔木层平均胸径 9.2 cm,林冠较高,郁闭度较大;土壤为山地黄壤,土层厚 ≥ 80 cm,枯枝落叶层厚 3 ~ 4 cm,优势种为米槠(*Castanopsis carlesii*)、甜槠(*C. eyrei*)、木荷(*Schima superba*)等。

针叶林(CF)。海拔 1200 m 左右,林相较整齐,种类组成简单,上层以黄山松为主,平均胸径 22 cm,下层肿节竹较多,土壤为山地黄壤,土层较薄(40 cm 左右),表层多细根,上覆盖枯枝落叶 5 ~ 7 cm,优势种为黄山松(*Pinus taiwanensis*)、肿节竹(*Oligostachyum oedognatum*)等。

亚高山矮林(SDF)。海拔 1800 m 左右,以落叶树种为主,树干常扭曲,较矮小,土壤为山地黄壤,土层厚,上覆盖枯枝落叶 4 ~ 5 cm,优势种为白檀(*Symplocos paniculata*)、铁杉(*Tsuga heterophylla*),并混有少量紫茎(*Stewartia sinensis*)等。

高山草甸(AM)。海拔 2000 m 左右,群落结构非常简单,草本植物占优势,主要以禾本科青茅(*Calamagrostis brachytricha*)为主,灌木零星分布其间,有云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)、猫儿刺(*Mahonia fortunei*)等。土壤为山地草甸土,土层较薄(30 cm 左右),上覆盖枯草 1 ~ 2 cm。不同海拔植被类型土壤各层理化性质见表 1(周焱,2009)。

1.2 土壤样品的采集、处理及分析

分别在 4 种不同植被类型内选择代表性地段,各随机设置 3 个 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的重复样地,4 个海拔梯度上共设置 12 个样地。用直径 2 cm、长 15 cm 的土壤取样钻,分别在每个样地内任选一点各取 0 ~ 10、10 ~ 25、25 ~ 40 cm 土层土壤约 200 g 带回实验室进行及时简单处理,挑出石头、植物根系等杂物。土壤取样时间分别是 2006 年 4 月、7 月、10 月和 2007 年 1 月。

土壤微生物生物量 N 采用熏蒸-提取法测定(Brookes,1985)。具体方法为:用 $0.5\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 K_2SO_4 做提取剂(土:液=1:4),在 25°C 的条件下放入震荡器中震荡 30 min ($300\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)后用无磷滤纸过滤,在过滤液中加入还原剂 $\text{KCr}(\text{SO}_4)_2$ 、Zn 粉、 H_2SO_4 、 CuSO_4 进行消煮,最后用凯氏定氮仪测定。土壤微生物生物量 N (MBN) 的计算公式为: $\text{MBN} = \text{EN} / \text{KEN}$ 。式中:EN 为熏蒸与未熏蒸土样所提取的全氮之间的差值;KEN 为熏蒸杀死的微生物中的氮被 K_2SO_4 所提取的比例,取值 0.45 (Brookes *et al.*, 1985)。

表 1 武夷山不同海拔梯度带土壤理化性质
Table 1 Soil chemical and physical properties at different elevation gradients in the Wuyi Mountains

样地	土层 (cm)	总有机 C (mg · g ⁻¹)	全 N (mg · g ⁻¹)	全 P (mg · g ⁻¹)	全 K (mg · g ⁻¹)	pH	土壤容重 (g · cm ⁻³)
常绿阔叶林	0 ~ 10	44. 78	5. 46	0. 83	0. 18	4. 52	0. 96
	10 ~ 25	30. 09	4. 72	0. 66	0. 13	4. 82	1. 03
	25 ~ 40	24. 39	4. 69	0. 49	0. 07	4. 86	1. 16
针叶林	0 ~ 10	59. 63	5. 58	0. 45	0. 41	3. 93	0. 80
	10 ~ 25	26. 92	5. 27	0. 36	0. 21	4. 76	0. 90
	25 ~ 40	24. 01	4. 16	0. 23	0. 11	4. 72	1. 03
亚高山矮林	0 ~ 10	96. 27	8. 05	0. 93	0. 38	4. 36	0. 71
	10 ~ 25	60. 12	6. 05	0. 72	0. 19	4. 85	0. 85
	25 ~ 40	42. 94	5. 12	0. 37	0. 13	4. 90	0. 95
高山草甸	0 ~ 10	140. 45	10. 06	1. 43	0. 49	4. 53	0. 67
	10 ~ 25	98. 91	8. 96	1. 03	0. 37	4. 82	0. 73
	25 ~ 40	48. 43	5. 35	0. 78	0. 26	5. 04	0. 93

1.3 数据处理

统计分析采用 SPSS 11. 5 统计软件进行,不同海拔梯度、不同土壤层次及不同季节之间土壤微生物量 N 的差异运用 one-way ANOVA 分析,采用线性回归方法分析土壤微生物量 N 与土壤理化性质、土壤微生物量 C、细根生物量、凋落物输入量等因子之间的相关关系。

2 结果与分析

2.1 不同海拔植被土壤微生物生物量 N 的空间变异特征

在 0 ~ 10 cm 土层,EBF、CF、SDF、AM 4 种不同海拔植被土壤微生物生物量 N 年平均值分别为 106. 7、140. 8、254. 9 和 355. 8 mg · kg⁻¹,在 10 ~ 25 cm 土层,土壤微生物生物量 N 年平均值分别为 52. 07、79. 96、158. 70 和 264. 74 mg · kg⁻¹,在 25 ~ 40 cm 土层,土壤微生物生物量 N 年平均值分别为 23. 09、36. 48、65. 72 和 99. 96 mg · kg⁻¹,不同海拔之间土壤微生物生物量 N 差异显著($P<0. 05$)。3 个土壤层次土壤微生物生物量 N 沿海拔梯度的变化表现出了一致的规律性,即随着海拔高度的增加,土壤微生物生物量 N 显著增加(图 1)。在同一海拔植被土壤中,土壤微生物生物量 N 在 0 ~ 10 cm 土层最高,并且随着土层深度的增加而逐渐减小。EBF、CF、SDF、AM 4 种不同海拔植被类型 0 ~ 10 cm 土层土壤微生物生物量 N 分别是 10 ~ 25 cm 土层的 2. 05、1. 76、1. 61、1. 34 倍,是 25 ~ 40 cm 土层的 4. 62、3. 86、3. 88、3. 56 倍(图 1)。不同土壤层次间土壤微生物生物量 N 差异显著($P<0. 05$)。

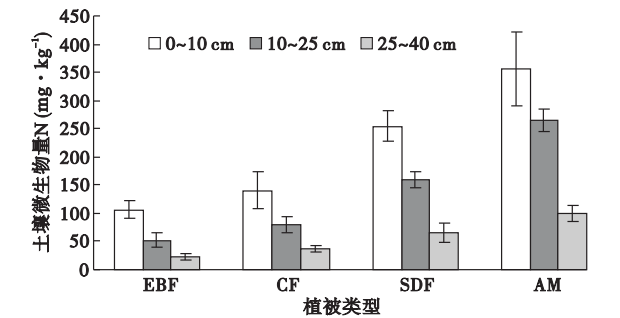


图 1 4 种不同海拔植被土壤微生物生物量 N 的空间变异特征
Fig. 1 Spatial variations of soil microbial biomass N under four different plant communities

2.2 不同海拔植被土壤微生物生物量 N 的季节变异特征

在 0 ~ 10 cm 土层,EBF、CF、SDF 和 AM 4 种不同海拔植被土壤微生物生物量 N 冬季最高,依次为 148. 2、173. 1、298. 4 和 438. 4 mg · kg⁻¹,分别是春季的 1. 44、1. 24、1. 19、1. 27 倍,是夏季的 2. 45、1. 87、1. 48、1. 56 倍,是秋季的 1. 28、1. 10、1. 11、1. 22 倍。在 10 ~ 25 cm 土层和 25 ~ 40 cm 土层,土壤微生物生物量 N 的季节动态变化表现出与表层土壤一致的规律性,即土壤微生物生物量 N 冬季最高,秋季次之,夏季最低(表 2)。方差分析表明,4 种不同海拔植被土壤微生物生物量 N 的季节变异均达到了显著性水平($P<0. 05$)。

2.3 土壤微生物生物量 N 的主要影响因子

结合武夷山同一研究地点已经获取的土壤微生物生物量 C、植物细根生物量、凋落物输入量、土壤理化性质等系列研究数据(权伟等,2008,2010;

表 2 4 种不同海拔植被土壤微生物生物量 N 的季节变异特征
Table 2 Seasonal variations of soil microbial biomass N under four different plant communities

季节	土层 (cm)	常绿阔叶林	针叶林	亚高山矮林	高山草甸
春季	0 ~ 10	102. 65±9. 44	139. 65±13. 51	250. 42±23. 07	344. 80±27. 35
夏季		60. 42±5. 67	92. 81±9. 36	201. 02±18. 57	281. 37±20. 26
秋季		115. 47±10. 62	157. 44±15. 09	269. 61±24. 70	358. 41±27. 59
冬季		148. 24±13. 24	173. 15±14. 61	298. 42±22. 36	438. 43±33. 75
春季	10 ~ 25	44. 06±4. 12	65. 74±7. 58	150. 57±14. 20	237. 27±18. 27
夏季		30. 24±3. 21	60. 55±4. 39	119. 98±11. 23	181. 34±13. 04
秋季		54. 41±5. 09	82. 11±8. 01	154. 12±14. 68	247. 74±16. 48
冬季		79. 58±7. 35	111. 43±10. 89	210. 11±20. 49	392. 6±30. 23
春季	25 ~ 40	19. 08±1. 84	34. 07±3. 33	64. 18±6. 02	97. 36±8. 49
夏季		15. 32±2. 24	26. 34±2. 66	52. 98±4. 94	78. 52±6. 74
秋季		23. 56±2. 22	37. 21±3. 59	66. 47±6. 22	100. 08±7. 70
冬季		34. 39±3. 18	48. 28±6. 58	79. 23±5. 27	123. 87±9. 53

周焱等,2009;何容等,2009a,2009b),对土壤微生物生物量 N 的主要影响因子进行了分析。由于前期的研究数据大多限于 0 ~ 10 cm 土层,因此本次相关分析只探讨了 0 ~ 10 cm 土层土壤微生物生物量 N 的主要影响因子。

相关分析结果表明,在 0 ~ 10 cm 土层,土壤湿度、土壤温度、土壤微生物生物量 C 是影响土壤微生物生物量 N 季节变异的主要生态因子,其中土壤温度与土壤微生物生物量 N 的季节变异显著负相关,说明植物停止生长的低温季节有利于土壤微生物生物量 N 的积累。细根生物量及凋落物输入量的季节变化对土壤微生物生物量 N 的季节变异无显著影响(表 3)。

在 0 ~ 10 cm 土层,土壤有机质含量、土壤总 N 及土壤湿度沿海拔梯度逐渐升高,并且与土壤微生

物生物量 N 呈显著正相关,表明土壤有机质含量、土壤总 N 及土壤湿度是影响 0 ~ 10 cm 土层土壤微生物生物量 N 沿海拔梯度变异的主要生态因子。土壤温度、土壤 C/N、pH 值、细根生物量、凋落物输入量对 0 ~ 10 cm 土层土壤微生物生物量 N 沿海拔梯度的空间变异无显著影响(表 4)。

表 3 土壤微生物生物量 N 季节变异影响因子
Table 3 Relationship between the seasonal variations of soil microbial biomass N and its affecting factors

	土壤微生物生物量 C	土壤湿度	土壤温度	细根生物量	凋落物输入量
相关系数	0. 863 **	0. 859 **	-0. 500 *	0. 354	0. 137
P	0. 000	0. 000	0. 049	0. 179	0. 706
n	16	16	16	16	10

* P<0. 05, ** P<0. 01),表 4 同。

表 4 土壤微生物生物量 N 空间变异影响因子
Table 4 Relationship between the spatial variations of soil microbial biomass N and its affecting factors

	土壤有机质	土壤全氮	土壤 C/N	土壤温度	土壤湿度	土壤 pH	细根生物量	凋落物输入量
相关系数	0. 957 *	0. 988 *	0. 833	-0. 765	0. 969 *	0. 539	0. 49	0. 650
P	0. 043	0. 012	0. 167	0. 235	0. 031	0. 461	0. 51	0. 549
n	4	4	4	4	4	4	4	3

3 讨 论

3.1 土壤微生物生物量 N 的时空变异特征

土壤微生物生物量 N 是指微生物体内 N 素的总和,因此其作为土壤微生物生物量的重要组成部分,亦具有明显的时空变异特征。土壤微生物生物量 N 是土壤微生物参与土壤 N 循环的重要环节,受土壤中 N 素含量、植物生长对 N 素利用变化等因素

制约,其时空变异特征与土壤微生物生物量 C 有所不同。如,van Gestel 等(1992)研究表明,在湿润的冬季和初春土壤微生物生物量 N 的质量分数最高,在干旱的夏季土壤微生物生物量 N 的质量分数最低。本研究结果表明,土壤微生物生物量 N 在早春较高,夏季最低,秋季又恢复到较高水平,并且在冬季达到最大值,这与其他一些研究结果基本一致(van Gestel,1992;Markus & Rainer,2002;Barbhuiya

et al., 2004)。在具有明显干湿交替地区的相关研究表明,土壤微生物生物量 N 在雨季维持在较低水平而在旱季维持在较高水平 (Singh *et al.*, 1989; Barbhuiya *et al.*, 2004),但是也有一些研究结果与此相反,如 Devi 和 Yadava (2006) 对印度东北区橡树混交林的研究发现,土壤微生物生物量 N 在雨季最高而在冬季最低。

对不同生态环境的土壤,土壤微生物生物量变化为草地>林地>耕地,与土壤有机质变化趋势基本一致(何振立,1997)。微生物量 C/N 比值变化范围为 4.1~8.2,平均为 6.2(陈国潮和何振立,1998)。以上这些研究表明,土壤微生物生物量 N 存在着较大的空间变异。杨刚等(2008)研究表明,土壤微生物生物量 N 在草丛、灌丛、次生林、成熟林 4 种不同植被类型间差异显著。彭佩钦等(2005)研究表明,不同类型湿地土壤微生物生物量 C、N 有明显差异,而且均随土壤深度的增加而降低。本研究表明,土壤微生物生物量 N 不仅在同一土壤中的不同垂直梯度上具有显著差异,而且在沿海拔梯度上的不同植被类型土壤中也具有显著的空间变异性。

3.2 土壤微生物生物量 N 的主要影响因素

研究表明,土壤微生物生物量 N 的空间及季节变异主要受土壤有机质含量、土壤有机质化学组成、土壤总氮含量、土壤温度、土壤湿度、植物生长对养分的竞争等因素的调控。一般认为,土壤有机质含量、土壤有机质 C/N 比及土壤总氮含量是导致不同生态系统土壤微生物生物量 N 空间差异的主要因素(Barbhuiya *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2010)。本研究表明,土壤有机质含量、土壤总 N 及土壤湿度是影响 0~10 cm 土层土壤微生物生物量 N 沿海拔梯度变异的主要生态因子。

植物生长对养分的竞争是影响土壤微生物生物量 N 季节变异的主要因子 (Sarathchandra *et al.*, 1984; Singh *et al.*, 2007),而土壤温度与土壤湿度的季节变化能够显著影响植物生长对土壤养分的竞争状况,从而间接调控了土壤微生物生物量 N 的季节变异 (Singh *et al.*, 1989; Raghubanshi, 1995; Barbhuiya *et al.*, 2004)。此外,土壤原生动物对土壤微生物的取食可能对土壤微生物生物量 N 的季节变异起到了一定的调控作用 (Singh *et al.*, 1989; Michelsen *et al.*, 2004)。本研究的相关分析表明,土壤湿度和土壤温度是影响土壤微生物生物量 N 季节变异的主要因子,而其具体调控机理可能与植物生

长对 N 素的竞争密切相关,即在植物生长旺盛的夏季,土壤温度较高,微生物周转较快,加之植物根系对养分的竞争,导致了土壤微生物生物量 N 维持在较低水平,而在植物生长非旺盛期和休眠期,土壤湿度较高并且土壤温度较低,植物根系减缓或停止了对土壤养分的吸收,促进了土壤微生物 N 的积累。土壤微生物生物量 N 在植物生长和休眠过程中分别扮演了土壤养分“源”和“汇”的角色,有利于 N 素在生态系统内的固持和周转,大大提高了植物生长对 N 素利用的有效性。

参考文献

- 陈国潮,何振立. 1998. 红壤不同利用方式下的微生物量研究. 土壤通报, **29**(6): 276-278.
- 何容,汪家社,阮宏华,等. 2009a. 武夷山植被带土壤微生物量沿海拔梯度的变化. 生态学报, **29**(9): 5138-5144.
- 何容,王国兵,阮宏华,等. 2009b. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子. 生态学杂志, **28**(3): 394-399.
- 何振立. 1997. 土壤微生物量及其在养分循环和环境质量评价中的意义. 土壤, (2): 61-69.
- 焦晓光,魏丹,隋跃宇. 2010. 长期培肥对农田黑土土壤微生物量碳、氮的影响. 中国土壤与肥料, (3): 1-3.
- 罗兰芳,聂军,郑圣先,等. 2010. 施用控释氮肥对稻田土壤微生物生物量碳、氮的影响. 生态学报, **30**(11): 2925-2932.
- 彭佩钦,张文菊,童成立,等. 2005. 洞庭湖典型湿地土壤碳、氮和微生物碳、氮及其垂直分布. 水土保持学报, **19**(1): 49-53.
- 权伟,连洪燕,徐侠,等. 2010. 武夷山不同海拔植被土壤细根生物量季节变化. 南京林业大学学报(自然科学版), **34**(3): 146-150.
- 权伟,徐侠,阮宏华,等. 2008. 武夷山不同海拔高度植被细根生物量及形态特征. 生态学杂志, **27**(7): 1095-1103.
- 唐玉霞,贾树龙,孟春香. 2002. 土壤微生物生物量氮研究综述. 中国生态农业学报, **10**(2): 76-78.
- 王淑平,周广胜. 2003. 土壤微生物量氮的动态及其生物有效性研究. 植物营养与肥料学报, **9**(1): 87-90.
- 徐华勤,章家恩,冯丽芳,等. 2009. 广东省不同土地利用方式对土壤微生物量碳氮的影响. 生态学报, **29**(8): 4112-4118.
- 杨刚,何寻阳,王克林,等. 2008. 不同植被类型对土壤微生物量碳氮及土壤呼吸的影响. 土壤通报, **39**(1): 189-191.
- 张电学,韩志卿,李东坡,等. 2005. 不同促腐条件下秸秆

- 还田对土壤微生物量碳氮磷动态变化的影响. 应用生态学报, **16**(10): 1903–1908.
- 周 焱, 徐宪根, 王 丰, 等. 2009. 武夷山不同海拔梯度土壤微生物生物量、微生物呼吸及其商值 (q_{MB} , q_{CO_2}). 生态学杂志, **28**(2): 265–26.
- 周 焱. 2009. 武夷山不同海拔土壤有机碳库及其矿化特征 (博士学位论文). 南京: 南京林业大学.
- 周建斌, 陈竹君, 李生秀. 2001. 土壤微生物量氮含量、矿化特性及其供氮作用. 生态学报, **21**(10): 1718–1725.
- 周建斌, 李生秀, 陈竹君, 等. 2003. 利用 $^{15}NO_3^-$ 标记法研究土壤微生物量氮的化学及生物有效性. 土壤学报, **40**(6): 888–893.
- Barbhuiya AR, Arunachalam A, Pandey HN, *et al.* 2004. Dynamics of soil microbial biomass C, N and P in disturbed and undisturbed stands of a tropical wet-evergreen forest. *European Journal of Soil Biology*, **40**: 113–121.
- Brookes PC, Aader L, Pruden G, *et al.* 1985. Chloroform fumigation and there lease of soil nitrogen; A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**: 837–842.
- Devi NB, Yadava PS. 2006. Seasonal dynamics in soil microbial biomass C, N and P in a mixed-oak forest ecosystem of Manipur, North-east India. *Applied Soil Ecology*, **31**: 220–227.
- Kushwaha CP, Tripathi SK, Singh KP. 2000. Variations in soil microbial biomass and N availability due to residue and tillage management in a dryland rice agroecosystem. *Soil and Tillage Research*, **56**: 153–166.
- Markus R, Rainer GJ. 2002. C and net N mineralisation in a coniferous forest soil: The contribution of the temporal variability of microbial biomass C and N. *Soil Biology and Biochemistry*, **34**: 841–849.
- Michelsen A, Anderson M, Jensen M, *et al.* 2004. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems. *Soil Biology and Biochemistry*, **36**: 1707–1717.
- Raghubanshi AS. 1995. Dynamics of soil biomass C, N, and P in a dry tropical forest in India. *Biology and Fertility of Soils*, **12**: 55–59.
- Sarathchandra SU, Perrott KW, Upsdell MP. 1984. Microbiological and biochemical characteristics of a range of New Zealand soils under established pastures. *Soil Biology and Biochemistry*, **16**: 177–183.
- Singh JS, Raghubanshi AS, Singh RS, *et al.* 1989. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. *Nature*, **338**: 499–500.
- Singh S, Ghoshal N, Singh KP. 2007. Variation in soil microbial biomass and crop roots due to differing resource quality inputs in a tropical dryland agroecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, **39**: 76–86.
- Soh S, Shinya F, Method K, *et al.* 2010. Effect of land management and soil texture on seasonal variations in soil microbial biomass in dry tropical agroecosystems in Tanzania. *Applied Soil Ecology*, **44**: 80–88.
- van Gestel M, Ladd JN, Amato M. 1992. Microbial biomass responses to seasonal change and imposed drying regimes at increasing depths of undisturbed topsoil profiles. *Soil Biology and Biochemistry*, **24**: 103–111.
- Wang XL, Yu J, Li XG, *et al.* 2009. Effects of land use on soil total and light fraction organic, and microbial biomass C and N in a semi-arid ecosystem of northwest China. *Geoderma*, **153**: 285–290.
- Zhou JB, Chen XL, Zhang YL, *et al.* 2010. Nitrogen released from different plant residues of the Loess Plateau and their additions on contents of microbial biomass carbon, nitrogen in soil. *Acta Ecologica Sinica*, **30**: 123–128.
-
- 作者简介 王国兵,男,1979 年生,博士生。主要从事土壤生态系统结构与气候变化响应方面的研究。E-mail: wangguobing81@yahoo.com.cn
- 责任编辑 魏中青
-