

硝化细菌在 3 种沉积土壤中的变化规律研究: II.硝化细菌与 pH 等因子之间的关系

王艾荣¹, 罗汉金¹, 梁 博¹, 任 源¹, 罗凌峰²

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510640; 2. 广州市第一一三中学, 广东 广州 510630)

摘 要:硝化细菌在土壤氮素转化过程中起着重要的作用,为了研究其规律性,选用变质岩、沉积岩和花岗岩为母质的土壤为样品,模拟珠江三角洲地区的年降雨量和施肥量,用室内人工土柱法研究了 3 种土壤中硝化细菌的变化规律。整个模拟过程根据施肥和灌水频率的不同分为 3 个阶段。结果表明,在施肥阶段,硝化细菌数量随着含水率的增加而增加,没有施肥时细菌数量随着含水率的增加而减少;3 种土壤的 pH 值均在 3~7 之间,浅层的 pH 值总是高于深层的 pH 值;3 种土壤间的 pH 值差异性明显,大小顺序为变质岩>花岗岩>沉积岩; Δ pH 值随着灌水频率的降低而增大。气温的增加促进硝化细菌的增长。通过数理统计分析揭示了表层土壤影响因子的变化必将引起深层土壤相应各因子的变化的特征。3 种土壤不同的理化性质及物质组成引起了硝化细菌数量与 pH 值、含水率、气温等因子相互关系的差异性。

关键词:硝化细菌;沉积土壤;pH;含水率;气温

中图分类号:X172 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)03-0970-08

Variation of Nitrifier Populations in Three Sedimentary Soils: II. Relationships between nitrifier populations, pH and other factors

WANG Ai-rong¹, LUO Han-jin¹, LIANG Bo¹, REN Yuan¹, LUO Ling-feng²

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangzhou 113 High School, Guangzhou 510630, China)

Abstract: Nitrifiers (including ammonia oxidizing bacteria (AOB) and nitrite oxidizing bacteria (NOB)) play a significant role in soil nitrogen transformation. Soil columns were used with various water and fertilizer application amounts. The amounts were typical average annual rainfall and fertilizer application quantity in Pearl River Delta. Three kinds of sedimentary soils (including altered rock, granite, and sedimentary rock) were used to investigate the transformation of nitrifier populations. According to the different sampling and rainfall frequency, the experimental period was separated to three stages. The results indicated that the pH value at 10 cm of the three sediment soils was from 3 to 7 which were larger than at 110 cm. The sequence of the pH value among three soils was: altered rock>granite>sedimentary rock. The Δ pH value was inversely proportional to the rainfall frequency. Nitrifier populations were directly proportional to moisture when fertilized, but inversely proportional to moisture without fertilization. Higher temperature can promote nitrifier growth. For the three sedimentary soils investigated, nitrifier populations differed because of their different properties and components. Statistical analysis revealed that variation of factors in top soil changed the corresponding factors in deep soil.

Keywords: nitrifiers; sedimentary soil; pH; moisture content; temperature

农业化肥的大量施用,造成了地下水硝态氮污染^[1]。集约化农业生产施肥引起的 NO₃⁻-N 负荷量占硝态氮污染总量的 60%以上。硝化细菌促成了硝化反应的进行,而整个硝化作用的强度与硝化细菌的数

量呈极大的正相关^[2],因此,研究土壤中硝化细菌在施肥条件下变化规律,对于弄清肥料在土壤中的硝化机理、减少氮损失及指导农业科学施肥都具有重要的意义。

范晓晖等^[3]研究了红壤和潮土中硝化作用和矿化作用的比较,认为硝化速率随着 pH 值的升高而增大;张树兰^[4]通过对陕西几种土壤中硫酸铵硝化作用的实验研究,得出 60%的田间持水量是土壤硝化作用

收稿日期:2007-05-31

基金项目:教育部留学归国人员项目基金(2004 年)

作者简介:王艾荣(1982—),女,湖北钟祥人,在读硕士,主要从事水土污染环境方面的研究。E-mail: war1003.student@sina.com.cn

通讯作者:罗汉金 E-mail: luohj@scut.edu.cn

进行的最适宜水分量;赵海萍等^[5]通过对渤海湾海域硝化、亚硝化细菌的数量变化分析得出了硝化细菌的数量和氨氮、水温、溶氧量都有极大的相关性。硝化细菌的生长受很多因素的影响,如灌水频率、施肥量、温度、含水率和 pH 值等。从单一的影响因素来解释硝化反应的进行难以反映实际的变化机理,因此需要考虑多个参数,才能比较全面了解硝化机理。前文^[6]讨论了硝化细菌在 3 种沉积土壤中的变化规律,现在来讨论硝化细菌数量与 pH 值,含水率,气温变化的关系,应用数理统计方法分析 3 个阶段中各因素与硝化细菌含量的相关性。

1 材料与方法

材料与方法同参考文献[6]。

2 结果与分析

2.1 硝化细菌数量与 pH 值的关系

土壤 pH 值对细菌含量影响很大,在微酸性及中性条件下硝化作用旺盛,pH>8 或 pH<4.5 时,硝化作

用不能进行^[7]。尿素加入到土壤后土壤的 pH 立刻上升,随着硝化作用的进行,逐渐降低至低于未施肥的空白对照样品^[8]。

试验结果如图 1~图 3 所示。从 3 种土壤分别在 110 cm 处的图中可以看出,在 4 月 24 日取样时,水才流到 110 cm,所以前 3 次取样时土壤的 pH 值和细菌含量都没有变化。土壤表层在 4 月 14 日施肥后, pH 值下降;水分在 4 月 24 日达到土壤深层,使其 pH 值也下降。

从图中可知,3 种土壤 pH 值均在 3~7 之间,且在 10 cm 处的 pH 值总是大于在 110 cm 处的 pH 值;3 种沉积土壤的 pH 值差异性明显,在两个深度时都有相同的大小顺序,土壤 1>土壤 3>土壤 2。这是由于 3 种沉积土壤物化性质的不同造成的。由于供试土壤来自南方 3 大岩类的沉积土壤,位于地表以下 3 m 处,土壤的脱硅富铝化作用使其呈现酸性^[9],又由于未受到污染,因此比一般的南方红壤 pH 值更低。而深处的 pH 值大于浅层的 pH 值,是由于加水之后尿素被冲到土柱深处,肥料分解后导致 pH 值降低^[8]。尿素在

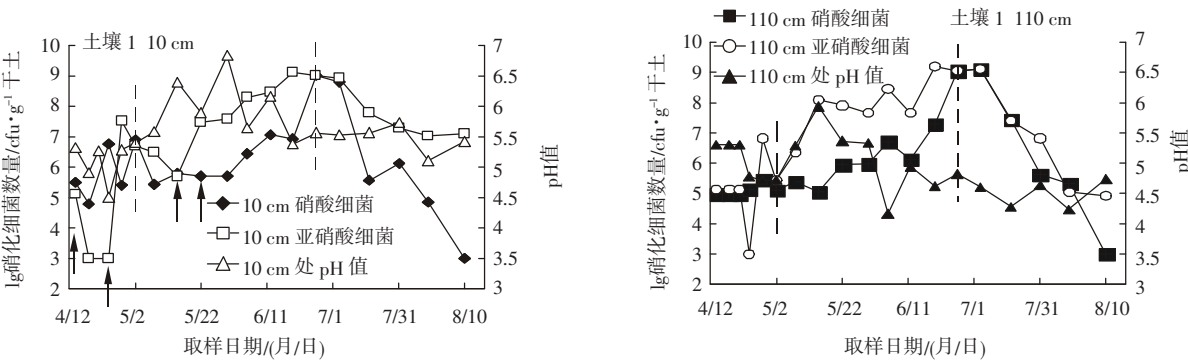


图 1 土壤 1 在 10 cm 和 110 cm 处细菌含量和 pH 值随着时间的变化

Figure 1 Changes of nitrifiers and pH value at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No. 1 during the experiment

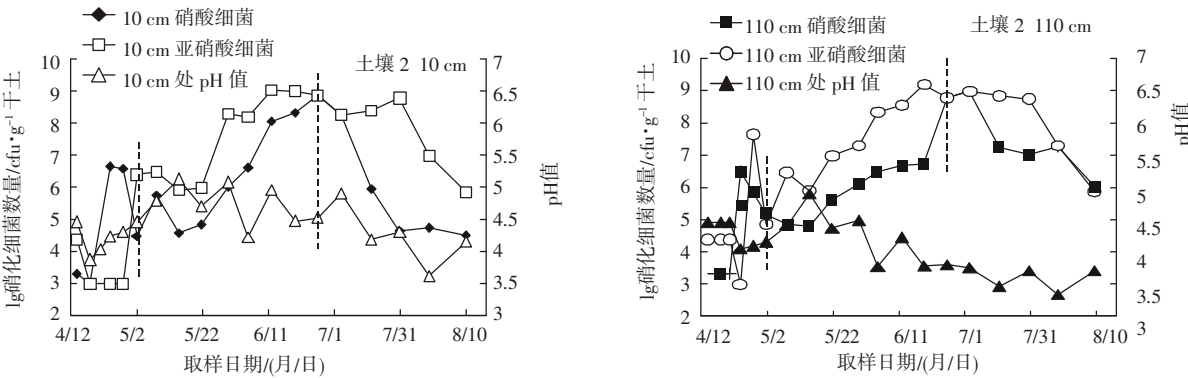


图 2 土壤 2 在 10 cm 和 110 cm 处细菌含量和 pH 值随时间的变化

Figure 2 Changes of the nitrifiers and pH value at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No. 2 during the experiment

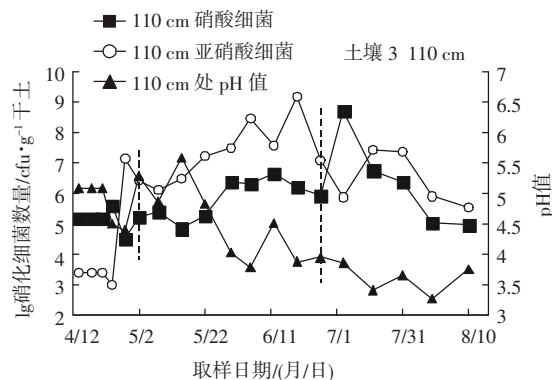
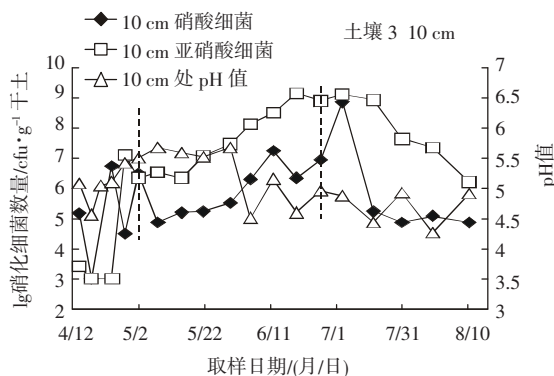


图3 土壤3在10 cm和110 cm处细菌含量和pH值随时间的变化

Figure 3 Changes of nitrifiers and pH value at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No. 3 during the experiment

水解之后产生 NH_3 , 很快转化为 NH_4^+ , 亚硝酸细菌会把 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , NO_2^- 再被硝酸细菌进一步氧化为 NO_3^- 。

图1描述了试验过程中土壤1在两个不同深度的细菌数量和pH值的变化情况。第1阶段从4月14日到5月2日。从图中可知在4月14日第1次加入肥料后, 由于硝化作用的进行, pH值下降0.3, 110 cm处pH值不变。表层亚硝酸细菌数量下降约两个数量级, 而硝酸细菌的数量也下降约1个数量级。由于亚硝酸细菌是以 NH_4^+ 为食物来源, 第1次施肥量较大, 到下次取样时间隔了4 d, 尿素已经水解完全, 并开始发生硝化反应, 使得土壤pH值降低^[10-12], 同时由于高浓度 NH_4^+ 的毒害作用直接抑制了亚硝酸细菌的活性^[13], 使其含量下降, 同时也间接导致了硝酸细菌含量的降低。土壤2和土壤3在首次施肥后的变化趋势以及变化幅度和土壤1极为相似, 在此不赘述。4月24日第2次施肥后, 土壤1表层pH值有所上升, 水刚流到土壤深层, 致使深层pH值下降。第2次施肥量比第1次明显减少, 土壤灌水量增加, 水分的下渗冲走了施肥硝化作用产生的 H^+ , 降低了土壤中 H^+ 浓度, 且 H^+ 与土壤中 CaCO_3 以及磷酸盐系等矿物作用, 消耗了部分 H^+ , 使得土壤表层pH值逐渐上升。从4月28日的结果来看, 第2次施肥后细菌含量都极大的增加, 尿素分解后, 被稀释的 NH_4^+ 作为食物来源促进了微生物的生长。在4月14日到4月24日这两次施肥期间, 土壤1表层的pH值变化不规则, 这主要是由于刚加水, 水分在土壤中的运移受到土壤结构种类性质等渗透条件的影响。

亚硝酸细菌含量在这段时间由于强烈的抑制作用数量变化很小, 但仍然促进硝化反应的进行, 硝化

反应第1步生成的 NO_2^- 促进了硝酸细菌含量的增加。第1阶段的这个灌水频率下, 土壤1在表层 ΔpH 值为0.9。相应深层的变化为0.6。3种土壤的 ΔpH 大小顺序为土壤3>土壤1>土壤2。

第2阶段从5月2日到6月26日, 灌水频率比前一阶段降低, 3种土壤在不同深度的pH值都增加, 最大值都约为7。这段时间两种细菌的含量都极大增加, NH_4^+ 被稀释, 促进了微生物的繁殖。这个阶段有两次施肥, 土壤1在5月15日施肥后pH下降约0.5, 5月22日施肥后pH变化很小, 前一次施肥量较大对土壤酸度影响也大, 硝化作用的进行使得pH降低。又因为这两次施肥之间, 灌水时间间隔较长, 总的肥料加入量增大, 硝化作用加强, 微生物食物丰富, 数量增加。王歆鹏等^[13]也在研究中发现, 硝化细菌的最大比生长速率为 5.2 d^{-1} 左右, 这个阶段持续将近20 d, 计算可知, 与本研究中硝化细菌数量在这个阶段上升约2个数量级的结果相符。在第2阶段的灌水频率下, 3种土壤的 ΔpH 值增加很明显。土壤1在这个灌水频率下表层 ΔpH 值为1.52, 相应深层为1.7。这个阶段pH值变化的幅度大小顺序为土壤1>土壤3>土壤2。相应3种土壤中细菌含量的变化差异和 ΔpH 值之间的关系不明显, 这是由于硝化细菌的生长受到很多因素的影响, 仅靠某一种因素是不能完全解释对硝化细菌生长的影响。其中温度对细菌的生长影响也很大, 将在2.3节继续讨论。

第3阶段从6月26日到8月10日, 这期间没有施肥, 灌水频率增加, pH值变化不大, 相应的两种细菌的数量也是处于缓慢下降的趋势, 由于硝化细菌代谢速度慢, 不会因为食物的缺少而在短时间内死亡^[14], 所以其数量变化缓慢。这个阶段灌水频率增加, 3种

土壤在不同深度 ΔpH 值都约为 0.6。3 种土壤之间的 ΔpH 值差异性不明显。

2.2 硝化细菌数量与含水率的关系

硝化细菌是好气性微生物,其活性受土壤中氧分压的强烈影响,后者又受到土壤水分含量的控制。一般土壤含水率为田间最大持水量的 50%~60%时,土

壤中的硝化作用最为旺盛^[5]。含水率影响土壤中的氧化还原环境,对微生物的生长有很大的控制作用。为此研究了两个不同深度的含水率和细菌含量的关系,结果如图 4~图 6 所示。

模拟降水有两个去处,一部分由于重力作用流向土柱底部,使得土壤底部含水率较高,这和 3 种土壤

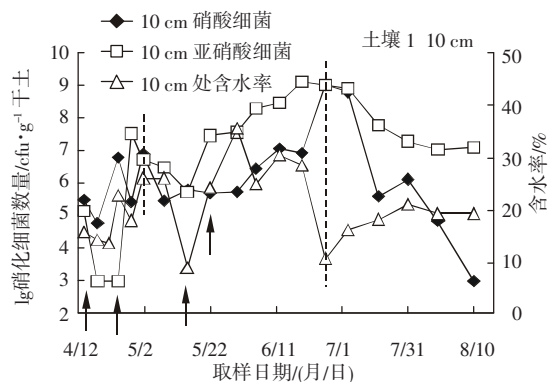


图 4 土壤 1 在 10 cm 和 110 cm 处细菌含量和含水率随时间的变化

Figure 4 Nitrifiers and moisture at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No.1 during the experiment

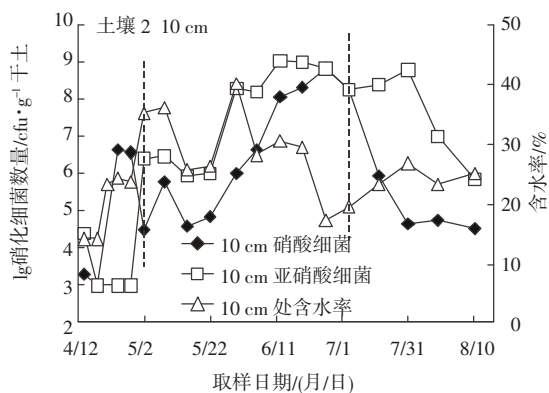
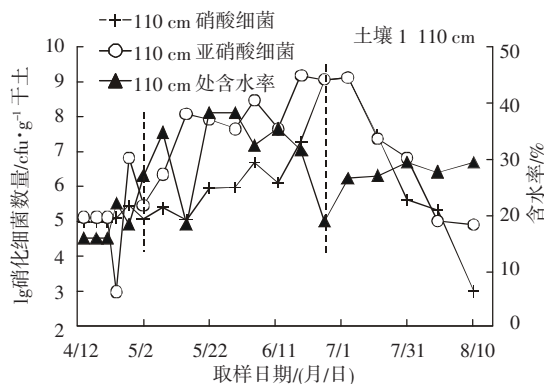


图 5 土壤 2 在 10 cm 和 110 cm 处细菌含量和含水率随时间的变化

Figure 5 Nitrifiers and moisture at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No.2 during the experiment

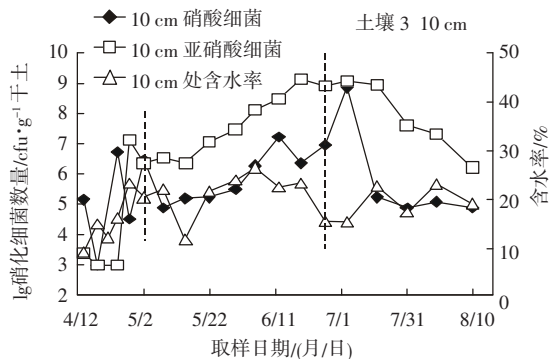
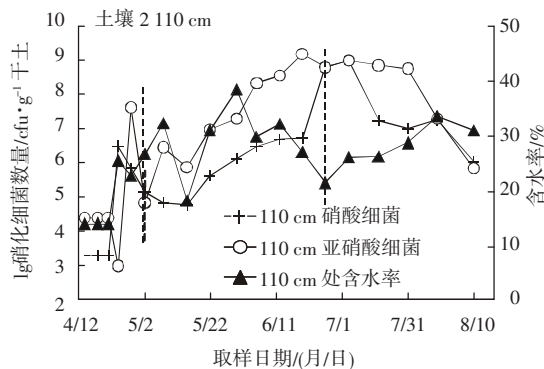
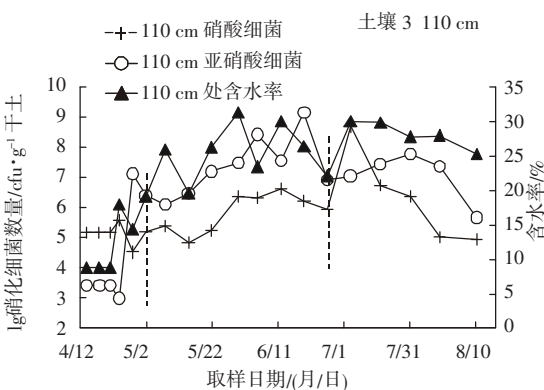


图 6 土壤 3 在 10 cm 和 110 cm 处细菌含量和含水率随时间的变化

Figure 6 Nitrifiers and moisture at the depth of 10 cm and 110 cm in soil No.3 during the experiment



中 110 cm 处含水率曲线总是在 10 cm 的上方这个结果相一致;另外一部分水分蒸发进入大气,土壤表层蒸发尤甚,土柱内部水分含量由这两部分综合作用决定。比较 6 幅图,看出 4 次施肥之后两个深度的含水率和硝化细菌数量都增大了。因为无论温度高低,尿素大约在 3 d 左右就能够完全水解^[16],尿素的转化为微生物的生长提供了食物,硝化作用加强,微生物很快繁殖,数量增大。含水率的最大值在第 4 次施肥后取得,为 40% 左右;最小值在 10% 左右(背景值)。

3 种土壤在 110 cm 处,前 3 次取样土壤含水率不变。第 1 阶段从 4 月 14 日到 5 月 2 日,从图 4 中看出土壤 1 含水率增大很快,由于试验前土壤干燥,含水率低,加水之后土壤颗粒大量吸收水分,含水率急剧增高。这段时间内有两次施肥,肥料分解后过高的 NH_4^+ 浓度,抑制了细菌的活性,使得在 4 月 14 日至 4 月 24 日期间细菌含量变化很小。4 月 24 日之后土壤含水率增加,使得土壤的通气性良好,促进了微生物的活性, NH_4^+ 也逐步被稀释,作为硝化细菌的食物来源,使得硝化细菌数量增加。这段时间内土壤 1 含水率的增大率为 26%, 3 种土壤含水率增大的大小顺序为土壤 2 > 土壤 1 > 土壤 3。这与土壤本身的物理和化学性质有关,粘粒组分多,水分不易下渗到底部,透水性相对较差,含水率变化差异有所不同。

第 2 阶段从 5 月 2 日至 6 月 26 日,取样频率降低,温室内温度平均增高 6 °C,水分蒸发作用加剧,使得含水率增幅减缓。3 种土壤在两种不同深度的含水率都在 5 月 15 日和 6 月 26 日分别取得两个极低值。相比较而言,即使在这两次含水率较低的情况下,土壤深处的含水率还是高于表层的含水率,这是由于表层的蒸发比较剧烈,而且水分总是在向下移动中。这段时间内灌水频率较低,水分蒸发作用加强,取样时间间隔为 1 周,上部土层水分含量高于平衡水分状况的时期延长,相对较多的灌水还未运移到较深处时,即已通过土表蒸发而排出土壤,所以在 5 月 15 日时土壤含水率达到了最低值。在这两次含水率取得极低值时,相应时间的细菌含量也都下降。这个阶段温度的增加促进硝化细菌的生长,所以两种细菌在这个阶段的含量还是随着含水率的上升而增加。

第 3 阶段从 6 月 26 日至 8 月 10 日,灌水频率增加,土壤含水率缓慢上升,随后在 30% 上下浮动,相应细菌含量呈现缓慢的下降趋势。由于土壤含水率增大,相对土壤空间中的氧含量降低,肥料被消耗完,都不利于硝化细菌的生长,所以硝化细菌数量逐渐减

少。由此可以认为在施肥时,细菌数量随着含水率的增加而增加,在没有施肥时细菌数量随着含水率的增加而减少。

2.3 硝化细菌含量与气温变化的关系

温度对硝化反应影响很大,不同土壤中硝化细菌对温度要求不同^[15]。本试验中硝化细菌的适宜生长气温约为 25~33 °C。试验在楼顶建设的温室内进行,与外界的温度变化基本一致,所以取广州市天河区气象监测站的室外日平均气温作为试验期间的温度,讨论了气温对硝化细菌含量的影响,以及气温和含水率的关系。结果如图 7 所示。从图 7(a)和(b)中可知,试验期间的 3 个阶段内,硝化细菌含量和含水率都与气温表现出一定的相关性。从试验结果可知,由于 3 种土壤表现出变化趋势的一致性,所以只用土壤 2 来进行讨论。

第 1 阶段,气温的升高,促进了硝化细菌的活性;同时含水率上升,提高了土壤的通气条件,使得土壤表层细菌数量上升。深层细菌在接触到带有肥料的水

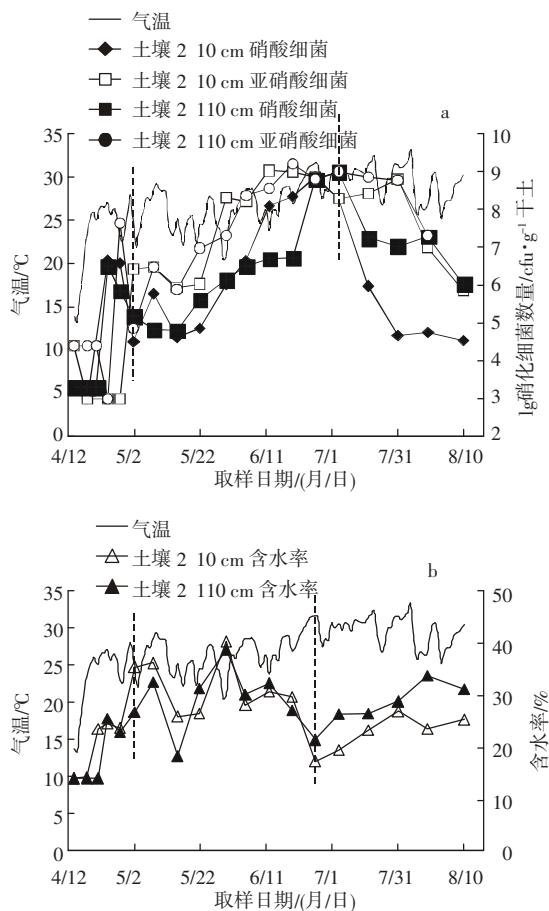


图 7 气温对硝化细菌数量和含水率的影响

Figure 7 Impacts of temperature on nitrifier populations and moisture

之后,细菌数量在波浪式变化中逐渐上升。试验刚开始时土壤颗粒很干燥,土壤表层吸收了大量的水分,而深层相对水量少,所以表层 10 cm 含水率高于深层 110 cm。这个阶段气温对含水率的影响小于灌水对含水率的影响。

第 2 阶段,气温在波动中先下降后上升,硝化细菌数量也是呈先下降后上升的趋势,但是细菌数量增加幅度减缓。灌水频率降低,水分蒸发加剧,使得含水率增幅降低,两个深度的含水量差异不大。施肥时间间隔较长,使得硝化细菌数量在施肥较长时间之后才达到最大值。此阶段硝化细菌变化率约为第 1 阶段的硝化细菌变化率的 1/5。

第 3 阶段,气温持续走高,水分蒸发量增大,所以土壤深层的含水率高于表层;另外一方面灌水频率增加,使含水率缓慢上升,这两方面的作用都有利于硝化细菌的生长,但是从图中可以看出两种细菌的含量都是减少的,这主要是没有施肥,减少了细菌的食物来源,使得硝化细菌的数量减少。

2.4 3 个阶段各因素与硝化细菌含量的相关性

上述分析表明硝酸菌、亚硝酸细菌与土壤的含水率、pH 值以及气温都有一定的相互作用,相互影响的关系,为了更好地弄清楚在不同的阶段对上述 3 种土壤的试验结果,进行了相关性统计分析,本文仅对土壤 2 进行分析讨论,其 3 个阶段的数理统计结果如表 1 至表 4 所示。

如表 1 所示,在 10 cm 处,亚硝酸细菌与含水率的相关系数为 0.818,在 110 cm 处硝酸细菌与 pH 值的相关系数为-0.713,这表明在第一阶段含水率的变化促进了硝化进程,使土壤的 pH 降低。

表 2 中显示了在 10 cm 和 110 cm 处气温与硝酸细菌的相关系数最大,分别为 0.628 和 0.646,在 110

cm 处亚硝酸细菌与 pH 值的相关系数为-0.675,这说明在施肥期间保持一定的灌水频率时,气温的升高促进了硝酸细菌的活化,其结果也使得土壤中的 pH 值下降。

在表 3 中,10 cm 硝酸菌和 110 cm 亚硝酸细菌都与含水率有较高的相关系数,分别为-0.843 和-0.938,而 10 cm 处的硝酸细菌与 pH 值则呈现正相关,其相关系数为 0.818,这反映了在第 3 阶段,停止施肥,提高灌水频率,降低了细菌的活性,从而使 pH 值有所上升。

从表 4 整个模拟过程影响因子的统计分析结果可以知道,肥料在土壤硝化反应过程中硝酸细菌与灌水、pH 值、气温等各种因素是相互作用和相互影响的,同时它们在 10 cm 和 110 cm 处的各因素之间是极为相关的,相关系数都在 0.519~0.716 之间,表明表层土壤物理化学性质及诸因素的变化必将引起深层土壤相应各因素的变化。从整个模拟试验过程的数据统计分析结果来看,硝化细菌在各种反应阶段中都存在着重要的影响因子。

3 结论

(1)3 种土壤在 10 cm 处的 pH 值总是高于 110 cm 处的 pH 值,均在 3~7 之间;3 种沉积土壤在 10 cm 和 110 cm 处的 pH 值差异性明显,大小顺序为变质岩>花岗岩>沉积岩。硝化作用随着 pH 的上升而加剧。第 1 阶段,ΔpH 值约为 0.6,第 2 阶段约为 1.0,第 3 阶段约为 0.6。3 种沉积土壤 ΔpH 值的大小顺序为:第 1 阶段花岗岩>变质岩>沉积岩;第 2 阶段变质岩>花岗岩>沉积岩;第 3 阶段 3 种土壤差异性不大。

(2)3 种土壤在 110 cm 处的含水率都比 10 cm 处的含水率要高。含水率的最大值均为 35%左右。对于

表 1 土壤 2 在第 1 阶段硝化细菌数量和各因素的相关矩阵

Table 1 The correlation matrix of nitrifiers and factors in the phase 1 in soil No.2

	10 cm 硝酸细菌	10 cm 亚硝酸细菌	10 cm 含水率	10 cm pH 值	气温	110 cm 硝酸细菌	110 cm 亚硝酸细菌	110 cm 含水率	110 cm pH 值
10 cm 硝酸细菌	1.000								
10 cm 亚硝酸细菌	-0.412	1.000							
10 cm 处含水率	0.184	0.818	1.000						
10 cm 处 pH 值	0.020	0.461	0.426	1.000					
气温	0.497	0.253	0.589	-0.388	1.000				
110 cm 硝酸细菌	0.834	-0.282	0.173	0.090	0.464	1.000			
110 cm 亚硝酸细菌	0.512	-0.256	0.074	0.167	0.015	0.009	1.000		
110 cm 处含水率	0.188	0.756	0.853	0.583	0.358	0.122	0.400	1.000	
110 cm 处 pH 值	-0.800	-0.217	-0.638	-0.441	-0.514	-0.713	-0.446	-0.759	1.000

表 2 土壤 2 在第 2 阶段硝化细菌数量和各因素的相关矩阵

Table 2 The correlation matrix of nitrifiers and factors in the phase 2 in soil No.2

	10 cm 硝酸细菌	10 cm 亚硝酸细菌	10 cm 含水率	10 cm pH 值	气温	110 cm 硝酸细菌	110 cm 亚硝酸细菌	110 cm 含水率	110 cm pH 值
10 cm 硝酸细菌	1.000								
10 cm 亚硝酸细菌	0.538	1.000							
10 cm 处含水率	-0.694	-0.210	1.000						
10 cm 处 pH 值	-0.322	-0.165	0.408	1.000					
气温	0.628	0.093	-0.647	-0.687	1.000				
110 cm 硝酸细菌	0.951	0.278	-0.701	-0.269	0.646	1.000			
110 cm 亚硝酸细菌	0.478	0.768	-0.253	-0.467	0.294	0.207	1.000		
110 cm 处含水率	-0.467	-0.060	0.805	0.107	-0.540	-0.463	-0.231	1.000	
110 cm 处 pH 值	-0.549	-0.561	0.350	0.880	-0.572	-0.416	-0.675	-0.011	1.000

表 3 土壤 2 在第 3 阶段硝化细菌数量和各因素的相关矩阵

Table 3 The correlation matrix of nitrifiers and factors in the phase 3 in soil No.2

	10 cm 硝酸细菌	10 cm 亚硝酸细菌	10 cm 含水率	10 cm pH 值	气温	110 cm 硝酸细菌	110 cm 亚硝酸细菌	110 cm 含水率	110 cm pH 值
10 cm 硝酸细菌	1.000								
10 cm 亚硝酸细菌	-0.060	1.000							
10 cm 处含水率	-0.843	0.391	1.000						
10 cm 处 pH 值	0.818	0.332	-0.495	1.000					
气温	0.116	0.633	0.168	0.659	1.000				
110 cm 硝酸细菌	1.000	-0.059	-0.847	0.812	0.107	1.000			
110 cm 亚硝酸细菌	0.647	0.552	-0.508	0.805	0.616	0.650	1.000		
110 cm 处含水率	-0.534	-0.492	0.398	-0.827	-0.806	-0.532	-0.938	1.000	
110 cm 处 pH 值	0.484	0.342	0.005	0.801	0.665	0.473	0.370	-0.475	1.000

表 4 土壤 2 在整个模拟过程中硝化细菌数量和各因素的相关矩阵

Table 4 The correlation matrix of nitrifiers and factors in the whole simulation period in soil No.2

	10 cm 硝酸细菌	10 cm 亚硝酸细菌	10 cm 含水率	10 cm pH 值	气温	110 cm 硝酸细菌	110 cm 亚硝酸细菌	110 cm 含水率	110 cm pH 值
10 cm 硝酸细菌	1.000								
10 cm 亚硝酸细菌	0.551	1.000							
10 cm 处含水率	-0.278	0.119	1.000						
10 cm 处 pH 值	0.153	0.232	0.438	1.000					
气温	0.335	0.226	0.058	-0.141	1.000				
110 cm 硝酸细菌	0.653	0.154	-0.349	0.257	0.380	1.000			
110 cm 亚硝酸细菌	0.483	0.716	-0.067	0.129	0.432	0.447	1.000		
110 cm 处含水率	-0.127	0.201	0.712	0.249	0.278	-0.053	0.113	1.000	
110 cm 处 pH 值	-0.221	-0.251	0.137	0.509	-0.621	-0.267	-0.501	-0.358	1.000

不同的土壤，在 10 cm 处含水率的大小顺序为沉积岩>变质岩>花岗岩；在 110 cm 处的大小顺序为变质岩>沉积岩>花岗岩。施肥时，硝化细菌数量随着含水率的增加而增加，没有施肥时细菌数量随着含水率的增加而减少。变质岩、沉积岩和花岗岩土壤的含水率分别为 20%~35%，30%~40% 以及 15%~30%时细菌含量达到最大值。

(3)施肥时，气温的升高促进了硝化细菌的增长；灌水频率一定时，气温的升高降低了土壤的含水率。

(4) 硝化细菌与含水率、pH 值以及气温之间的数据统计与分析表明，第 1 阶段硝化细菌的重要影响因素为：10 cm 处含水率、110 cm 处 pH 值；第 2 阶段除气温之外，还有 110 cm 处 pH 值影响较大；第 3 阶段主要因子为含水率。在整个硝化过程中，不同深度同

—影响因子之间都显示出高度相关性。

参考文献:

- [1] 徐 谦. 我国化肥和农药非点源污染状况综述 [J]. 农村生态环境, 1996, 12(2): 39–43.
XU Q. A review on the status of non-point source pollution or chemical fertilizers and pesticides in China[J]. *Rural Eco-Environment*, 1996, 12(2): 39–43.
- [2] 贺 锋, 吴振斌, 陶 菁, 等. 复合垂直流人工湿地污水处理系统硝化与反硝化作用[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 47–50.
HE F, WU Z B, TAO J, et al. Nitrification and Denitrification in the Integrated Vertical Flow constructed Wet lands[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(1): 47–50.
- [3] 范晓晖, 孙永红, 林德喜, 等. 长期试验地红壤与潮土的矿化和硝化作用特征比较[J]. 土壤通报, 2005, 36(5): 672–674.
FAN X H, SUN Y H, LIN D X, et al. The Characteristics of Mineralization and Nitrification in Red Soil and Calcareous Soil from Long Term Fertilization Experiments [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36 (5): 672–674.
- [4] 张树兰. 陕西几种土壤中硫酸铵的硝化作用及其影响因素[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1): 64–68.
ZHANG S L. NH_4SO_4 nitrification and its influence factors in Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1998, 16(1): 64–68.
- [5] 赵海萍, 陶建华, 李清雪. 渤海湾海域硝化、亚硝化细菌的生态研究[J]. 海洋技术, 2005, 24(4): 44–48.
ZHAO H P, TAO J H, LI Q X. Ecological research of nitrobacteria and ntrosobacteria in the Bohai Bay waters[J]. *Ocean Technology*, 2005, 24(4): 44–48.
- [6] 王艾荣, 罗汉金, 梁 博, 等. 硝化细菌在三种沉积土壤中的变化规律研究 I. 硝化细菌与土壤种类的关系[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 665–669.
WANG A R, LUO H J, LIANG B, et al. Variation of nitrifier populations in three sedimentary soils I .relationships between nitrifiers and soil kinds[J]. *J Agro-Environ Sci*, 2008, 27(2): 665–669.
- [7] 李永梅, 杜彩琼, 林春苗, 等. 铵态氮肥施入土壤中的转化[J]. 云南农业大学学报, 2003, 18(1): 26–29.
LI Y M, DU C Q, LIN C M, et al. The Transformation of Ammonium Nitrogen in the Soil after Fertilizer Application [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2003, 18(1): 26–29.
- [8] 同延安, 张文孝, 韩稳社, 等. 不同氮肥种类在倭土及黄锦土中的转化[J]. 土壤通报, 1994, 25(3): 107–108.
TONG Y A, ZHANG W X, HAN W S, et al. Transformation of different nitrogen fertilizers in Lou soil and Huangjing soil [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, 25(3): 107–108.
- [9] 邢世和, 周碧青. 不同配比的粉煤灰和滤泥对红壤理化性质与大麦产量的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2003, 32(2): 240–244.
XING S H, ZHOU B Q. Effects of the mixture with different proportion of fly, ash and filtered mud on red soil properties and barley yield[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2003, 32(2): 240–244.
- [10] 徐明岗, 刘 平, 宋正国, 等. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 328–333.
XU M G, LIU P, SONG Z G, et al. Progress in Fertilization on Behavior of Heavy Metals in Contaminated Soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25: 328–333.
- [11] Eriksson J E. Effects of nitrogen-containing fertilizers on solubility and plant uptake of cadmium[J]. *Water Air and Soil Poll*, 1990, 9: 55–368.
- [12] Lorenz S E, Hamon R E. Applications of nitrogen fertilizer cations affect cadmium and zinc concentrations in soil solutions and uptake by plant[J]. *European J Soil Sci*, 1994, 45: 159–165.
- [13] 王歆鹏, 陈 坚, 华兆哲, 等. 硝化菌群在不同条件下的增殖速率和硝化活性[J]. 应用与环境生物学报, 1999, 5(1): 64–68.
WANG X P, CHEN J, HUA Z Z, et al. The optimum growth and nitrification conditions of nitrifying bacteria [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 1999, 5(1): 64–68.
- [14] Shilo M, Rimon A. Factors which affect the intensification of fish breeding in Israel. 2. Ammonia transformation in intensive fish ponds[J]. *J Aquaculture Bamidgeh*, 1982, 34(3): 101–114.
- [15] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化和反硝化作用[J]. 土壤通报, 2002, 33 (5): 385–391.
FAN X H, ZHU Z L. Nitrification and denitrification in upland soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2002, 33(5): 385–391.
- [16] 董 燕, 王正银. 尿素在土壤中的转化与植物利用效率[J]. 磷肥与复肥, 2005, 20(2): 76–78.
DONG Y, WANG Z Y. Conversion of urea in soil and its plant use efficiency [J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2005, 20(2): 76–78.