

## 施氮量和土壤含水量对黑麦草还田红壤氮素矿化的影响

王晓维<sup>1,2</sup>, 徐健程<sup>1,2</sup>, 龙昌智<sup>2</sup>, 朱树伟<sup>2</sup>, 鲁美娟<sup>3</sup>, 杨文亭<sup>1,2\*</sup>

(1 江西农业大学作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 南昌 330045; 2 江西农业大学农学院, 南昌 330045;  
3 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045)

**摘要:**【目标】氮素矿化是决定土壤供氮能力的重要生态过程, 养分添加和水分在调节土壤的氮转化方面起着重要的作用。探讨施氮和土壤水分对黑麦草还田过程中土壤氮素矿化的影响有利于进一步优化红壤旱地作物生产的水肥管理。【方法】通过室内培养试验, 研究了施氮量 (0、60、120 mg/kg) 和土壤含水量 (15%、30%、45%) 对红壤旱地黑麦草还田过程中土壤净硝化量、氨化量和氮矿化量的影响。【结果】土壤含水量 15% 时, 施氮有利于提高黑麦草还田初期土壤净硝化量, 施氮量 120 mg/kg 抑制了黑麦草还田后期土壤硝化作用。在 30% 土壤含水量时, 施氮量 120 mg/kg 明显抑制了黑麦草还田后期土壤硝化作用。土壤含水量 45% 抑制了黑麦草还田初期不同施氮水平下土壤净硝化量, 但增加了黑麦草还田 91 d 时土壤净硝化量, 且施氮量 60 mg/kg 下的净硝化量显著高于 120 mg/kg 水平下的。土壤净氨化量在整个黑麦草还田过程中均为正值, 且呈现多次升高-降低的往复动态变化。土壤净氨化量在三种土壤含水量下均表现为施氮条件下的显著高于不施氮处理。土壤含水量的增加有利于提高施氮量 120 mg/kg 下黑麦草还田初期土壤的氨化作用, 但降低了黑麦草还田后期土壤净氨化量。相比不施氮, 三个含水量条件下的施氮处理在黑麦草还田过程中的大部分阶段都显著增加了土壤净氮矿化量, 土壤含水量 30% 条件下土壤净氮矿化量的变化最大。相比土壤含水量 15%, 30% 含水量促进了黑麦草还田中期 (13~57 d) 土壤净氮矿化量的增加, 45% 含水量抑制了黑麦草还田后期 (73~91 d) 土壤净氮矿化量。【结论】红壤区旱地黑麦草还田时应合理施入化学氮肥 (60 mg/kg), 在黑麦草还田初期保持较高的土壤含水量 (45%) 能够抑制土壤的氮矿化作用, 还田中后期适当降低土壤含水量 (30%) 有利于增加土壤氮素的矿化。

**关键词:** 硝态氮; 铵态氮; 矿化; 土壤含水量; 黑麦草

## Effect of nitrogen rates and soil water contents on soil nitrogen mineralization under ryegrass returning into red soil

WANG Xiao-wei<sup>1,2</sup>, XU Jian-cheng<sup>1,2</sup>, LONG Chang-zhi<sup>2</sup>, ZHU Shu-wei<sup>2</sup>, LU Mei-juan<sup>3</sup>, YANG Wen-ting<sup>1,2\*</sup>

(1 Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2 College of Agriculture, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China;  
3 College of Territorial Resources and Environmental, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

**Abstract:** 【Objectives】 Nitrogen mineralization is an important ecological process that determines ability of soil nitrogen supply. Nutrient elements addition and soil water content play important roles in regulating soil nitrogen transformation. Effect of nitrogen application and soil water content on soil nitrogen mineralization under ryegrass returning is beneficial to further optimize the management of water and fertilizer in upland red soil. 【Methods】 A laboratory experiment was conducted to study the effects of nitrogen rates and soil water contents on the soil net nitrification, ammonification and nitrogen mineralization under ryegrass (*Lolium perenne* L.) returning into red soil. 【Results】 The results showed that under the 15% soil water content, the nitrogen application improved soil net nitrification during the early stage of ryegrass returning, while in the late stage of

收稿日期: 2017-09-24 接受日期: 2017-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31360108); 江西省博士后科研择优资助项目 (2015KY42); 江西百人远航工程项目 (2015068) 资助。

联系方式: 王晓维 E-mail: sgwxw89@163.com; \*通信作者 杨文亭 E-mail: wtyang@jxau.edu.cn

ryegrass returning, the 120 mg/kg nitrogen application inhibited the soil net nitrification. Under the soil water content 30%, the 120 mg/kg nitrogen application significantly inhibited soil nitrification during the late stage of ryegrass returning. The soil water content of 45% inhibited the soil net nitrification at different nitrogen rates in the early stage of ryegrass returning, but increased the soil net nitrification at 91 d, meanwhile, the soil net nitrification under the nitrogen application of 60 mg/kg was significantly higher than that under 120 mg/kg. The soil net ammonium was positive in the whole process of ryegrass returning, and was in a dynamic change of rise- fall reciprocating. Under the three soil water contents, the soil net ammonium under the nitrogen application was significantly higher than that without nitrogen application. The increase of soil water content was beneficial to increase the soil ammoniation during the early stage of ryegrass returning under the 120 mg/kg nitrogen application, but decrease the soil net ammonia content during the later stage of ryegrass returning. Compared with soil net nitrogen mineralization without nitrogen application, it was increased with the nitrogen application under the three water contents during the most process of ryegrass returning. The 30% soil water content had the greatest change of soil net nitrogen mineralization. Compared with the soil water content of 15%, the 30% water content promoted soil net nitrogen mineralization during the middle stage of ryegrass returning (13–57 d), but the 45% water content inhibited soil net nitrogen mineralization during the late stage of ryegrass returning (73–91 d). **【 Conclusions 】** Reasonable chemical nitrogen fertilizer (60 mg/kg) should be applied during the ryegrass returning into red upland soil. Keeping high soil water content could inhibit soil nitrogen mineralization at the early stage of ryegrass returning. Reducing soil water content (30%) could increase soil nitrogen mineralization at the middle and late stages of ryegrass returning.

**Key words:** nitrate; ammonium; mineralization; soil water content; ryegrass

氮素是植物生长必需的大量元素之一<sup>[1]</sup>, 涉及植物生长发育的诸多方面<sup>[2]</sup>。有研究表明, 即使在大量施用氮肥的条件下, 作物所需的氮素仍有 50% 以上来自土壤有机氮的矿化<sup>[3]</sup>。植物能直接利用的土壤氮素主要来源于土壤有机氮通过微生物作用转化的无机氮 (主要是硝态氮和铵态氮)。氮矿化量是反映土壤供氮能力的重要指标, 也是国内外研究土壤氮素有效性的热点之一<sup>[4-5]</sup>。前人研究发现土壤含水量<sup>[6]</sup>、温度<sup>[7]</sup>、氮添加量<sup>[8]</sup>、土壤酶活<sup>[9]</sup>等因素对土壤氮矿化有重要影响。在一定范围内, 土壤氮矿化量与土壤含水量呈显著正相关, 但超过限度, 氮矿化速率显著下降<sup>[10]</sup>。通过“以水调氧”增加根际溶氧量能够提升土壤硝化势和氧化还原电位, 刺激土壤氮的矿化作用<sup>[11]</sup>。有研究表明, 在中亚热带地带性森林红壤的饱和和土壤水分条件下,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  处理的净硝化量在氮水平 66.7 mg/kg 条件下为负值<sup>[12]</sup>, 当土壤水分较低时 (15%) 能够限制土壤氮矿化作用<sup>[13]</sup>。温度能通过制约土壤微生物和酶活性达到调控土壤氮矿化。通过对紫花苜蓿土壤室内培养结果表明, 温度是影响紫花苜蓿草地氮净矿化速率的主效因子<sup>[14]</sup>。以亚热带地区天然林、格氏栲人工林和杉木人工林为对象, 采取 PVC 管原位培养连续取样法, 结果表明温度和水分是影响土壤矿质库及氮矿化速率的重要因素<sup>[15]</sup>。氮素

添加在调节土壤的氮转化方面也起着重要作用。添加外源氮素, 可以提高脲酶活性, 从而增加氨化作用形成  $\text{NH}_4^+$ , 从而增加净氨化量<sup>[16]</sup>。以紫色土为研究对象, 通过 90 d 的室内恒温 (25℃) 好气培养, 土壤含水量增加和外源氮添加均促进了土壤氮矿化, 增加了土壤矿质氮含量<sup>[17]</sup>。

红壤是我国南方重要的土地资源, 面临着降水时空分配不均<sup>[18]</sup>、水土流失严重<sup>[19]</sup>、土地质量退化<sup>[20-21]</sup>、酸化加剧<sup>[22]</sup>等诸多问题。同时, 南方红壤区属于亚热带地区, 冬季有较好的光、热等自然资源, 非常适合冬季作物的种植。大量研究表明, 绿肥的种植有利于保持水土<sup>[23-24]</sup>, 改善土壤有机质<sup>[25]</sup>, 提高土壤质量<sup>[26]</sup>。黑麦草耐寒性好、生物量大、营养价值高, 特别是近年来政府非常重视牛羊等养殖业的发展<sup>[27]</sup>, 黑麦草需求量越来越大。同时黑麦草本身氮磷钾养分含量高, 根系发达, 是一种优良的绿肥作物, 中山大学杨忠艺教授对广东稻田冬种黑麦草进行了深入研究, 黑麦草残茬还田对后茬水稻增产和土壤改良都有一定的促进作用<sup>[28-29]</sup>。土壤氮矿化量是土壤氮素可利用性的重要标志, 黑麦草作为绿肥在还田过程中, 由于温度、湿度、水分等环境因素对微生物活性的影响, 同时添加黑麦草后可能引发土壤氮素的激发效应, 发生土壤氮的矿化或固持现

象<sup>[30]</sup>。但土壤含水量和氮素添加对黑麦草还田过程中土壤氮矿化的影响尚不清楚。本研究以红壤地黑麦草还田为研究对象, 探讨土壤含水量和氮肥输入对黑麦草还田过程中红壤氮矿化的影响, 以期为南方红壤区黑麦草还田后土壤水肥优化管理提供一定的理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 供试绿肥

供试绿肥为一年生多花黑麦草 (*Lolium perenne* L.) 赣选 1 号, 于 2013 年 11 月 20 日播种, 2014 年 3 月 18 日收获, 于 80℃ 烘干恒重后用粉碎机 (DE-100 g, 浙江红景天工贸有限公司, 中国) 粉碎后干燥保存备用。黑麦草干物质中碳、氮、磷、钾含量分别为 531.52 g/kg、27.62 g/kg、21.08 g/kg、67.17 g/kg。

### 1.2 供试土壤及培养土

供试土壤采自江西农业大学科技园表层 (0—20 cm) 红壤, 于室内风干后剔除可见的植物根系, 过 2 mm 筛备用。取上述土壤和黑麦草按 100 : 2.5 比例混合均匀后制成培养土后留 300 g 测定基本养分, 剩下的立即分装。供试土壤及培养土基本养分特征见表 1。

### 1.3 试验设计

本试验于 2014 年 5 月 11 日至 8 月 8 日进行。设置 3 个土壤含水量: 15%(W1)、30%(W2)、45%(W3)。3 个施氮水平: 0 (N1)、60 mg/kg (N2)、120 mg/kg (N3)(以 0、150 mg/kg 和 300 mg/kg 纯氮施用量用表层土质量换算), 以硫酸铵  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (分析纯, 分子质量 132.14) 进行调节。土壤含水量和施氮量的组合采用双因素随机区组设计, 共 9 个处理, 每个处理 3 次重复。

培养土混匀后称取 35.88 g(干基计) 装入 50 mL 塑料离心管中, 每个处理制备 30 个离心管, 共分装 270 个离心管, 以不同含水量配制的硫酸铵  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,

氮含量 21%] 溶液调节土壤含水量和施氮量, 将离心管置于人工气候箱恒温 (25℃) 避光培养 91 d, 培养期间每隔 3 d 对离心管通气一次, 并用称重法补充含水量。于培养的第 1、3、7、13、21、31、43、57、73、91 d 进行破坏性取样。每个处理每次取 3 个重复。培养土取出后立即测定土壤硝态氮和铵态氮含量, 其中硝态氮采用紫外分光光度法, 铵态氮采用靛酚蓝比色法测定<sup>[31]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

矿化指标计算<sup>[32]</sup>:

净硝化量 (mg/kg) = 培养后土壤硝态氮含量 - 本底培养土硝态氮含量

净氨化量 (mg/kg) = 培养后土壤铵态氮含量 - 本底培养土铵态氮含量

净矿化量 (mg/kg) = 净硝化量 + 净氨化量

用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理, SPSS 19.0 统计软件进行数据分析, 采用 Duncan 法进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量和土壤含水量对黑麦草还田土壤净硝化量的影响

施氮量和土壤含水量对黑麦草还田过程中土壤净硝化量有较明显的影响。从图 1 看, 在 W1 条件下, 三个施氮水平下的净硝化量在前 7 d 都表现较低, 且 N2 水平下的土壤净硝化量出现负值。培养第 13 d 时, 三个施氮水平下的净硝化量出现峰值, 且施氮 (N2 和 N3) 条件下的均显著高于不施氮 (N1) 的。第 21 d 和 31 d 时均出现负值, 土壤净硝化量显著降低, 但施氮水平之间无显著差异。自 43 d 起, N2 和 N3 处理的净硝化量迅速增加, 并维持正值到 91 d, N1 则从 57 d 起也进入正值阶段。91 d 时, 土壤净硝化量表现为  $\text{N2} > \text{N1} > \text{N3}$ , 且 N1 和 N2 的净硝化量均显著高于 N3。W2 条件下, N1 和 N3 水平下土壤净硝化量第 3 d 时出现第一次负值, N2 则从

表 1 土壤基本养分特征

Table 1 Basic soil nutrient characteristics

土壤样品 Soil type	pH	有机碳 (g/kg) SOC	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Total N	铵态氮 (mg/kg) $\text{NH}_4^+\text{-N}$	硝态氮 (mg/kg) $\text{NO}_3^-\text{-N}$	有效磷 (mg/kg) Avail. P	速效钾 (mg/kg) Avail. K
原土 Original soil	4.85	8.59	1.47	100.23	63.15	17.07	65.98	152.75
培养土 Cultivated soil	4.65	17.01	2.75	136.17	42.53	43.15	136.19	2608.41

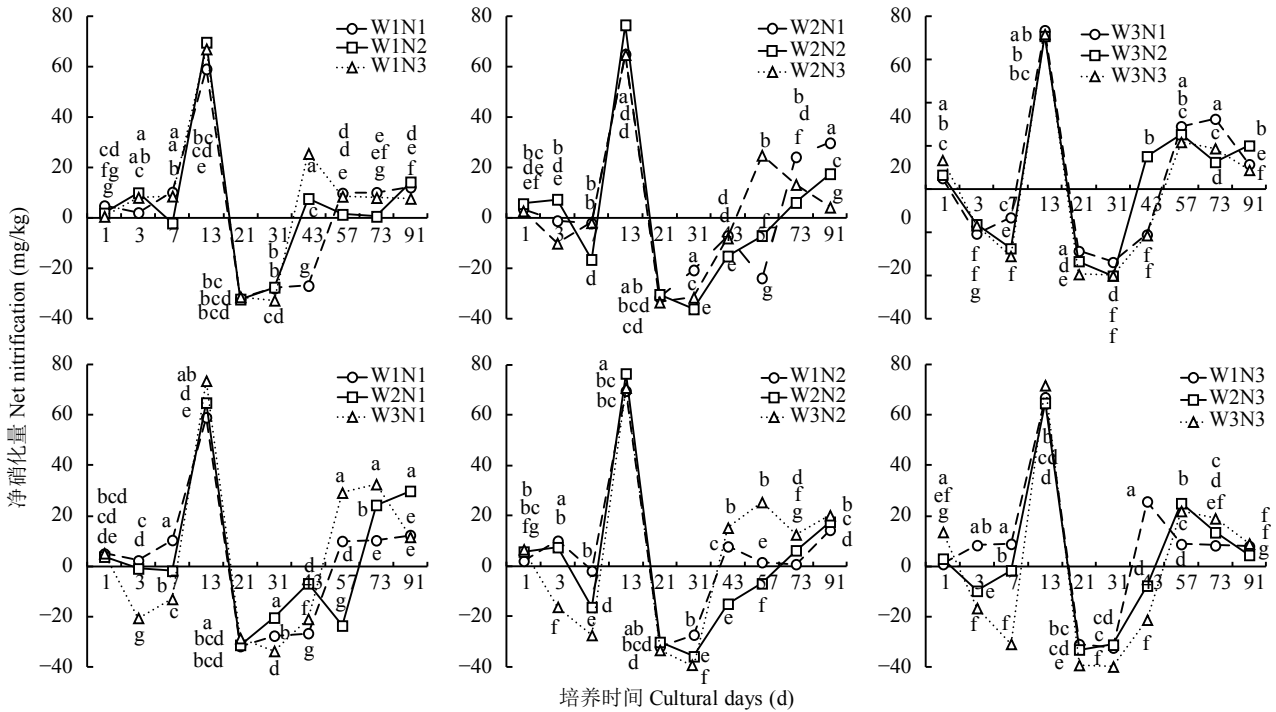


图 1 各试验处理土壤净硝化量

Fig. 1 Soil net nitrification

[注 (Note) : 图中不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异达 5% 显著水平

Different lowercase letters represent significant difference among the treatments under the same cultural time ( $P < 0.05$ ).

培养第 7 d 出现负值, 从第 13 d 起均转为正值, 但第 21 d 时都急剧下降, 出现负值, N1、N2 水平下持续至第 57 d, 而 N3 水平则持续至培养 43 d, 第 73 d 后均出现正值。培养 91 d 时, 净硝化量表现为  $N1 > N2 > N3$ , 且三个施氮水平间差异显著。W3 条件下, 三个施氮水平均自培养第 3 d 起, 土壤净硝化量迅速下降, 出现第一次负值, 施氮处理下净硝化量显著高于不施氮处理。至培养第 13 d 时成为正值, 三个施氮水平之间无显著差异。培养第 21 d 时出现第二次负值, 且负值状态下不施氮处理下的土壤净硝化量显著高于施氮处理, N2 处理在第 43 d, N1 和 N3 处理则在 57 d 后均为正值。培养 91 d 时, 净硝化量表现为  $N2 > N1 > N3$ , 且三个施氮水平差异显著。从三个土壤含水量水平来看, 土壤含水量的增加降低了红壤地黑麦草还田过程中前期 (1~43 d) 的土壤净硝化量, 但促进了黑麦草还田后期 (73~91 d) 的净硝化量, 且 N1 条件下的净硝化量均显著高于 N3 条件下。

从双因素方差分析的结果来看 (表 2), 红壤地黑麦草还田过程中, 施氮量对土壤净硝化量除第 1 d 外都产生了显著影响, 土壤含水量除第 21、43 和 91 d 外都对土壤净硝化量产生极显著影响, 施氮量和土

表 2 土壤净硝化量的双因素方差分析 (F)

Table 2 Two-way analysis of variance on soil net nitrification

培养时间 (d) Cultural days	施氮量 (N) N rate	土壤含水量 (W) Soil water content	N × W
1	0.44	10.60**	90.12**
3	8.80**	93.22**	28.45**
7	22.49**	106.22**	97.92**
13	5.77**	6.14**	744.78**
21	5.06*	2.33	446.43**
31	16.10**	24.21**	290.76**
43	5.02*	1.88	3.79
57	3.63*	13.26**	20.89**
73	76.70**	68.03**	730.17**
91	12.44**	2.85	199.82**

注 (Note) : \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

壤含水量的交互作用也极显著影响了黑麦草还田过程中的土壤净硝化量。

## 2.2 施氮量与土壤含水量对黑麦草还田土壤净硝化量的影响

从图 2 可以看出, 黑麦草还田过程中土壤净氮

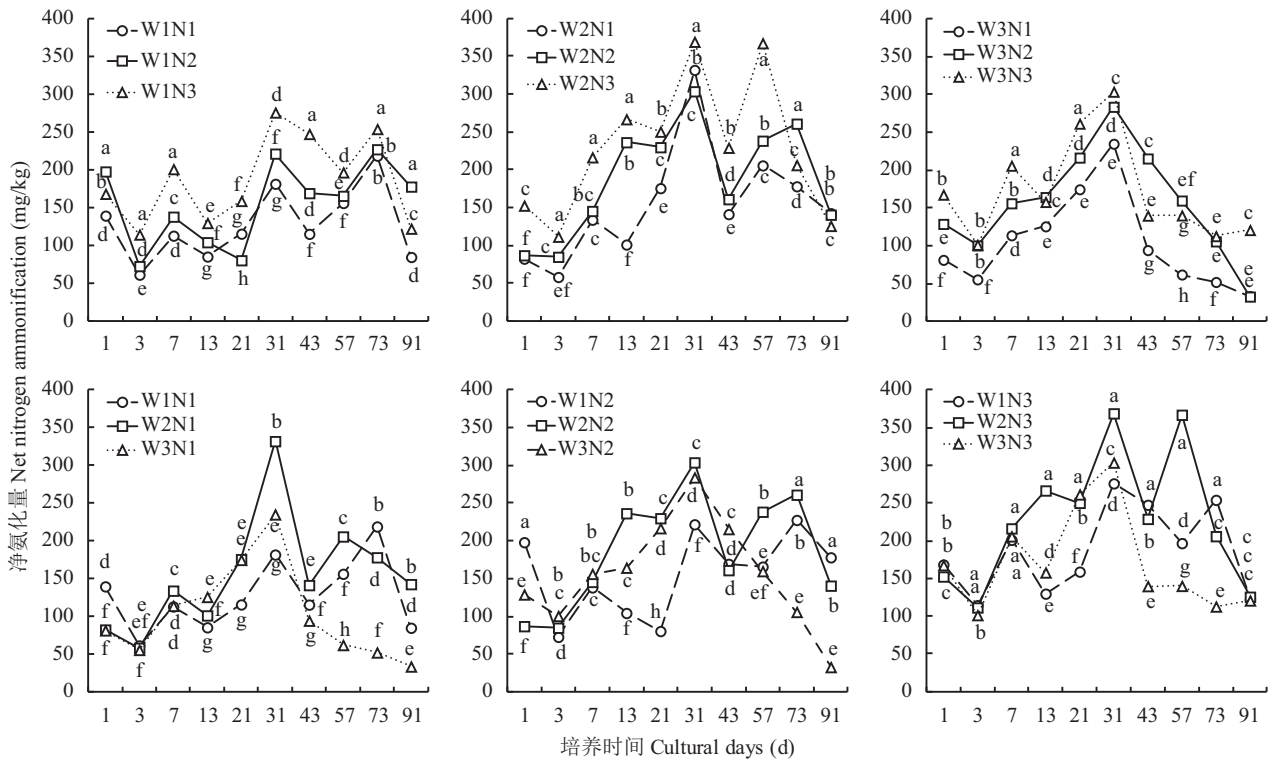


图2 各试验处理土壤净氮化量

Fig. 2 Soil net ammonification

[注 (Note): 图中不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异达 5% 显著水平

Different lowercase letters represent significant difference among the treatments under the same cultural time ( $P < 0.05$ ).

化量呈现多峰波动变化, 但净氮化量一直维持正值。土壤含水量 W1 条件下, 三个施氮水平第一次氮化高峰出现在培养第 7 d 时, 第二次高峰出现在培养第 31 d 时, 第三次高峰出现在培养第 73 d, N3 水平下的净氮化量除第 1 d 外, 都显著高于 N2 和 N1。91 d 时, 净氮化量表现为 N2 > N3 > N1, 其中 N2 较 N1 和 N3 处理净氮化量分别显著提高了 109.6% 和 45.6%。W2 条件下, N1 处理第一次氮化高峰出现在培养第 7 d 时, 而 N2 和 N3 的第一次高峰出现在培养第 13 d, 而 N1 处理此时反而降低了 24.4%。三个施氮水平处理第二次氮化高峰都出现在培养第 31 d, 此时表现为 N3 > N1 > N2, 且三个处理间差异显著。第三次氮化高峰 N1 和 N3 处理均出现在培养第 57 d, 而 N2 处理则出现在培养第 73 d。培养 91 d 时, 土壤净氮化量表现为 N1 > N2 > N3, 且 N1 和 N2 处理较 N3 处理净氮化量显著提高了 13.5% 和 11.9%。W3 条件下, N1 和 N2 处理的氮化高峰仅出现在培养第 13 d, 而 N3 处理的氮化高峰则出现在培养第 7 d 和 13 d。接下来三个施氮处理的土壤净氮化量均呈现持续下降趋势, 且施氮处理的净氮化量均显著高于不施氮处理。培养 91 d 时, 土壤

净氮化量表现为 N3 > N1 > N2, 且 N3 处理较 N1 和 N2 处理净氮化量分别显著提高了 259.1% 和 266.8%。总的来看, 红壤地黑麦草还田过程中, 施氮水平显著影响了土壤净氮化量, 施氮量的增加有利于增加土壤净氮化量。土壤含水量的增加也有利于增加高氮处理下黑麦草还田中期土壤的氮化作用, 但是土壤含水量 W3 降低了黑麦草还田后期土壤净氮化量。

从双因素方差分析的结果 (表 3) 来看, 红壤地黑麦草还田过程中, 施氮量对土壤净氮化量在 73 d 前均产生了极显著影响, 土壤含水量在除第 3 d 和 43 d 外都对土壤净氮化量产生极显著影响, 施氮量和土壤含水量的交互作用也极显著影响了黑麦草还田过程中土壤净氮化, 一定程度上说明黑麦草还田过程中土壤净氮化量的变化与施氮量和土壤含水量密切相关。

### 2.3 施氮量与土壤含水量对黑麦草还田土壤净氮矿化量的影响

从图 3 可以看出, 红壤地黑麦草还田过程中, 施氮和土壤含水量对土壤氮矿化均产生了明显影响。土壤含水量 W1 条件下, 三个施氮水平均在第 3 d

出现土壤净氮矿化量下降，同时施氮显著增加了土壤净氮矿化量，N2和N3水平下的净氮矿化量较N1分别增加了92.3%和30.1%。N3水平下净氮矿化量在培养第7~73 d时都显著高于N2和N1水平

表3 土壤净氮矿化量的双因素方差分析(F)

Table 3 Two-way analysis of variance on soil net ammonification

培养天数 Cultural days	施氮量(N) N rate	土壤含水量(W) Soil water content	N × W
1	22.05**	22.78**	123.96**
3	79.13**	0.24	265.56**
7	167.27**	4.35*	626.64**
13	18.38**	22.84**	706.90**
21	30.52**	82.52**	256.28**
31	34.45**	87.06**	687.72**
43	16.74**	2.04	679.13**
57	18.12**	48.30**	886.03**
73	17.92**	160.52**	255.40**
91	3.24	14.47**	312.71**

注 (Note) : \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ .

的，N2水平下的净氮矿化量仅在13和31 d时显著高于N1水平。三个施氮水平在第21 d时净氮矿化量都出现了明显的下降，达到整个91 d的最低值。培养91 d时，N2的土壤净氮矿化量较N1和N3水平下的显著增加了97.8%和47.8%。W2条件下，三个施氮水平下的土壤净氮矿化量呈现多峰现象，增施氮肥提高了黑麦草还田过程中土壤氮素矿化量。第13 d时，各施氮水平的净氮矿化量出现第一次高峰，且N3和N2显著高于N1。第31 d时，各施氮水平出现第二次矿化高峰，三个施氮水平净氮矿化量顺序为N3 > N2 > N1，且三者之间存在显著差异。N3在培养第57 d时出现第三次高峰，而N2和N1在第73 d时才出现，且N2 > N3 > N1。在91 d时，N1水平下的土壤氮素矿化量显著高于N2和N3水平。W3条件下，氮素的添加显著提高了土壤净氮矿化量。在培养第1 d，N3水平下的土壤净氮矿化量显著高于N2和N1。第13 d时，三个施氮水平的土壤净氮矿化量出现第一次峰值，且N3和N2均显著高于N1。培养第31 d时，三个施氮水平的土壤净氮矿化量出现第二次峰值，土壤净氮矿化量顺序为N3 > N2 > N1，且三者之间存在显著差

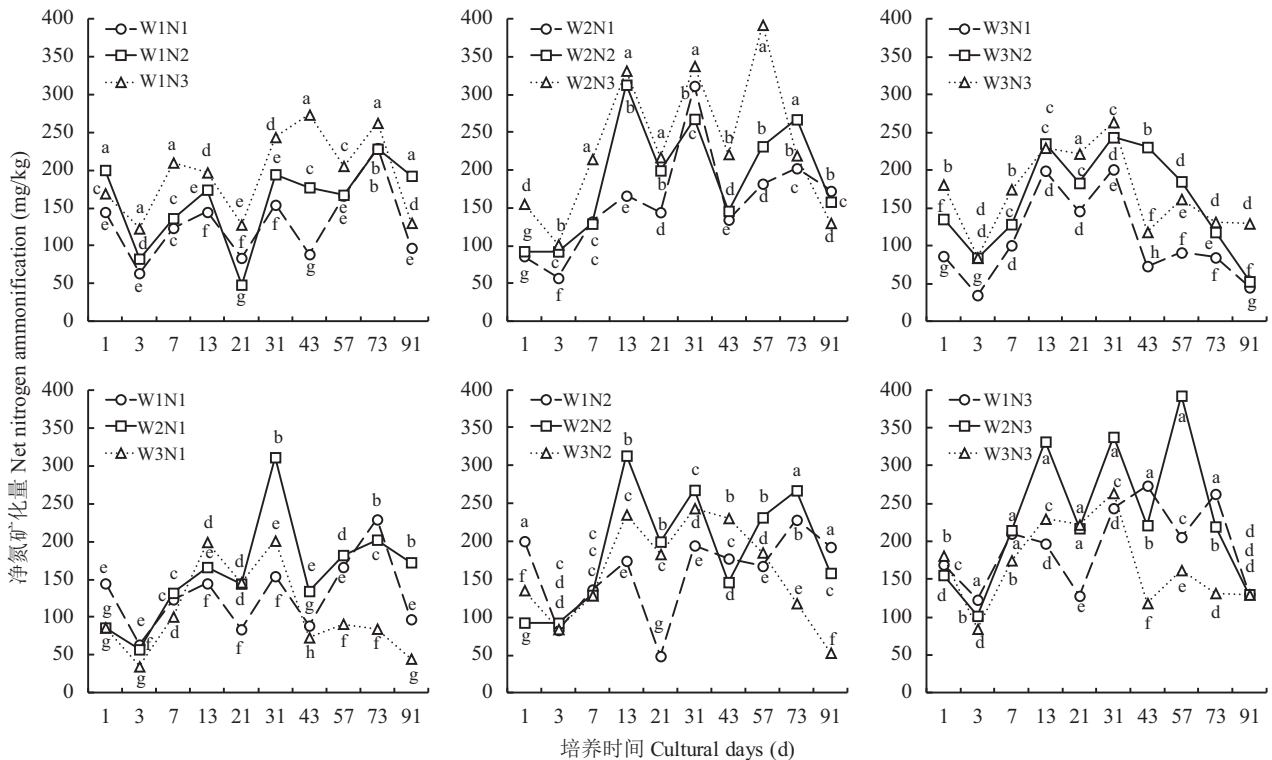


图3 各试验处理土壤净氮矿化量

Fig. 3 Soil net nitrogen mineralization

[注 (Note) : 图中不同小写字母表示相同培养时间不同处理间差异达5%显著水平

Different lowercase letters represent significant difference among the treatments under the same cultural time ( $P < 0.05$ ).]

异。第 43 和 57 d 时, N2 水平下的土壤净氮矿化量显著高于 N3 和 N1 水平。91 d 时, 土壤净氮矿化量在 N2 和 N3 水平下均显著高于 N1 水平, 且 N3 水平下显著高于 N2。

从双因素方差分析结果 (表 4) 来看, 施氮量和土壤含水量在黑麦草还田过程中不同时期均对土壤净矿化量均有极显著的影响。从  $F$  值可以看出, 施氮量和土壤含水量的交互作用也对土壤氮矿化有极显著的影响。

表 4 土壤净氮矿化量的双因素方差分析 ( $F$ )

Table 4 Two-way analysis of variance on soil net nitrogen mineralization

培养天数 Cultural days	施氮量 (N) N rate	土壤含水量 (W) Soil water content	$N \times W$
1	21.07**	19.33**	123.12**
3	85.07**	16.41**	245.56**
7	130.28**	12.20**	464.55**
13	19.68**	23.86**	145.04**
21	27.68**	82.51**	178.09**
31	22.81**	70.49**	427.04**
43	12.97**	1.65	32.77**
57	14.49**	20.40**	599.98**
73	10.21**	148.96**	329.10**
91	1.96	13.35**	35.28**

注 (Note): \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ 。

### 3 讨论

本研究表明, 施氮有利于提高土壤含水量 15% 时黑麦草还田初期土壤硝态氮含量, 但抑制了还田后期土壤硝化作用。土壤含水量 30% 时, 施氮抑制了黑麦草还田后期土壤硝化作用。土壤含水量 45% 时抑制了黑麦草还田初期不同施氮水平下土壤净硝化量, 但增加了黑麦草还田后期 (91 d) 土壤硝化量, 施氮量 60 mg/kg 下的净硝化量显著高于 120 mg/kg 水平下的。土壤含水量的增加抑制了黑麦草还田初期的土壤硝化作用, 但提高了黑麦草还田后期土壤净硝化量。化学氮肥多引起土壤有机氮的正激发效应, 有机氮肥的净激发量为负值<sup>[33]</sup>。在黑麦草还田初期, 黑麦草的易降解部分迅速被微生物分解吸收, 导致土壤硝态氮含量显著降低。张树兰等<sup>[34]</sup>研究表明施用尿素可显著提高土壤的矿化作用。同时, 土壤水分是影响土壤矿化作用的重要环境因子。土

壤水分将通过改变土壤通气状况, 改变微生物群落结构及活性<sup>[35]</sup>, 进而影响氮素矿化过程中的硝化、氨化和反硝化作用。土壤含水量较低, 会限制土壤微生物的生长, 抑制土壤氮矿化; 而土壤含水量太高, 嫌气的土壤环境反硝化作用较强, 可降低土壤氮矿化速率<sup>[36]</sup>。适宜的水分范围有利于养分的释放, 增加氨氧化细菌的种群数量和活性<sup>[37]</sup>, 研究表明, 稻田土壤水分田间持水量的 60%~65% 时是最适宜硝化作用的水分状态<sup>[38]</sup>。钱琛等<sup>[39]</sup>研究发现, 向红壤添加尿素并保证  $O_2$  供应的情况下, 硝化速率随着水分的增加而递增, 足够的水分有利于硝化作用的发生。合适的土壤含水量有利于土壤硝化作用的发生。

在本研究中, 施氮和土壤含水量显著影响了土壤净氮矿化量。土壤净氮矿化量在整个黑麦草还田过程中均为正值, 且呈现多次先增加后降低的动态变化。土壤含水量 30% 有利于促进黑麦草还田中期土壤的氨化作用, 土壤含水量 45% 降低了黑麦草还田后期土壤净氮矿化量。土壤净氮矿化量保持正值可能是由于试验中添加的氮素为硫酸铵, 可以增加氨化作用形成  $NH_4^+$ <sup>[16]</sup>, 其次黑麦草还田降解过程中释放的主要也是铵态氮<sup>[40]</sup>。有研究表明种植黑麦草的烟田释放的氨气显著高于种植油菜的烟田<sup>[41]</sup>。赵长盛等<sup>[42]</sup>研究表明黄棕壤的氨化速率基本随含水量的增加而增加。土壤含水量 45%, 还田后期净氮矿化量下降的原因可能是土壤含水量过高时土壤中  $O_2$  含量下降, 从而导致厌氧微生物如反硝化细菌的作用加强, 使部分无机氮以气体形式散失<sup>[43]</sup>。

施氮和土壤含水量显著影响了土壤净氮矿化量。相比不施氮, 三个含水量条件下的施氮处理在黑麦草还田过程中的大部分阶段都显著增加了土壤净氮矿化量, 土壤含水量 30% 条件下土壤净氮矿化量的变化最大。卢萍等<sup>[44]</sup>研究表明在无机氮充足的情况下, 碳氮比低的绿肥腐熟分解, 使土壤矿质氮增加。黑麦草还田过程中土壤净氮矿化量表现出升高—降低—升高—降低往复振荡的态势。这种情况在小麦和玉米秸秆还田过程中也存在<sup>[45]</sup>, 可能与土壤中微生物生长动态及黑麦草化学组成和分解程度不同有关。在培养 73 和 91 d 时, 30% 土壤含水量条件下施氮量 60 mg/kg 显著高于施氮量 120 mg/kg 的。这与罗亲普等<sup>[46]</sup>研究结果类似, 在内蒙古温带典型草原, 培养末期低氮处理 [ $\leq 5 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ] 可以促进氮矿化作用, 而高氮处理 [ $25 \text{ g N}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ] 一定程度上抑制了土壤氮矿化。相比土壤含水量 15%, 30% 含水量促进了黑麦草还田中期 (13~57 d) 土壤净氮矿化

量的增加, 45%含水量抑制了黑麦草还田后期(73~91 d)土壤净氮矿化量。不同的土壤含水量对土壤氮矿化过程影响差异很大<sup>[47]</sup>。陈伏生等<sup>[48]</sup>在对中亚热带丘陵红壤氮素矿化的研究中也发现, 只有适宜的土壤水分含量才有利于土壤氮素的矿化。水分和施氮量可能通过影响土壤微生物数量和活性, 调控了土壤硝化和氨化作用的发生强度, 导致了土壤氮素的动态变化。

## 4 结论

双因素方差分析结果表明, 土壤含水量和施氮量显著影响了红壤旱地黑麦草还田过程中的土壤氮矿化。红壤地黑麦草还田初期, 施氮量的增加提高了土壤中氮素的硝化和氨化作用; 土壤含水量 30% 提高了土壤氨化作用, 但土壤含水量达到 45% 时, 一定程度上抑制了土壤硝化和氨化作用。黑麦草还田中期, 土壤中矿化作用变化较大, 施氮促进了土壤氨化作用但施氮量 120 mg/kg 明显抑制了土壤硝化作用; 土壤含水量 30% 提高了土壤氨化作用, 但土壤含水量达到 45% 时, 一定程度上抑制了土壤硝化和氨化作用。黑麦草还田末期, 土壤氮氨化作用显著降低, 且施氮抑制了土壤硝化作用的发生; 土壤含水量 30% 有利于土壤硝化和氨化作用, 土壤含水量达到 45% 时, 一定程度上抑制了土壤硝化和氨化作用。

综合来看, 从促进作物生长和节约化肥资源来考虑, 红壤旱地黑麦草还田时应进行合理施氮(60 mg/kg), 还田初期应该保持较高的土壤含水量(45%), 抑制土壤的氮矿化作用, 减少氮素的淋溶或挥发, 还田中后期应该适当降低土壤含水量(30%), 增加土壤氮素的矿化, 有利于作物对氮素养分的吸收, 提高氮素利用效率。

## 参考文献:

- [1] Cemehob B, Ren S Y. Methods for regulating nutrient status of ammonium and nitrate in plants under nitrogen application[J]. *Advance in Soil Science*, 1989, 17(5): 27-29.
- [2] Stitt M, Krapp A. The interaction between elevated carbon dioxide and nitrogen nutrition: the physiological and molecular background[J]. *Plant Cell & Environment*, 1999, 22(6): 583-621.
- [3] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.  
Zhu Z L, Wen Q X. Soil nitrogen in China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992.
- [4] Morris K A. Nitrogen cycling in the rhizosphere of cheatgrass and crested wheatgrass: contributions of root exudates and senescence[D]. Logan: MS Thesis of Utah State University, 2014.
- [5] Wang F, Li J, Wang X, *et al.* Nitrogen and phosphorus addition impact soil N<sub>2</sub>O emission in a secondary tropical forest of South China[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 5615.
- [6] Zhang Y, Guo S, Zhao M, *et al.* Soil moisture influenced the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2015, 12(2): 1453-1474.
- [7] 徐冰鑫, 陈永乐, 胡宜刚, 等. 干旱过程中荒漠生物土壤结皮-土壤系统的硝化作用对温度和湿度的响应——以沙坡头地区为例[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(4): 1113-1120.  
Xu B X, Chen Y L, Hu Y G, *et al.* Nitrification of biological soil crusts and soil system during drought process and its response to temperature and moisture: A case study in the Shapotou region, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(4): 1113-1120.
- [8] 邹亚丽, 牛得草, 杨益, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响[J]. *草地学报*, 2014, 22(3): 461-468.  
Zou Y L, Niu D C, Yang Y, *et al.* The effects of nitrogen addition on soil nitrogen mineralization in the semi-arid typical grassland of Loess Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(3): 461-468.
- [9] Dinesh R, Srinivasan V, Hamza S, *et al.* Short-term effects of nutrient management regimes on biochemical and microbial properties in soils under rainfed ginger (*Zingiber officinale* Rosc.)[J]. *Geoderma*, 2012, 173: 192-198.
- [10] Powers R F. Nitrogen mineralization along an altitudinal gradient: interactions of soil temperature, moisture, and substrate quality[J]. *Forest Ecology and Management*, 1990, 30(1-4): 19-29.
- [11] 曹小闯, 李晓艳, 朱练峰, 等. 水分管理调控水稻氮素利用研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(13): 3882-3890.  
Cao X C, Li X Y, Zhu L F, *et al.* Effects of water management on rice nitrogen utilization: a review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(13): 3882-3890.
- [12] 马芬, 马红亮, 邱泓, 等. 饱和持水量条件下不同氮添加对森林土壤氮素净转化的影响[J]. *环境科学研究*, 2017, 30(4): 570-578.  
Ma F, Ma H L, Qiu H, *et al.* Effects of different nitrogen addition on net nitrogen transformation in forest soil under saturation water holding capacity condition[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(4): 570-578.
- [13] Liu X R, Ren J Q, Li S G, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil net nitrogen mineralization in the meadow steppe of Inner Mongolia, China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0134039.
- [14] 邹亚丽, 韩方虎, 耿丽英, 等. 温度和湿度对紫花苜蓿土壤氮矿化的影响[J]. *草业学报*, 2010, 19(4): 101-107.  
Zou Y L, Han F H, Gen L Y, *et al.* Effects of temperature and moisture on soil nitrogen mineralization of lucerne stands[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(4): 101-107.
- [15] 肖好燕, 刘宝, 余再鹏, 等. 亚热带不同林分土壤矿质氮库及氮矿化速率的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(3): 730-738.  
Xiao H Y, Liu B, Yu Z P, *et al.* Seasonal dynamics of soil mineral nitrogen pools and nitrogen mineralization rate in different forests in subtropical China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 730-738.



- [16] Geisseler D, Horwath W R, Joergensen R G, *et al.* Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms—a review[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(12): 2058–2067.
- [17] 田冬, 高明, 徐畅. 土壤水分和氮添加对3种质地紫色土氮矿化及土壤 pH 的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 255–261.  
Tian D, Gao M, Xu C. Effects of soil moisture and nitrogen addition on nitrogen mineralization and soil pH in purple soil of three different texture[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(1): 255–261.
- [18] Zhang X, Li Z, Tang Z, *et al.* Effects of water erosion on the redistribution of soil organic carbon in the hilly red soil region of southern China[J]. *Geomorphology*, 2013, 197: 137–144.
- [19] Wang F, Chen A L, Peng Y X, *et al.* Effect of red soil slope field under different land-use patterns on surface runoff and soil erosion[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27: 22–26.
- [20] Xie J, Guo J, Yang Z, *et al.* Rapid accumulation of carbon on severely eroded red soils through afforestation in subtropical China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 300: 53–59.
- [21] Wang B, Zheng F, Römken M J, *et al.* Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences[J]. *Geomorphology*, 2013, 187: 1–10.
- [22] 郭治兴, 王静, 柴敏, 等. 近30年来广东省土壤pH值的时空变化[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 425–430.  
Guo Z X, Wang J, Cai M, *et al.* Spatiotemporal variation of soil pH in Guangdong province of China in past 30 years[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 425–430.
- [23] López-Vicente M, García-Ruiz R, Guzmán G, *et al.* Temporal stability and patterns of runoff and runoff with different cover crops in an olive orchard (SW Andalusia, Spain)[J]. *Catena*, 2016, 147: 125–137.
- [24] Basche A D, Kaspar T C, Archontoulis S V, *et al.* Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 172: 40–50.
- [25] Plaza-Bonilla D, Nolot J M, Passot S, *et al.* Grain legume-based rotations managed under conventional tillage need cover crops to mitigate soil organic matter losses[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 33–43.
- [26] Mitchell J P, Shrestha A, Mathesius K, *et al.* Cover cropping and no-tillage improve soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 325–335.
- [27] 陈海燕. 中国畜牧业政策支持水平研究[D]. 北京: 中国农业大学博士论文, 2014.  
Chen H Y. The evaluation and research on the support policy of Chinese animal husbandry[D]. Beijing: PhD Dissertation of China Agricultural University, 2014.
- [28] 杨中艺, 月朝阳, 辛国荣, 等. 稻田冬种黑麦草对后作水稻生长的影响及其机理初探[J]. *草业科学*, 1997, 14(4): 20–24.  
Yang Z Y, Yue C Y, Xin G R, *et al.* Effect of winter cropping *Lolium multiflorum* in rice field on growth of succeeding rice and a preliminary approach to its mechanism[J]. *Pratacultural Science*, 1997, 14(4): 20–24.
- [29] 杨中艺. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的研究: IV 冬种意大利黑麦草对后作水稻生长和产量的影响[J]. *草业学报*, 1996, 5(2): 38–42.  
Yang Z Y. A study on Italian ryegrass-rice rotation system IV. Effects of Italian ryegrass winter cropping in paddy on growth, development and yield of subsequent rice[J]. *Acta Pratacultural Sinica*, 1996, 5(2): 38–42.
- [30] Jansson S L, Persson J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen[A]. Stevenson F J. Nitrogen in agricultural soils[C]. Madison: American Society of Agronomy, 1982. 229–248.
- [31] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Bao S D. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [32] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
Huang C Y. Pedology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [33] 吴元华, 王永, 石屹, 等. 冬牧70黑麦秸秆还田对烟田土壤氮素矿化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(5): 506–509.  
Wu Y H, Wang Y, Shi Y, *et al.* Effects of rye (Dongmu 70) straw returning to tobacco field on nitrogen mineralization[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2016, 44(5): 506–509.
- [34] 张树兰, 杨学云, 吕殿青, 等. 温度、水分及不同氮源对土壤硝化作用的影响[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2147–2153.  
Zhang S L, Yang X Y, Lü D Q, *et al.* Effect of soil moisture, temperature and different nitrogen fertilizers on nitrification[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2147–2153.
- [35] Agehara S. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1844–1855.
- [36] 王伟, 于兴修, 刘航, 等. 农田土壤氮矿化研究进展[J]. *中国水土保持*, 2016, (10): 67–71.  
Wang W, Yu X X, Liu H, *et al.* Research progress on soil nitrogen mineralization in farmland[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2016, (10): 67–71.
- [37] Wang A, Su Y, Li Y, *et al.* Response of the turnover of soil organic carbon to the soil moisture in paddy and upland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 266–274.
- [38] 栗方亮, 李忠佩, 刘明, 等. 氮素浓度和水分对水稻土硝化作用和微生物特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(9): 1113–1118.  
Li F L, Li Z P, Liu M, *et al.* Effects of different concentrations of nitrogen and soil moisture on paddy soil nitrification and microbial characteristics[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9): 1113–1118.
- [39] 钱琛, 蔡祖聪. 利用方式对红壤硝化作用的水分效应的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2417–2422.  
Qian C, Cai Z C. Influence of land-use type on moisture-effect of nitrification in subtropical red soils[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(10): 2417–2422.
- [40] Whitehead D, Lockyer D, Raistrick N. The volatilization of ammonia from perennial ryegrass during decomposition, drying and induced senescence[J]. *Annals of Botany*, 1988, 61(5): 567–571.
- [41] 徐雪萍, 陆引罡, 周建云, 等. 不同前茬植烟土壤的氨挥发特征[J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(5): 140–143.  
Xu X P, Lu Y G, Zhou J Y, *et al.* Ammonia volatilization features of tobacco-planting soil with different preceding crops[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2014, 42(5): 140–143.

- [42] 赵长盛, 胡承孝, 孙学成, 等. 温度和水分对华中地区菜地土壤氮素矿化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 861–866.  
Zhao C S, Hu C X, Sun X C, *et al.* Influence of temperature and moisture on nitrogen mineralization in vegetable fields of central China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(7): 861–866.
- [43] Aulakh, M. Legume residue and soil water effects on denitrification in soils of different textures[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(12): 1161–1167.
- [44] 卢萍, 杨林章, 单玉华, 等. 绿肥和秸秆还田对稻田土壤供氮能力及产量的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 39–42.  
Lu P, Yang L Z, Shan Y H, *et al.* Influence of returning green manure and wheat straw to paddy soils on soil available N content and rice yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(1): 39–42.
- [45] 李贵桐, 赵紫娟, 黄元仿, 等. 秸秆还田对土壤氮素转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(2): 162–167.  
Li G T, Zhao Z J, Huang Y F, *et al.* Effect of straw returning on soil nitrogen transformation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(2): 162–167.
- [46] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(5): 480–492.  
Luo Q P, Gong J L, Xu S, *et al.* Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in *Nei Mongol*, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(5): 480–492.
- [47] 唐树梅, 漆智平. 土壤水含量与氮矿化的关系[J]. 热带作物研究, 1997, 4(4): 54–60.  
Tang S M, Qi Z P. The relationship between soil water content and soil nitrogen mineralization[J]. Tropical Crop Research, 1997, 4(4): 54–60.
- [48] 陈伏生, 余焜, 甘露, 等. 温度、水分和森林演替对中亚热带丘陵红壤氮素矿化影响的模拟实验[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1529–1535.  
Chen F S, Yu K, Gan L, *et al.* Effects of temperature moisture and forest succession on nitrogen mineralization in hillside red soils in mid-subtropical region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1529–1535.